

# ЭКОЛОГИЯ

промышленного  
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 4  
Москва 2020

# ЭКОЛОГИЯ

## промышленного производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 4 (112)

Издается с 1993 г.

Москва 2020

### СО Д Е Р Ж А Н И Е

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

*Моисеева А. А., Куксанов В. Ф., Чекмарева О. В.* Исследование количественных и качественных показателей содержания металлов в отходах от процесса карбонитрации ..... 2

*Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Гордеева Е. В., Шитиков Е. С., Вахрушев Л. П., Шацкая В. А.* О возможности повышения эффективности производств строительных материалов. Особенности действия добавок, пластифицирующих бетонные смеси ..... 6

*Шубов Л. Я., Скобелев К. Д., Доронкина И. Г.* Критерии ресурсо- и энергоэффективности при переработке техногенного сырья и оценка его качества (на примере горно-металлургической отрасли) ..... 15

*Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г.* Применение гальванического шлама и диоксида титана в производстве облицовочной керамики ..... 23

#### ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

*Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Катин А. В.* Повышение экологической безопасности работы трубчатых печей путем оптимизации подбора конструкций газомазутных горелок ..... 28

#### ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

*Масленников А. А., Демидова С. А., Антонов В. А.* Сравнительная характеристика опасности загрязнения почвы тротилом и гексогеном ..... 33

*Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Бакланов И. О., Маслова Н. В.* Влияние загрязнения почв объектов авиационной и космической деятельности на здоровье человека ..... 39

#### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

*Доронина О. Д., Рутин Ю. А.* Актуальные проблемы уязвимости человека в условиях изменения среды обитания ..... 45

*Волынкина Е. П., Марьев В. А., Голуб О. В., Смирнова Т. С.* Эко-технопарк в Новокузнецке как пример развития техноэкосистемы и реализации принципов экономики замкнутого цикла ..... 52

Главный редактор **А. Г. Ишков**,  
д-р хим. наук, проф., акад. РАЕН,  
заместитель начальника Департамента —  
начальник Управления ПАО «Газпром»

Заместители главного редактора:  
**В. Ф. Гракович**, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН,  
председатель правления Национального Фонда содей-  
ствия устойчивому развитию регионов; **Н. П. Кузнецов**,  
д-р техн. наук, проф., Ижевский государственный  
технический университет им. М. Т. Калашникова

Ответственный секретарь **К. В. Трыкина**,  
начальник отдела научных и информационных  
изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса  
«Компас»

#### Редакционный совет:

**А. М. Амирханов**, канд. биол. наук, зам. руководителя  
Федеральной службы по надзору в сфере природо-  
пользования; **Э. В. Гирусов**, д-р филос. наук, проф.,  
акад. Российской экологической академии, Московская  
государственная академия делового администрирова-  
ния; **Н. П. Тарасова**, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф.,  
директор Института проблем устойчивого развития

#### Редакционная коллегия:

**С. С. Бабкина**, д-р хим. наук, проф., Институт тонких  
химических технологий Московского технологического  
университета; **Я. И. Вайсман**, д-р мед. наук, проф.,  
Пермский национальный исследовательский политех-  
нический университет; **В. А. Грачев**, чл.-кор. РАН,  
д-р техн. наук, проф., президент, генеральный дирек-  
тор Неправительственного экологического фонда  
им. В. И. Вернадского; **М. Н. Дадашев**, д-р техн. наук,  
проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **В. Г. Иса-  
ков**, д-р техн. наук, проф., акад. Академии военных наук  
РФ, Ижевский государственный технический универси-  
тет им. М. Т. Калашникова; **М. А. Корепанов**, д-р техн.  
наук, Институт прикладной механики Уральского отде-  
ления РАН; **Б. С. Ксенофонтов**, д-р техн. наук, проф.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана; **В. Ю. Мелешко**, д-р техн. наук,  
проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова  
РАН; **В. В. Минасян**, канд. техн. наук, генеральный дирек-  
тор ООО «Фрэкком»; **Е. А. Найман**, канд. техн. наук,  
Краковский технический университет им. Тадеуша  
Костюшко (Польша); **А. Ю. Недре**, канд. техн. наук, зам.  
директора ФГАУ «НИИ "Центр экологической промыш-  
ленной политики"; **Е. И. Пупырев**, д-р техн. наук, проф.,  
генеральный директор ОАО «МосводоканалНИИпро-  
ект»; **И. Ш. Сайфуллин**, д-р хим. наук, проф., зам.  
директора Научно-исследовательского института  
инновационного развития промышленности Российско-  
го экономического университета им. Г. В. Плеханова;  
**В. А. Тенев**, д-р физ.-мат. наук, проф., Ижевский госу-  
дарственный технический университет им. М. Т. Ка-  
лашникова; **Ю. В. Трофименко**, д-р техн. наук, проф.,  
директор Научно-исследовательского института энер-  
гоэкологических проблем автотранспортного комплекса  
при МАДИ

© Федеральное государственное унитарное пред-  
приятие «Научно-технический центр оборонного ком-  
плекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса  
«Компас»), 2020

УДК 504.064.4

## Критерии ресурсо- и энергоэффективности при переработке техногенного сырья и оценка его качества (на примере горно-металлургической отрасли)

Л. Я. ШУБОВ, д-р техн. наук; К. Д. СКОБЕЛЕВ;  
И. Г. ДОРОНКИНА, канд. техн. наук  
ФГАУ "НИИ "Центр экологической промышленной политики",  
г. Мытищи, Московская обл., Россия

*Показано, что отходы в большинстве случаев могут быть использованы как ресурсные материалы. Сделана попытка обозначить в общих чертах возможную дорожную карту обоснованного выбора технологии в системе управления отходами. Выбор ресурсосберегающей технологии — рациональный путь к развитию отрасли комплексной переработки отходов и использования вторичных ресурсов.*

**Ключевые слова:** технология, управление отходами, вторичное сырье.

Постепенное истощение природных ресурсов с одновременным ростом потребности в металлах привели к совершенствованию горно-металлургического производства как базовой основы технического прогресса в развитии человеческого общества. Мировое потребление металлов возросло настолько, что стало соизмеримо с их запасами [1].

Поскольку руды современной добычи характеризуются низким содержанием металлов (добывают их исключительно ради извлечения металлов), в полезную продукцию переходит лишь незначительная часть добываемого сырья, остальное закономерно превращается в отходы производства (вскрышная порода, хвосты обогащения, металлургические шлаки, шламы и пыли). К отходам производства очень быстро присоединяются отходы потребления — отслужившие свой срок и утрачившие потребительские свойства металлосодержащие продукты, на изготовление которых затрачено природное (первичное) сырье (электронный лом, автолом и т. д.). Проблема отходов наравне с проблемами энергии и воды является всеобщей, связанной с каждым сектором экономики [2]. Наибольшее количество отходов образуется в горно-металлургической отрасли.

Максимальное сокращение количества захороняемых отходов, не прошедших переработку, — одна из основных проблем системы ресурсосбережения как взаимосвязанной эколого-экономической и технологической системы, функционирование которой

обеспечивает рациональное использование и экономное расходование первичного (природного) и вторичного (техногенного) сырья, экономию материалов и энергии, использование вторичных материальных ресурсов (ВМР) и вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Вовлечение отходов данного вида в хозяйственный оборот во многом связано с их ресурсами, составом, степенью технологической отработанности и готовности отходов к переработке и утилизации, востребованности в получении новой продукции [3].

Поскольку экология и технический прогресс системно связаны между собой, авторами сделана попытка эколого-технологической типизации техногенного сырья (на примере горно-металлургической отрасли; таблица).

В таблице впервые в обобщенном виде дается характеристика отходов горно-металлургического комплекса как техногенного сырья для переработки и утилизации и по возможности дана их принципиальная экологическая оценка, приведены ресурсные характеристики. Таблица, составленная на основе аналитического исследования и обработки патентного фонда, позволяет обоснованно сформулировать принципиальный подход к решению проблемы ресурсосбережения в сфере горно-металлургического комплекса: извлечение из вторсырья ценных компонентов с последующей утилизацией оставшейся части в строительной индустрии. Само по себе доизвлечение ценных компонентов (в том числе металлов) проблему отходов не решает (малый выход полезной продукции) [4—11].

Исходя из изложенного, научные подходы к реализации политики в сфере ресурсосбережения и ресурсной эффективности базируются на выявлении причинно-следственных связей между закономерным образованием отходов (имеются в виду их характеристики, количество и качество) и целесообразностью их вовлечения в хозяйственный оборот, а также выявлении приоритетов в инвестиционной политике.

Шубов Лазарь Яковлевич, профессор, старший научный сотрудник.

E-mail: info@eipc.center

Скобелев Кирилл Дмитриевич, начальник отдела вторичных ресурсов и электроэнергетики.

E-mail: info@eipc.center

Доронкина Ирина Геннадиевна, доцент, научный сотрудник.

E-mail: dorenkinaig@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2020 г.

© Шубов Л. Я., Скобелев К. Д., Иванков С. И., Доронкина И. Г., 2020

## Эколого-технологическая типизация техногенного сырья

Отходы	Класс опасности	Выход	Ресурсные характеристики	Состав, %	Примечание (применяемые технологии, технологические операции)
Шлаки черной металлургии (доменные, ферросплавные, сталеплавильные)	IV	40 млн т/г.	0,5 т доменного шлака на 1 т чугуна	Доменные шлаки: SiO <sub>2</sub> 30—45, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5—17, CaO 20—50, MgO 2—15, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,5—3, FeO 0,5—5. Сталеплавильные шлаки: SiO <sub>2</sub> 13—20, CaO 28—50, оксиды железа 25—38	Дробление, грохочение, магнитная сепарация, термообработка. После извлечения железа — ценное сырье для строительной индустрии. Степень утилизации 15—20 %
Шлаки цветной металлургии (медные, свинцовые, никелевые и т. д.)	IV	10 млн т/г.	—	Медные и свинцовые шлаки: SiO <sub>2</sub> 18—45, FeO 25—50, CaO 12—13, Cu — до 1,1, Zn — до 5 Никелевые шлаки: Fe 24, Cu 0,16, Ni 0,22, SiO <sub>2</sub> 39, Co 0,075, S 0,8	Обогащение на винтовых сепараторах, выщелачивание, термическая переработка. Ценное сырье для извлечения металлов (с последующим использованием в стройиндустрии). Степень утилизации 15 %
Отходы электролитического производства алюминия	—	Более 1 млн т (накоплено в шламовых полях)	40—50 кг отходов и 1 т алюминия	—	Дробление, термическая переработка (в том числе газификация), выщелачивание NaOH, реагентная обработка, брикетирование. Наиболее токсичны соединения фтора. Перерабатывают отходы с получением CaF <sub>2</sub> . Брикетированные отходы используют в качестве топлива, в производстве цемента. Из красного шлама извлекают Al, Sc, Ti и PЗЭ, получают строительные материалы, минеральную вату и флюсовые материалы для металлургии
Хвосты флотации угольной пены	—	—	11 кг/т алюминия	F 6—12, C 65—85, Na 4—7, Al 2—6	
Шламы газоочистки	IV	—	7 кг/т алюминия	F 17—25, C 20—30, Na 15—23, Al 12—23	
Пыль электрофильтров	III	—	9 кг/т алюминия	F 13—23, C 20—34, Na 9—13, Al 9—19	
Футеровка электролизеров (углеродная часть)	IV	10 тыс. т/г. на Иркутском заводе	Срок службы футеровки на заводах в РФ 1000—1500 сут (складируется вблизи заводов)	C — до 50, криолит Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> 16—18, хиолит Na <sub>5</sub> AlF <sub>14</sub> — до 1,4, NaF 10—14, AlF <sub>3</sub> 1—5, CaF <sub>2</sub> — до 1, Al <sub>2</sub> C <sub>3</sub> — до 10, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> — до 0,6	
Футеровка электролизеров (огнеупорная часть)	IV	—	—	C 4, F 10, Al 13, Na 9, Si 18, Ca 1, Fe 2, Mg 0,7	
Красный шлам	—	—	0,9—1,5 т/т глинозема Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> 9, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 12, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 44, TiO <sub>2</sub> 4, CaO 13, MgO 1, Na <sub>2</sub> O 0,3—4, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0,7, MnO 0,5, PЗЭ 0,14, Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,01	
Шлаки производства медно-бериллиевых лигатур (МБЛ) и сплавов	III	—	—	Бериллийсодержащие отходы содержат 10—20 % Be	Измельчение, разделение на классы крупности (-1 и +1 мм). Раздельное плавление каждого класса. Из класса +1 мм получают МБЛ (применяют в военной индустрии, в производстве радиоаппаратуры)
Ванадийсодержащие металлургические шлаки	—	—	—	V 12—15, Fe 28, MgO 2—4, SiO <sub>2</sub> 13—20, TiO <sub>2</sub> 10, MnO 12	Измельчение, магнитная сепарация, обжиг немагнитной фракции крупностью -0,1 мм с последующим выщелачиванием содой. Готовый продукт содержит 98 % V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (используется для получения V в качестве катализатора, в наукоемких технологиях)
Металлические радиоактивные отходы (РО) и металлургические шлаки	—	Более 1 млн т РО (накоплено в хранилищах)	Расход шлака 1—1,5 % от массы РО (используется в качестве флюса)	Жидкий шлак низкой основности (экстрагирование радионуклидов из металла): SiO <sub>2</sub> 46—57, CaO 9—12, MgO 1—4, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 11—13, Fe <sub>общ</sub> 5—18, MnO 4—10	Экстрагирование радионуклидов из металла в шлак и их фиксация в шлаке. Выпуск из плавильной камеры радиоактивного шлака и дезактивированного металла (возвращается в оборот) — раздельный
Лежалые железосодержащие хвосты медной флотации	IV	—	—	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 35, FeO 27, SiO <sub>2</sub> 29, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 4, CaO 3, MgO 3	Сушка, измельчение до 1—2 мм, восстановительный обжиг, резкое охлаждение, измельчение до 1 мм, магнитная сепарация. Немагнитная фракция — высококачественный песок
Хвосты обогащения вольфрамовых руд	—	—	—	WO <sub>3</sub> 0,09	Доизвлечение вольфрама: отсева класса +8 мм, винтовая сепарация, обогащение черного концентрата на столах и флотация (получаемый концентрат содержит 62 % WO <sub>3</sub> при извлечении от операции 50 %)
Шлак свинцового производства	—	—	—	Si 11, Zn 9,5, Fe 14, Ca 16, Ge 0,04 Полезные продукты: Ca(OH) <sub>2</sub> , соли Zn, гидроксиды Fe, SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub>	Измельчение, выщелачивание HCl, фильтрование (жидкая фаза — Fe, Zn, Ca, твердая — SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> ). Жидкая фаза проходит щелочную обработку, твердая — кислотную

Окончание таблицы

Отходы	Класс опасности	Выход	Ресурсные характеристики	Состав, %	Примечание (применяемые технологии, технологические операции)
Лежалые шлаки медеплавильного производства		—	—	Cu 3—9, Pb 40, Zn 1—2, Fe 8—11, As 0,6—9, Sb 1—3,5, S <sub>общ</sub> 4—11 Полезные продукты: Черновой свинец, цементная медь, арсенат кальция, железоксидный пигмент, вторичный шлак (для стройиндустрии)	Обогащение на винтовых сепараторах, ручное биовыщелачивание легкой фракции (извлечение, %: Cu 76—88, Zn 80); кек — на доводку металлургическими методами
Медьсодержащие шламы гальванического производства	III	—	—	Cu 60, Fe 3, Ca 0,1, Si 0,04, Pb 0,45, Sn 0,01, Zn 0,03, Cr 0,01. Полезные продукты: Алюминиевая бронза, легированная железом (Cu 87 %, Al 9 %, Fe 3 %)	Термообработка, измельчение и смешивание с алюминиевым порошком (отход механической обработки алюминиевых деталей)
Пылевидные отходы металлургического производства (пыль газоочистки)	IV	—	—	Пыль газоочистки: CaO 13—14, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50, SiO <sub>2</sub> 6, Na <sub>2</sub> O 10, MgO 4, ZnO 6, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,6, K <sub>2</sub> O 0,5—6, MnO 2—3, PbO 0,5, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,3, SO <sub>3</sub> 1,5, CuO 0,15, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0,15, Br 0,01, Cd 0,02, V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,01, NiO 0,02	Послойная подача на поверхность жидкого шлака (исключается вторичное окисление металлов): уголь + отходы + уголь. Магнитная сепарация шлака (извлечение металлов)
Шламы и пыли ферросплавного производства	—	—	—	Шламы ферросплавных электропечей: Mn 9, Fe 20, MgO 2, SiO <sub>2</sub> 30, CaO 2, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 4, SO <sub>3</sub> 5, K <sub>2</sub> O 1,5, H <sub>2</sub> O 50. Пыли ферросплавных электропечей: Mn 40—42, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8, CaO 3, MgO 2, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3, SiO <sub>2</sub> 10, P 0,4, H <sub>2</sub> O 0,7	Выщелачивание сырья H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , фильтрование пульпы (извлечение Mn в раствор 95—96 %). Из фильтрата выделяют Mn (в виде осадка, содержит 65 % Mn) и получают удобрение
Извлечение драгметаллов из плат радиоэлектронных изделий	IV	1,2 млн т/г. (электронный лом)		Au 0,08—0,27, Ag 0,43—2,5, Cu 21—23, Al 15,0—15,5, Fe 7—12, Pb 3, Sn 1,5—12,5, Pt 0,7—0,9. Состав осадка (направляется на аффинаж), %: Au 6—7, Ag 35,5—64,8, Pt 23,3—57,8, прочие металлы 0,7—4,9	Дробление плат (крупность 0,1—0,5 мм), флотация (отделение металлической фракции от текстолита и органических материалов), промывка металлической фракции и ее сушка, смешивание металлической фракции с тетрафтороброматом KBrF <sub>4</sub> (соотношение 1:10), нагрев смеси при температуре 400 °С (сплавление), растворение плава в воде (после остывания), отделение осадка фильтрованием, сушка и направление на аффинаж

Система управления отходами создается в интересах охраны окружающей среды и рационального природопользования (с учетом одного из основных принципов: предпочтительно сохранение энергии, сосредоточенной в отходах, за счет их вторичного использования в качестве ВМП, а не прямое сжигание с утилизацией энергии). Без научно обоснованного подхода оптимизировать систему управления отходами невозможно.

При вовлечении в хозяйственный оборот многотоннажных отходов необходима достоверная информация не только о ресурсах, но и о качестве вторсырья и возможных направлениях его переработки и утилизации (приоритеты отраслевых инвестиций), для чего требуются организация опробования скоплений и отвалов техногенного сырья и проведение масштабных экспериментальных исследований (по аналогии с новыми месторождениями природных полезных ископаемых). Это весьма трудоемкая задача, для решения которой нужны средства и время [12]. (Оценка запасов месторождений природного ископаемого сырья проводится в ком-

плексе с исследованием их обогатимости — способности подвергаться переработке с применением существующих технологий.)

Для экономии средств и времени, для повышения комплексности исследований и их достоверности впервые предложено обоснование методологии оценки качества техногенного сырья и возможных направлений его утилизации на основе аналитического исследования совокупности запатентованных технологических решений, объектом разработки которых является техногенное сырье, образовавшееся в результате переработки полезных ископаемых и их производных (в цепочке получения разнообразной продукции, утрачивающей со временем потребительские свойства).

Приведем обоснование целесообразности применения такой методологии:

- запатентованные технологические решения проверены экспериментально на реальных пробах отходов производства; они не только выявляют возможности технологии, но и уточняют состав отходов как объектов переработки;

- эксперименты можно считать комплексными: они проведены разными исследователями и решают разные задачи;

- запатентованные технологии применительно к ВМР являются ресурсосберегающими; их можно рассматривать как инновационные предложения;

- в случае укрупненных положительных технологических испытаний, например полупромышленных, технология может быть рекомендована к практическому применению и использована в качестве исходных данных для проектирования нового производства.

Представим новые ресурсосберегающие технологии, прошедшие полупромышленную и опытно-промышленную апробацию:

- переработка мелкодисперсных фторуглеродсодержащих отходов электролитического производства алюминия (на шламовых полях накоплены миллионы тонн отходов);

- переработка пылей вторичного свинца и пасты свинцовых аккумуляторов;

- совместная переработка медистых шлаков и шламов медьэлектролитного производства;

- обезвреживание сталеплавильного шлака и железного купороса (выделен при регенерации отработанных травильных растворов);

- извлечение из золошлаковых отходов (ЗШО) магнитной фракции;

- комплексная переработка ЗШО с извлечением ценных компонентов и недожога;

- переработки пиритных огарков;

- переработка фосфогипса (с извлечением ценных компонентов, в том числе РЗЭ);

- получение высокопрочного искусственного гипсового камня.

Анализ запатентованных технологических решений показывает [11], что техногенные месторождения многотоннажных отходов в РФ практически изучены и пригодны к эксплуатации. Многие апробированные технологические решения есть основания считать ресурсоэффективными. Следовательно, проблема отходов, исходя из методов её решения, перефокусируется на проблему вторсырья как части проблемы ресурсосбережения. Весьма важно, что вовлечение в хозяйственный оборот многих видов вторсырья базируется на применении экспериментально проверенных технологических решений и технологические и инвестиционные риски сведены к минимуму.

В целом извлечение из вторсырья ценных компонентов с последующей утилизацией оставшейся части в строительной индустрии принципиально является рациональным решением проблемы ресурсосбережения и повышения ресурсоэффективности (стратегическое планирование).

Таким образом, приведенное аналитическое исследование совокупности запатентованных ресурсосберегающих решений различных технологических задач является эффективным методом оценки качества техногенного сырья и его пригодности к вовлечению в хозяйственный оборот, оценки направлений его утилизации. Такой подход представляется также наиболее информативным и обоснованным

методом оценки правильности подходов к решению проблемы вторсырья и созданию соответствующих рыночных условий для переработки и использования отходов в том или ином регионе, для минимизации экологических и инвестиционных рисков. Его можно использовать и как метод экспертных оценок при определении эколого-экономической эффективности и целесообразности вовлечения в переработку техногенного сырья, при реализации обоснованной экологической промышленной политики.

Целесообразность масштабного вовлечения в переработку и утилизацию многотоннажных отходов как техногенного сырья, сосредоточенного в искусственных скоплениях отходов, загрязняющих окружающую среду, объясняется следующими причинами:

- необходимость решения проблемы отходов продиктована Федеральным законом "Об отходах производства и потребления" от 29.12.2014 № 458-ФЗ (в соответствии со ст. 3 этого Закона определена следующая приоритетность действий: максимальное использование исходного сырья и материалов; предотвращение образования отходов; сокращение образования отходов и снижение класса опасности отходов в источниках их образования; обработка отходов; утилизация отходов; обезвреживание отходов);

- экологические требования (в РФ в отвалах накоплено около 2 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО), более 3 млрд т отходов горно-металлургического производства и других загрязняющих окружающую среду отходов; формирование отвалов связано с изъятием земель из полезного использования); экологические проблемы сами по себе не представляют интерес для рынка, но в то же время составной частью конкурентоспособности новой продукции становятся её экологические характеристики (экоэффективность);

- ЗШО и шлаки представляют собой тонкоизмельченный термически обработанный и негоряемый продукт (содержат реакционноспособные оксиды кальция, кремния и алюминия, обладают низкой теплопроводностью); характеристики многих отходов определяют их потенциальную пригодность к использованию в строительной индустрии и в дорожном строительстве [13];

- многие отходы содержат ценные компоненты (соединения железа, микросферы, редкие и редкоземельные металлы, цветные и благородные металлы и т. д.).

Необходимые действия на государственном уровне:

- законодательно все предприятия обязаны вести учет в области обращения с отходами и представлять информацию об этом органам власти;

- государственная поддержка реализации продукции с использованием вторсырья;

- наложение ограничений на использование первичных материалов или продукции из них, если имеются аналогичные материалы или продукция с использованием вторсырья;

- льготное налогообложение предприятий, осуществляющих деятельность по обращению с отходами;

- льготные тарифы на транспортирование вторсырья, полученного из отходов;

- кредитные льготы на создание инфраструктуры утилизации отходов.

Возможность перевода того или иного отхода в категорию "вторичный ресурс" в данных технико-экономических условиях зависит от ресурсной ценности и степени приоритетности отхода с учетом его количества, состава, технологической пригодности к переработке и утилизации, вида и количественных показателей выхода новой продукции и её востребованности (естественно, в первую очередь должны решаться вопрос о вовлечении в переработку и утилизацию отходов, содержащих ценные компоненты и запрещенных к захоронению; их номенклатура определена распоряжением Правительства РФ от 25.07.2017 № 1589-Р).

Из многотоннажных отходов (условно к ним можно отнести отходы, образование которых превышает 1 млн т в год), образующихся при переработке природных полезных ископаемых, и получаемой из них продукции приоритетными являются металлургические шлаки и отходы электролитической промышленности алюминия (металлургическая промышленность), золошлаковые отходы (топливно-энергетическая промышленность) и фосфогипс (химическая промышленность) исходя из их количественных характеристик, состава, свойств, широкой возможности и значимости полезного использования, ресурсной ценности, готовности к переработке.

К числу многотоннажных ресурсно-привлекательных отходов можно отнести:

- вскрышные породы, хвосты обогащения, шлаки и шламы (отходы горнодобывающей и металлургической промышленности);
- золошлаковые отходы (топливно-энергетическая промышленность);
- фосфогипс и пиритные огарки (отходы химической промышленности);
- твердые коммунальные отходы;
- отходы целлюлозно-бумажного и гидролизного производства;
- макулатуру;
- пластмассовые отходы;
- отработанные шины и резинотехнические изделия;
- электронный и электротехнический лом;
- автотом;
- отходы строительной индустрии;
- крупногабаритные материалы.

В целом ресурсоэффективность решения проблемы отходов и вторсырья определяется технологическими показателями, характеристикой продукции, экологичностью процесса и минимизацией расходов.

Ресурсоэффективность характеризует систему ресурсосбережения с точки зрения степени утилизации отходов и качества получаемой продукции (при минимизации затрат и экологических рисков). Степень утилизации отходов — это количество ресурсов, выделенных из отходов для вторичного использования, выраженное в процентах от общего количества образующихся отходов данного вида. Качество получаемой продукции характеризуется специфическими

показателями отраслевого применения этой продукции.

Технологические критерии, представляющие собой комбинацию рассматриваемых далее основных параметров процесса ( $\alpha, \beta, \epsilon, \gamma$ ), связаны зависимостью  $\gamma\beta = \alpha\epsilon$ . Целевой функцией является извлечение  $\epsilon = \gamma\beta/\alpha$  (при условии, что содержание полезного компонента  $\beta$  в готовом продукте удовлетворяет требованиям последующего передела переработки) [14].

Критерии ресурсной эффективности переработки техногенного сырья следующие:

- степень утилизации отходов, %;
- технологические показатели применяемых процессов (обогащение, металлургия, химическая обработка и т. д.):
  - содержание в исходном продукте  $\alpha$ , %;
  - извлечение  $\epsilon$ , %;
  - содержание в полезном продукте  $\beta$ , %;
  - выход  $\gamma$ , %;
- строительно-технологические свойства новой продукции (при условии её применения в стройиндустрии):
  - прочность на сжатие  $\delta_{сж}$ , МПа;
  - прочность на изгиб  $\delta_{из}$ , МПа;
  - морозостойкость  $M$ , циклы;
  - теплопроводность  $\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>·°С;
  - водопоглощение  $B$ , %;
- показатели, характеризующие бумагообразующие свойства макулатуры как вторсырья (макулатуроперерабатывающая отрасль):
  - разрывная длина, м;
  - сопротивление продавливанию, кПа;
- удельный расход энергии, кВт·ч/т (сырья, продукции).

Далее дана оценка ресурсоэффективности технологии обогащения как подготовительной операции в общей схеме переработки отходов.

Технология обогащения техногенного сырья — это совокупность методов (операций) воздействия на отходы в целях повышения их качества как вторсырья (стабилизация состава, крупности, извлечение ценных и удаление нежелательных компонентов) для последующей переработки и утилизации.

Основные технологические показатели, характеризующие процесс обогащения (сепарации), — *извлечение, содержание и выход*. Они позволяют оценить эффективность данной технологии и сравнить её с другими технологическими процессами, решающими аналогичные задачи.

Извлечение  $\epsilon$  компонента в продукт сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе компонента в исходном.

Содержание  $\beta$  компонента в продукте сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе продукта сепарации.

Выход  $\gamma$  продукта сепарации — отношение массы продукта сепарации к массе исходного материала.

Показатели сепарации обычно выражают в процентах (реже — в долях единицы).

Продукты и полупродукты (фракции отходов), выделяемые при сепарации, должны удовлетворять действующим стандартам и требованиям конкретного производства, куда они будут направлены.

Приведем конкретный пример.

В процесс сепарации поступила 1 т отходов. Материал транспортируют конвейерной лентой, над которой установлен подвесной магнитный сепаратор.

В 1 т отходов содержится 5 % железа (50 кг).

В результате магнитной сепарации получена магнитная фракция массой 25 кг. Она представлена черными металлами (20 кг) и примесями (5 кг).

Определяем показатели сепарации:

$$\varepsilon = \frac{20 \text{ кг}}{50 \text{ кг}} 100 \% = 40 \%;$$

$$\beta = \frac{20 \text{ кг}}{25 \text{ кг}} 100 \% = 80 \%;$$

$$\gamma = \frac{25 \text{ кг}}{1000 \text{ кг}} 100 \% = 2,5 \%.$$

Численные значения технологических показателей позволяют судить об эффективности процесса сепарации (хорошие это показатели или плохие).

Извлечение: достигнутый показатель 40 %, максимально возможный 100 %. Большие потери черного металла с немагнитной фракцией свидетельствуют о том, что одностадийная магнитная сепарация недостаточна, требуется по крайней мере еще одна стадия, установка еще одного сепаратора по ходу процесса.

Содержание высокое: 80 %. По ГОСТу содержание железа в магнитной фракции при обогащении ТКО — не менее 97 % (следовательно, требуется перечистка).

Выход: 2,5 %. Показатель неплохой. Он показывает, что удалось отделить часть соединений железа от основной массы отходов (выход хвостов магнитной сепарации 100 % — 2,5 % = 97,5 %; в случае шлаков или ЗШО хвосты магнитной сепарации — оптимизированный продукт для использования в стройиндустрии).

Показатель комплексности использования отходов — число выделенных компонентов и их извлечение в кондиционные продукты.

Объединяющим процессом в схеме комплексной переработки отходов является обогащение. Управляя качеством и количеством отходов на основе их разделения на несколько несмешивающихся потоков методами обогащения, можно не только извлечь ценные компоненты, но и улучшить качество отходов как вторсырья (в частности, стабилизировать состав) и оптимизировать процессы их последующей переработки (производство бетона, цемента, вяжущих и т. д.).

Рациональная комплексная переработка отходов обеспечивает извлечение и получение ресурсоценных компонентов и материалов и соблюдение дей-

ствующих стандартов в сфере утилизации вторсырья [15].

Для сравнения технологий утилизации обогащенных отходов в стройиндустрии и дорожном строительстве (производство бетона, цемента, вяжущих, цементного клинкера и т. д.) изучают *строительно-технологические свойства* новой продукции: прочностные характеристики, нормализуемая влажность, сыпучесть, неслеживаемость и т. д. (основные показатели качества получаемой продукции)\* [16].

Таким образом, технологии сравнивают с учетом специфики отраслевого применения получаемой продукции.

Независимо от вида вовлекаемых в переработку отходов, состав сырья на входе в термический процесс должен быть оптимизирован по критериям энергосбережения и экологической безопасности:

- термической утилизации должна подвергаться обогащенная горючая фракция отходов определенной крупности (требования конкретного процесса) и теплотворной способности, не содержащая ресурсоценных и опасных компонентов (отработанные сухие гальваноэлементы, отслужившие свой срок ртутьсодержащие изделия и т. п.);

- теплотворная способность смеси отходов (типа ТКО), поступающих на сжигание, — в пределах 2000—3000 ккал/кг (обеспечение стабильности и автотенности процесса);

- содержание в шлаке недогоревшего углерода — не более 0,3 % (требования к содержанию недожога);

- класс опасности шлака — не ниже IV.

Основные пути повышения энергоэффективности при переработке отходов:

- полнота сгорания объекта переработки (минимизация выхода недожога);

- рациональная подготовка отходов к термической переработке (например, брикетирование, удаление балласта и т. д.);

- извлечение из золы недожога (его брикетирование и использование в качестве топлива);

\* Бетон — один из важнейших строительных материалов, который представляет собой искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердения уплотненной смеси вяжущего вещества, воды, заполнителей и, в некоторых случаях, добавок. Основным показателем качества бетона — прочность при сжатии (по ней устанавливается марка бетона).

Вяжущие вещества — строительные материалы для изготовления бетонов и растворов. Минеральные вяжущие вещества при смешивании с водой образуют пластичную массу, приобретающую затем камневидное состояние. Их делят на гидравлические (способны твердеть и сохранять прочность на воздухе и в воде, например портландцемент) и воздушные (твердеют и сохраняют прочность только на воздухе, например гипс, известь).

Цемент — гидравлическое вяжущее вещество. При смешивании с водой он образует пластичную массу, приобретающую затем камневидное состояние.

Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество. Его получают совместным измельчением клинкера и гипса (иногда некоторых добавок).

Клинкер цементный — полупродукт, получаемый в виде гранул при обжиге тонкоизмельченной смеси известняка с глиной. Применяется в производстве цемента.

- полнота утилизации выделяющейся теплоты при термической переработке отходов, например за счет:

- утилизации теплоты расплава шлаков при переработке пылевидных отходов металлургического производства с получением чистых металлизированных слитков;
- получения более эффективных энергоносителей, например в так называемом адиабатическом процессе газификации отходов;

- экономия энергии за счет совершенствования технологии основного производства:

- низкой энергоемкостью характеризуется возгонка олова в сульфидной форме (технология извлечения олова из бедных металлургических шлаков);
- 30 % энергии позволяет экономить технология переработки техногенного сырья с получением гидравлических вяжущих, основанная на его специальной физической обработке и применении эффективных химических добавок;
- низким расходом энергии характеризуется технология извлечения углеродных наночастиц из углеродистого материала (за счет использования в качестве сырьевого материала отходов, прошедших высокоэнергетическую обработку в процессе электролиза алюминия);

- измельчение отработанных шин с добавлением девулканизатора резины.

Анализ совокупности запатентованных технологических решений доказывает пригодность металлургических отходов, ЗШО и фосфогипса, образующих большие скопления, к вторичному использованию и характеризует их широкие технологические возможности как объектов переработки.

### Выводы

Отмечены причинно-следственные связи между закономерным образованием отходов и целесообразностью их вовлечения в хозяйственный оборот (в том числе с учетом инвестиционных приоритетов) исходя из характеристики, количества и качества техногенного сырья и востребованности новой продукции.

Впервые предложено обоснование методологии оценки обогатимости техногенного сырья (его качества с точки зрения готовности к переработке и возможных направлений утилизации) на основе аналитического исследования совокупности запатентованных технологических решений, объектом разработки которых является техногенное сырье, образовавшееся в результате переработки полезных ископаемых и получаемой из них продукции, утратившей со временем потребительские свойства.

Подчеркнуто, что техногенные месторождения многотоннажных отходов в РФ практически изучены и пригодны к эксплуатации.

Показано, что стратегическое планирование ресурсосбережения и повышения ресурсоэффективности в сфере обращения с многотоннажными отхода-

ми может быть связано с извлечением из вторсырья ценных компонентов с последующей утилизацией оставшейся части в строительной индустрии.

Рассмотрены критерии ресурсо- и энергоэффективности при переработке техногенного сырья (степень утилизации отходов, технологические показатели применяемых процессов, специфические показатели качества новой продукции, удельный расход энергии).

Из многотоннажных отходов, образующихся при переработке природных полезных ископаемых и получаемой из них продукции приоритетными для вовлечения в хозяйственный оборот являются металлургические шлаки и отходы электролитического производства алюминия (металлургическая промышленность), золошлаковые отходы (топливно-энергетическая промышленность) и фосфогипс (химическая промышленность) — исходя из их количественных характеристик, состава, свойств, широкой возможности и значимости полезного использования, ресурсной ценности, готовности к переработке.

Предложена эколого-экономическая типизация отходов горно-металлургического комплекса (в порядке обсуждения).

*Авторы выражают благодарность  
за ценные советы по содержанию статьи  
доктору технических наук,  
профессору Т. В. Гусевой*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Эволюция стратегии управления ТБО // Твердые бытовые отходы. 2014. № 11(101). С. 12—15.
2. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Стратегия оптимизации комплексного управления твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации // Экология промышленного производства. 2017. № 4(100). С. 16—25.
3. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Состав ТБО — критерий эффективности схем управления // Твердые бытовые отходы. 2013. № 12(90). С. 28—33.
4. Прутков Д. В. и др. Переработка АМг-лома в алюминиевых электролизерах // Теория и практика металлургии. 2014. № 3—6. С. 165—167.
5. Sugiyama S. et al. Feasibility of recycling aluminum alloy scrap by semisolid extrusion // Solid State Phenom. 2008. № 141—143. P. 79—83.
6. Камалов К. О. и др. Переработка цинксодержащих пылей медеплавильного производства на цинковые пигменты // Цветные металлы. 2015. № 7. С. 2932.
7. Amer Ashraf. The hydrometallurgical extraction of rhenium from copper industrial wastes // J. Miner. Metals and Mater. Sos. 2008. V. 60. № 8. P. 52—54.
8. Bakhtiari F. et al. Continuous copper recovery from a smelter's dust in stirred tank reactors // Int. J. Miner. Process. 2008. V. 86. № 1—4. P. 50—57.
9. Amaral Fabio et al. Metals recovery from galvanic sludge by sulfate roasting and thiosulfate leaching // Miner. Eng. 2014. V. 60. P. 1—7.
10. Mahmoudi H. A. и др. Высокотемпературный процесс переработки медных отходов в порошок меди // Химический журнал Армении. 2017. Т. 70. № 4. С. 477—486.
11. Иванков С. И., Скобелев К. Д., Шубов Л. Я., Доронкина И. Г. Систематизация многотоннажных отходов и запатентованные технологии их утилизации и переработки // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 1. С. 2—118.
12. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Оптимизация системы комплексного управления ТБО в Российской Федерации (обосновывающие материалы и стратегия) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2018. № 1. С. 2.

13. Шубов Л. Я., Скобелев К. Д., Иванков С. И., Доронкина И. Г. Аналитическая оценка золошлаковых отходов как техногенного сырья (к обоснованию экологической промышленной политики) // Экология промышленного производства. 2018. № 3(103). С. 15—23.

14. Скобелев Д. О. Ресурсная эффективность экономики: аспекты стратегического планирования // Менеджмент в России и за рубежом. 2020. № 4. С. 3—13.

15. Скобелев Д. О. Возвращение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот: экономика, технология, право // Компетентность. 2020. № 4. С. 8—15.

16. Скобелев Д. О., Гусева Т. В., Молчанова Я. П., Аверочкин Е. М. Энергетическая и экологическая эффективность производства строительных материалов // Компетентность. 2011. № 9—10(90—91). С. 32—41.

## Criteria of resource and energy efficiency in the processing of technogenic raw materials and assessment of its quality (on the example of the mining and metallurgical industry)

L. Ya. SHUBOV, K. D. SCOBELLEV, I. G. DORONKINA  
FSAB "Research Institute "Environmental Industrial Policy Center",  
Mytischki, Moscow region, Russia

*It is shown that waste can be used as a resource for a great number of material. The article attempts an outline of possible roadmaps towards sustainable solutions of the technology based on creation of waste management. The creation of resource recovery environmentally safe technology is the rational way to develop branch of industry of complex waste and recyclable materials treatment and utilization.*

*Keyword:* technology, waste management, recyclable materials.

Bibliography — 16 references.

*Received September 1, 2020*