

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Лазарь Яковлевич Шубов

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший научный сотрудник, доктор технических наук, профессор

Кирилл Дмитриевич Скобелев

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
начальник отдела развития отходов перерабатывающей отрасли

Дарья Антоновна Загорская

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
инженер

ВВЕДЕНИЕ

Виды вторичных ресурсов, образующихся в тепловой энергетике, зависят от множества факторов, главными из которых являются:

- вид используемого топлива;
- типы применяемых технологий.

Так, в теплоэнергетике образуются, например, отходы гипса при очистке дымовых газов с использованием установок обессеривания на карбонате кальция, нефтешламы при использовании жидких видов топлива. Однако самый распространенный вид отходов, который образуется в теплоэнергетике и считается ее «визитной карточкой», — золошлаковые отходы (ЗШО).

Золошлаковые отходы образуются при сжигании угля. При этом различают золу уноса (удаляется с дымовыми газами), топливные шлаки (удаляются из котла) и золошлаковые смеси. Нет четкого соотношения между количеством образовавшихся золошлаков и количеством сожженного угля, так как на это соотношение влияет множество факторов:

- конструкция аппаратуры, в которой сжигается уголь;
- тип угля, содержание в нем примесей;
- параметры подготовки угля к сжиганию и самого процесса сжигания, а также очистки образующихся дымовых газов;
- другие.

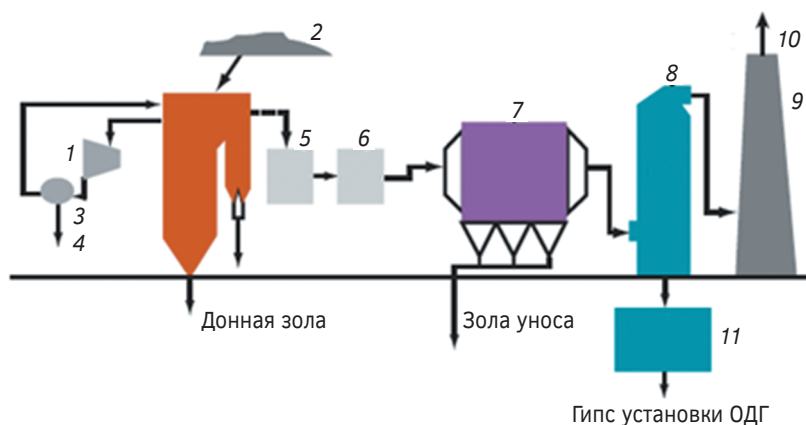


Рис. 15.1. Пример схемы парогенерации на угольной ТЭС:

1 — турбина; 2 — уголь; 3 — конденсатор; 4 — охлаждающая вода; 5 — система каталитического удаления оксидов азота; 6 — воздухоподогреватель; 7 — электроосадитель, или рукавный фильтр; 8 — установка обессеривания дымового газа (ОДГ); 9 — дымовая труба; 10 — дымовые газы; 11 — обработка и обезвоживание отходов установки ОДГ

Золошлаковые отходы образуются во многих странах мира. По состоянию на 2015 г. около 40% всей электроэнергии производилось путем сжигания угля.

ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Использование угля в тепловой энергетике неизбежно приводит к образованию отходов. Это связано с тем, что топливный уголь обязательно содержит в своем составе негорючие минеральные примеси. От части этих примесей избавляются при обогащении угля (один из этапов процесса подготовки угля к сжиганию). Полное избавление от минеральных примесей невозможно, а глубокое обогащение энергетических углей нецелесообразно экономически. Так, в ГОСТ 32347–2013 «Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия» регламентируемая зольность (содержание негорючих примесей) может составлять от 13 до 40%, а средняя — 25%, то есть из тонны угля образуются в среднем как минимум 250 кг золы. Не весь уголь сгорает, и в зависимости от технологического процесса сжигания часть угля остается в золе в виде недожога (потери массы при прокаливании). Высокая степень недожога невыгодна для электростанций, но полностью дожигать уголь тоже не получается — для зол разных видов углей нормативные показатели по недожогу составляют от 2 до 24%, причем значения 2–3% зачастую достигаются путем предварительной подготовки золы уноса к использованию.

В развитых странах наблюдается тенденция к отказу от угля в пользу других источников энергии — перевод угольных тепловых электростанций на газ и т. п. Тем не менее даже в США угольная энергетика генерирует 30% всей электроэнергии страны, производя более 100 млн т ЗШО. Однако около 60% этих ЗШО перерабатывается, на чем электростанции зарабатывают около 23 млрд долларов.

В РФ ежегодно образуются 25–30 млн т ЗШО, а объем накопленных отходов оценивается в 1,5–2 млрд т. Несмотря на богатые запасы природного газа, обширные водные ресурсы и развитую атомную энергетику, можно с уверенностью говорить, что угольная энергетика в РФ играет важную роль, охватывая примерно пятую часть в структуре электрогенерации.

Согласно ЦДУ ТЭК на сегодняшний день в мировой угольной промышленности наметилась настораживающая тенденция к сокращению объемов добычи угля.

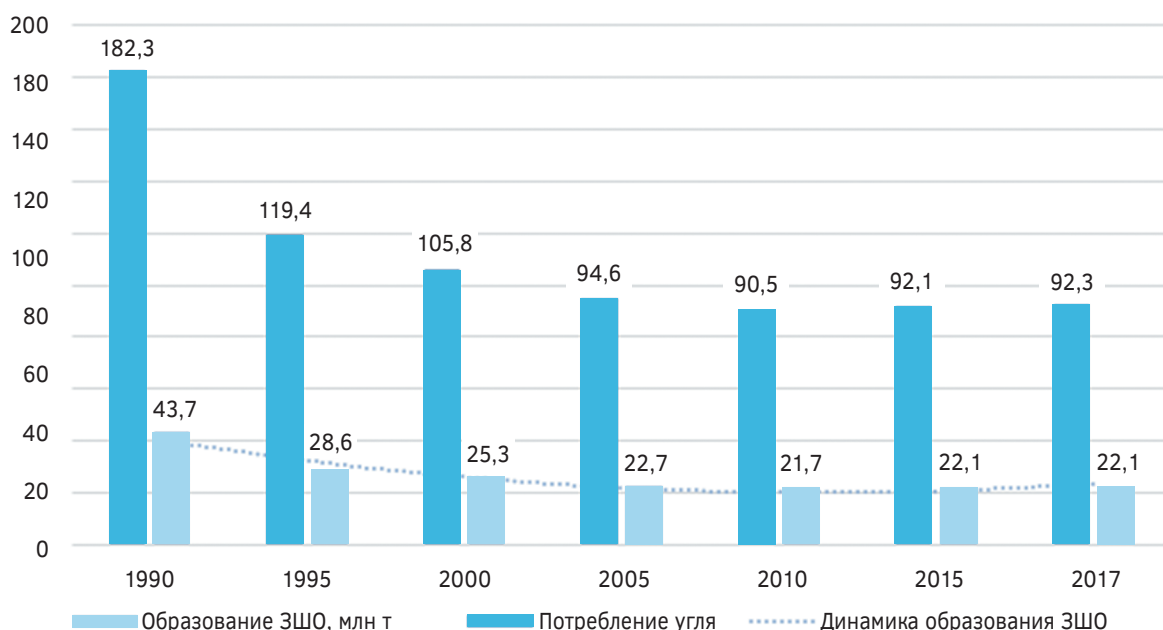


Рис. 15.2. Потребление угля и образование ЗШО, млн т
(график исторического развития отрасли)

В 2013 г. мировая угольная отрасль достигла своего исторического максимума — объем добытого угля в мире в указанном году составил 8270,9 млн т. И с этого момента угольное производство на международной арене начало постепенно сокращаться. В 2017 г. оно составило уже 7727,3 млн т (–543,6 млн т к уровню 2013 г., или 93,4%). Причем эта тенденция отмечена практически во всех регионах мира, за исключением Южной Америки и Африки, где за этот период производство осталось на прежнем уровне и даже несколько выросло.

Зольность угля варьируется в интервале от 4,3% (Бачатский угольный разрез) до 50% (шахта «Большевик»).

Если взять среднюю зольность угля по всем разрезам (24%), то мы можем подсчитать количество образованной золы относительно потребленного угля.

Исходя из этой статистики несложно предположить, что потребление угля, а следовательно, накопление ЗШО постепенно снижается.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Техногенные образования золошлаковых отходов называются золошлакоотвалами, возможно и раздельное накопление золы и шлаков в золоотвалах и шлакоотвалах. На территории РФ под золошлакоотвалы отчуждено порядка 28 тыс. га земель, что сопоставимо с территорией таких городов, как Иркутск, Красноярск или Томск.

В зависимости от устройства системы золошлакоудаления образуются намывные (гидравлические) или насыпные («сухие») отвалы. Каждая система имеет свои преимущества и недостатки, например, «сухой» отвал дороже с точки зрения капитальных затрат, но из него проще извлекать ЗШО для дальнейшей переработки, а для организации пневматического сухого удаления золы с одного энергоблока Каширской ГРЭС мощностью 300 МВт нужны 40 дорогих насосов и клапанов. В РФ в основном используются системы гидравлического золоудаления.

Сухой золошлакоотвал обычно обустраивают на месте выработанного карьера или других малоценных земель. С поверхности участка снимается верхний слой плодородного грунта (если он имеется) и на его место кладут фильтрационную подушку из крупнозернистого и прочного материала (шлак или щебень). Для предотвращения пыления зола увлажняется до 15%. При послойной утрамбовке золы и закрытии ее грунтом образуется массив, практически непроницаемый для вод, что исключает возможность вымывания вредных компонентов. Эксплуатационные затраты на такое складирование золы на 40–50% выше, чем в случае влажного золоудаления, но капитальные вложения на сооружение сухого золошлакоотвала в 5–6 раз меньше. Золошлакоотвал для влажного золоудаления включает территорию намыва свежего материала и отстойный пруд — водоем, в котором осаждаются мелкие фракции золы, а верхний слой обеззоленной воды используется для нужд тепловых электростанций (ТЭС). Золошлакоотвалы классифицируются согласно рельефу, на котором они обустраиваются (пойменные, косогорные, овражные и др.) и ограничиваются дамбами. Все типы отвалов, кроме овражных и котлованных, делаются секционированными для более равномерного заполнения и разработки отвалов. Это также позволяет наращивать дамбы, увеличивая итоговую емкость золоотвала.

По расчетам, произведенным в советское время, сухое золоудаление существенно дороже влажного. Однако ЗШО с сухого золоотвала значительно проще пустить на переработку, чем с влажного. В настоящее время оценку затрат стоит проводить по конкретным ТЭС. Например, при выходе ЗШО до 100 тыс. т/год при расстоянии до отвала менее 1–2 км сухое золошлакоудаление и организация сухого золоотвала выгоднее, чем традиционное влажное золоудаление.

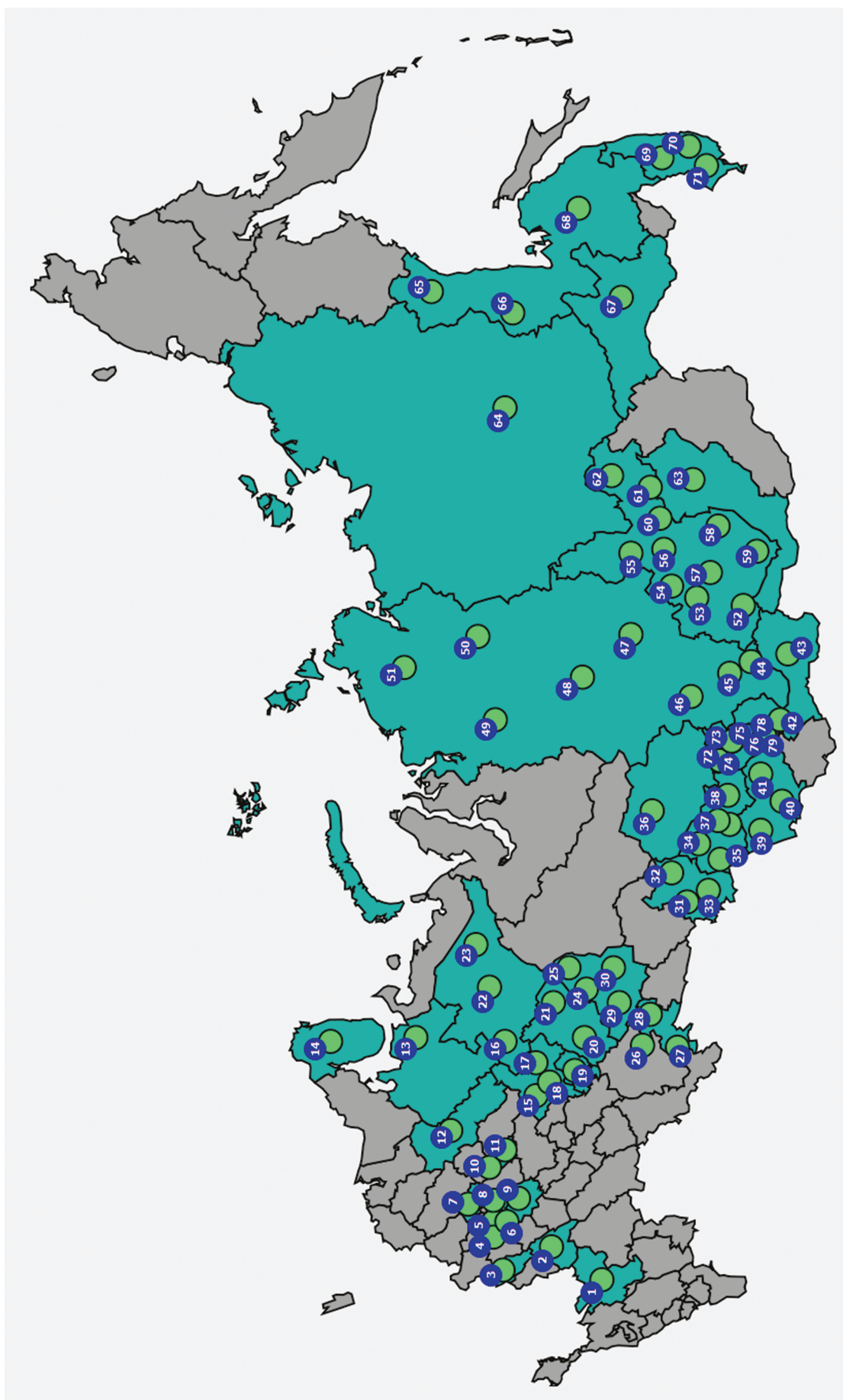


Рис. 15.3. Карта-схема расположения электростанций и золотоплавоквалов Российской Федерации

№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)
1	Новочеркасская ГРЭС, золотвал № 2	21	Закамская ТЭЦ-5	42	Абаканская ТЭЦ, золотвал № 2	62	Иркутская ТЭЦ-6
2	Воронежская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2	22	Воркутинская ТЭЦ-2	43	Кызылская ТЭЦ, золотвал № 1	63	Гусиноозерская ГРЭС
3	Курская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ СЗР	23	Интинская ТЭЦ	44	Красноярская ТЭЦ-1, Шумковский золотвал	64	Нерюнгринская ГРЭС
4	Новомосковская ГРЭС	24	Нижегородская ГРЭС	45	Красноярская ТЭЦ-2, золотвал № 1 и № 2	65	Хабаровская ТЭЦ-1, золотвал № 3
5	Черепетская ГРЭС, золотвал № 4	25	Рефтинская ГРЭС, золотвал № 2	46	Красноярская ТЭЦ-3, золотвал № 1	66	Хабаровская ТЭЦ-3, золотвал № 2
6	Алексинская ГРЭС	26	Троицкая ГРЭС, Бобровский золотвал (старый)	47	Минусинская ТЭЦ	67	Благовещенская ТЭЦ
7	Каширская ГРЭС	27	Южноуральская ГРЭС, золошлакоотвал № 2	48	Канская ТЭЦ, золотвал № 2	68	Комсомольская ТЭЦ-2
8	ТЭЦ-22	28	Аргаяшская ТЭЦ, золотвал № 1 и № 2	49	Назаровская ГРЭС, золотвал № 3	69	Приморская ГРЭС, золотвал № 2
9	Рязанская ГРЭС	29	Верхнетагильская ГРЭС, золотвал № 2	50	Красноярская ГРЭС-2	70	Артемовская ТЭЦ
10	Ивановская ТЭЦ-2	30	Серовская ГРЭС, золотвал № 3	51	Березовская ГРЭС	71	Владивостокская ТЭЦ-2
11	Ивановская ТЭЦ-3	31	Омская ТЭЦ-2	52	Ново-Иркутская ТЭЦ	72	Беловская ГРЭС, золотвал № 2
12	Череповецкая	32	Омская ТЭЦ-4	53	Ново-Иркутская ТЭЦ — Шелеховский филиал (ТЭЦ-5)	73	Томь-Усинская ГРЭС, золотвал № 2
13	Северодвинская ТЭЦ-1, золотвал № 1	33	Омская ТЭЦ-5	54	Иркутская ТЭЦ-9	74	Ново-Кемеровская ТЭЦ, золошлакоотвал № 2
14	Апатитская ТЭЦ	34	Новосибирская ТЭЦ-2	55	Иркутская ТЭЦ-9 (участок № 1)	75	Кемеровская ГРЭС, золошлакоотвал № 2
15	Кировская ТЭЦ-4	35	Новосибирская ТЭЦ-3	56	Иркутская ТЭЦ-10	76	Кузнецкая ТЭЦ
16	Воркутинская ТЭЦ-1	36	Томская ГРЭС-2 (старый и новый золоотвалы)	57	Иркутская ТЭЦ-11	78	Кемеровская ТЭЦ, золошлакоотвал № 2
17	Кировская ТЭЦ-3	37	Новосибирская ТЭЦ-4, золотвал № 2	58	Иркутская ТЭЦ-12	79	Южно-Кузбасская ГРЭС, золотвал № 2
18	Кировская ТЭЦ-5		Барабинская ТЭЦ	59	Ново-Зиминская ТЭЦ		
19	Ижевская ТЭЦ-2	38	Новосибирская ТЭЦ-5, золотвал № 2	60	Ново-Зиминская ТЭЦ — Зиминский участок (ТЭЦ-3)		
20	Чайковская ТЭЦ-18	39	Бийская ТЭЦ	61	Усть-Илимская ТЭЦ		

ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ ОТРАСЛИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Золошлаковые отходы состоят в основном из неорганических (минеральных) примесей угля. Большая часть этих примесей представлена оксидами алюминия и кремния, в частности, их различными сочетаниями (каолин, мусковит, алюмосиликаты и др.). Также присутствуют оксиды железа и кальция, в меньшей степени — оксиды магния и титана. В следовых количествах (иногда меньше грамма на тонну) содержатся, в зависимости от свойств сжигаемого угля, практически все элементы таблицы Менделеева: щелочные и щелочноземельные металлы, различные переходные металлы (в том числе ценные, редкие и редкоземельные) и некоторые количества неметаллов (например мышьяк, бор, сера). В разнообразии и неоднородности составов ЗШО и кроется одна из главных трудностей их переработки. Трудно грамотно выстроить процесс комплексной переработки ЗШО без их тщательного предварительного анализа. Расчет экономических показателей процесса с использованием ЗШО разных участков одного отвала может приводить к разным результатам. Тем не менее даже следовые количества ценных и редких металлов обычно оправдывают трудоемкие процессы их извлечения¹.

Зачастую комплексная переработка не представляет интереса, и для таких случаев существуют простые технологии подготовки ЗШО к использованию в строительстве, обычно заключающиеся в дожигании остаточного угля, дроблении, сушке и разделении на фракции по крупности частиц. После этого ЗШО можно либо отправить в процесс производства стройматериалов, либо непосредственно на строительство, например, для основания автомобильной дороги.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Зарождение технологий переработки золошлаковых отходов можно отнести к глубокой древности. Сходный по составу и свойствам вулканический пепел широко использовался в строительстве в Древнем Риме. Построенные в ту эпоху Пантеон, Колизей, а также многочисленные дороги и акведуки сохранились до наших дней, простояв уже более двух тысяч лет. Более того, термин «пуццолан» (пуццолановые свойства — это явление, при котором известь и некоторые алюмосиликаты реагируют в присутствии воды при обычных температурах с набором прочности) происходит от названия итальянского города Поццуоли, считающегося родиной технологии получения бетона с использованием вулканического пепла.

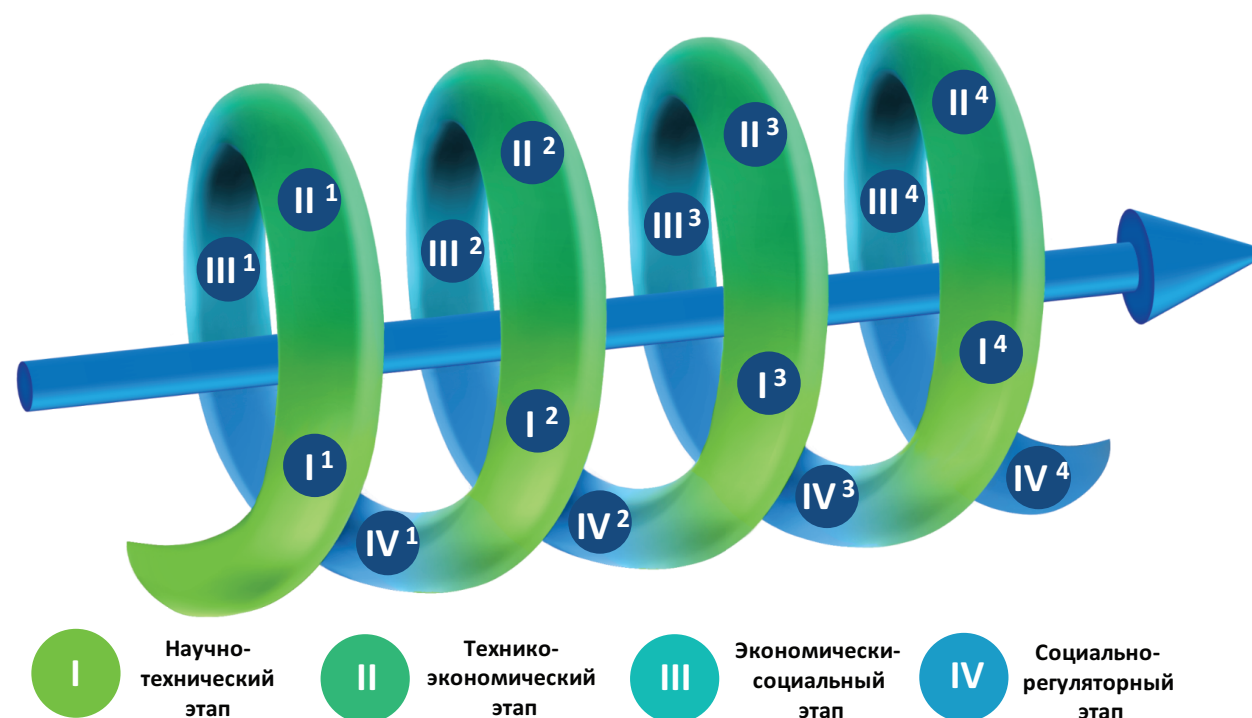
Первые попытки переработки ЗШО в современном их понимании не могли быть предприняты ранее 1882 г. — когда в Лондоне по проекту Томаса Эдисона была построена первая угольная ТЭС (Edison Electric Light Station). Имеются упоминания о том, что впервые ЗШО были применены в качестве добавки к цементу в 1914 г., хотя первое значимое научное исследование, относящееся к этому, было проведено в 1937 г.

Использование ЗШО в бетонах наблюдается в США в начале 1930-х гг. Первое документированное применение бетона с высоким содержанием золы уноса относится к 1942 г. — проведение ремонтных работ по заделыванию протечки дамбы Гувера. В период с 1948 по 1952 г. была построена дамба Hungry Horse, для чего было использовано почти 2,5 млн м³ бетона, 35% цемента в его составе было заменено на золу уноса (120 тыс. м³).

С тех пор происходило постепенное развитие теории и методов применения ЗШО в бетоне, цементе и других строительных материалах, и количество проектов, в которых использованы, казалось бы, бесполезные отходы, превышает сотни: от серийного выпуска кирпичей,

¹ Например, извлечение редкоземельных металлов из ЗШО теоретически способно дать толчок развитию высокотехнологичной отрасли и снизить зависимость РФ от импорта этих металлов.

которое наблюдается даже в бедных странах (Намибия) до строительства целых метрополисов (Вашингтон, США) и рекордных по высоте небоскребов (Бурдж-Халифа, Дубай²).



- I¹** — первые исследования по применению ЗШО (1910–1930)
- II¹** — первые значимые применения ЗШО ввиду технико-экономической целесообразности (при использовании ЗШО как компонента бетона при ремонте дамбы Гувера руководствовались тем, что это позволит сократить расход сырья) (1930–1950)
- III¹** — первое обобщение простых технологий в форме справочников и книг, распространение применения этих технологий (1950–1960)
- IV¹** — введение первичных регуляторных мер (НТД, рекомендации по применению ЗШО) (1960–1980)
- I²** — развитие аспектов простых технологий (высокопрочный бетон)
- II²** — переход к усовершенствованной технологии вследствие ее экономической эффективности;
- III²** — крупномасштабные и знаковые проекты с применением технологии (Бурдж-Халифа, Дубай)
- IV²** — регуляторные меры, устанавливающие обязательность применения этих технологий

(в 2015 г. муниципалитет Дубая постановил, что при строительстве всех новых зданий часть используемого портландцемента должна быть заменена на ЗШО)

Параллельно предыдущему витку:

- I³** — научные исследования комплексных технологий переработки ЗШО
- II³** — формирование научно-технической базы (патенты, лабораторные исследования, коммерческие предложения)
- III³** — реализация единичных проектов
- IV³** — формирование НТД и НПА

Прогноз:

- I⁴** — технико-экономическая оптимизация комплексных технологий посредством научных изысканий
- II⁴** — апробация этих технологий в единичных проектах
- III⁴** — систематизация опыта и новые проекты реализации
- IV⁴** — актуализация НТД и НПА

Рис. 15.4. Эволюция технологий отрасли переработки ЗШО

² В настоящее время ведется строительство еще более высокого небоскреба в городе Джидда (Саудовская Аравия), высота которого составит 1007 м, среди компонентов бетона имеется зола уноса (высокопрочный бетон с прочностью 85 МПа используется для строительства фундамента и нижней части здания).

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

ЗШО являются ценным вторичным ресурсом. На практике это означает, что ТЭС или золошлакоотвал при ТЭС может служить источником сырья для других отраслей.

Так, основной областью применения ЗШО является строительство. Некоторые применения (отсыпка земляного полотна автомобильной дороги или возведение насыпей) требуют минимальной подготовки, а засыпка траншей и пустот золошлаковыми наполнителями обычно означает необходимость хотя бы разделить ЗШО на фракции по крупности с удалением влаги.

ЗШО используются как сырье для производства строительных материалов. Наиболее распространены варианты производства кирпичей и бетона с добавками ЗШО, но можно также изготавливать различные вяжущие, цементные смеси, получать различные виды керамики. Отдельно стоит отметить использование ЗШО в составе высокопрочных бетонов, уже упомянутое выше — в этом случае ЗШО не имеет альтернатив по соотношению «цена–свойства».

Также необходимо подчеркнуть, что применение ЗШО в строительстве или производстве строительных материалов ведет к снижению выбросов диоксида углерода. Бетон, модифицированный с помощью ЗШО, так и вовсе способен поглощать диоксид углерода из воздуха. Специфические свойства бетона с добавкой ЗШО особенно полезны при использовании его в морской воде, так как ЗШО обеспечивает повышение устойчивости бетона к хлоридам и биологическому воздействию.

Применение ЗШО потенциально способно преобразовать отрасль строительства и производства стройматериалов. Уже в 2018 г. заявлялось, что для реализации нацпроектов не хватает природных ресурсов. Использование ЗШО в качестве их замены позволяет решить проблему нехватки материалов и одновременно снизить социальное напряжение.

Часто при алюминиевых заводах, требующих большого количества энергии ввиду особенностей процесса получения алюминия (см. статью о технологиях производства алюминия), имеются собственные ТЭС. ЗШО являются потенциальным источником алюминия — в зависимости от типа угля содержание оксида алюминия Al_2O_3 варьируется в пределах от 10 до 40%. Даже в случае присутствия всего 20% оксида алюминия общий эффект от выделения алюминия из ЗШО электролизом считается положительным, а стоимость получаемого алюминия снижается в 2–4 раза по сравнению с традиционным способом.

Но на этом потенциал реализации ЗШО при алюминиевом заводе не ограничивается. Существуют технологии, позволяющие провести совместную переработку ЗШО с отходами производства глинозема — красными шламами. Смесь красных шламов и ЗШО можно применить для получения целого ряда продукции: стекло- и пенокерамики, кирпичей и тротуарной плитки, цеолитов.

Все вышеперечисленные виды переработки ЗШО довольно просты в исполнении. Как только выстраивается такая система обращения с ЗШО, стоит задуматься о комплексных методах переработки. Дело в том, что ЗШО, как упомянуто выше, может содержать практически всю таблицу Менделеева. В различных условиях интерес могут вызывать самые разные элементы: например, в США задались вопросом извлечения урана из ЗШО, а в ЗШО Дальнего Востока отмечено наличие золота, серебра и металлов платиновой группы. Определенный интерес представляют редкоземельные элементы (РЗЭ). Привлекательность извлечения РЗЭ из ЗШО связана с тем, что концентрации РЗЭ в практически всех источниках сырья довольно малы, и технологически процесс извлечения РЗЭ из ЗШО не сильно отличается от традиционных способов добычи РЗЭ. Необходимо отметить, что остаток после извлечения также требует переработки, например по вышеописанным сценариям.

Определенный потенциал представляет и идея разделения ЗШО на основные фракции: угольную, магнитную (железосодержащую) и алюмосиликатную (содержит оксиды алюминия и кремния). Продукты разделения можно пустить в дальнейшую переработку: угольную фракцию вернуть на ТЭС, алюмосиликатную фракцию разделить на глинозем (глина)

и кремнезем (песок), а железосодержащую фракцию отправить на металлургическую переработку с возможностью получения целого ряда продукции (ферросплавы, чугун, сталь).

ЗШО используется в аграрной сфере в качестве удобрения, но такое использование требует тщательного изучения состава ЗШО. Это связано с тем, что в ЗШО содержатся тяжелые элементы, попадание которых в почву опасно: свинец, никель, марганец, цинк, мышьяк, ртуть, хром и т. д. Из почвы эти элементы выщелачиваются в грунтовые воды, что способно отравить источник питьевой воды на местности. Также отдельную опасность представляет присутствие в ЗШО радиоактивных элементов и органических загрязнений. Тем не менее использование ЗШО в качестве удобрения имеет много преимуществ: повышается содержание питательных элементов в почве, улучшается структура почвы и контролируется pH почвы.

Распространено применение ЗШО для засыпки отработанных шахт и карьеров. Аналогично приведенному выше примеру применение ЗШО может привести к загрязнению прилегающих участков почвы и грунтовых вод тяжелыми элементами, и для таких случаев предпочтительно использовать старые ЗШО из золошлакоотвалов, из которых с высокой долей вероятности уже были вымыты эти элементы. Также для подобных применений характерно потребление больших объемов ЗШО, и, как было показано выше, это довольно ценный вторичный ресурс — с одним миллионом тонн, сбрасываемым в шахту, теряется, например, около 100 тысяч тонн алюминия (при содержании в ЗШО 20% оксида алюминия).

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Технология переработки ЗШО — это совокупность методов (операций) воздействия на ЗШО с целью повышения их качества как вторсырья (стабилизация состава, крупности, извлечение ценных и удаление нежелательных компонентов) для последующей переработки и утилизации (в соответствии с требованиями ресурсосбережения, нормативной и технической документации, табл. 15.1).

Направления переработки и утилизации ЗШО многообразны.

Наиболее перспективное направление масштабного использования топливных отходов как термически обработанного и несгораемого продукта (содержит реакционноспособные оксиды кальция, кремния и алюминия, обладает низкой теплопроводностью) — использование в строительной индустрии (практикуется с 30-х гг. XX в.) и в дорожном строительстве:

- заполнители для тяжелых и легких бетонов;
- материал для изготовления силикатного кирпича;
- материал для приготовления строительных растворов;
- кремнеземистый компонент для ячеистых бетонов;
- вяжущие для ячеистых бетонов;
- минеральный порошок в асфальтобетонные смеси;
- мелкий заполнитель для конструкционно-теплоизоляционного бетона (лимитируется содержание недожога, SO₃, крупность зерен, удельная поверхность);
- использование для производства цемента (в соответствии с требованиями к глинистому компоненту шихты);
- производство искусственных пористых заполнителей (аглопоритовый гравий и щебень, глиноземный керамзит);
- использование в производстве стеклокристаллических материалов строительного и технического назначения: производство шлакоситаллов, стеклошлаковых облицовочных плиток, коррозионно-стойких стеклошлакоэмалевых покрытий металлов (толщина покрытий 300–500 мкм);
- изготовление пеностекла (обладает огнестойкостью и низкой теплопроводностью).

Повышение качества ЗШО как вторсырья требует применения методов обогащения. Доказана (табл. 15.2) технологическая возможность (и экономическая целесообразность)

Таблица 15.1. Использование ЗШО для производства бетонов, силикатных изделий, строительных растворов, асфальтобетонных смесей

Вид сырья, направление использования	Нормативный документ	Основные показатели качества получаемой продукции
Золошлаковая смесь ТЭС Заполнитель для тяжелых и легких бетонов, материал для изготовления силикатного кирпича	ГОСТ 25592-91, ГОСТ 379-95, ГОСТ 25592-91	Характеризуется зерновым составом, насыпной плотностью, химическим составом, влажностью, устойчивостью структуры зерен шлака; лимитируется: содержание и размер зерен шлака, зерновой состав, удельная поверхность, влажность, насыпная плотность, химический состав, засоряющие примеси
Шлаки ТЭС Заполнители для бетонов (щебень и песок из шлаков), материал для изготовления силикатного кирпича (песок шлаковый), материал для приготовления строительных растворов (щебень и песок шлаковые)	ГОСТ 26644-85, ГОСТ 379-95, ГОСТ 26644-85, ГОСТ 28013-89, ГОСТ 26644-85	Шлаки разделяют по виду сжигаемых углей и плотности; щебень и песок из шлака характеризуются зерновым составом; ограничиваются: насыпная плотность, химический состав, устойчивость структуры, морозостойкость, наличие посторонних примесей
Зола-унос ТЭС сухого отбора Компонент для изготовления бетонов и строительных растворов, материал для изготовления силикатного кирпича	ГОСТ 25818-91, ГОСТ 379-95, ГОСТ 25818-91	Применяют антрацитовые, каменно-угольные, буроугольные кислые золы (содержание СаО до 10%) и буроугольные основные золы (содержание СаО свыше 10%); ограничиваются: влажность, удельная эффективная активность естественных радионуклидов; золы должны обеспечивать в смеси с цементом равномерность изменения объема
Зола ТЭС гидроудаления Компонент для изготовления тяжелых и легких бетонов и строительных растворов	ГОСТ 28013-89, ТУ 34-31-16502	Содержание зерен шлака не более 10%, размер зерен шлака не более 5 мм, влажность не более 40%, насыпная плотность в сухом состоянии не более 1300 кг/м ³ , содержание SO ₃ не более 1%, СаО+MgO в золе не более 10%, в шлаке не более 1%
Зола-унос ТЭС Кремнеземистый компонент для ячеистых бетонов	ГОСТ 25485-89, ОСТ 21-60-84	SiO ₂ не менее 45%, СаО не более 10%, R ₂ O не более 3%, SO ₃ не более 3%; обычно пригодны золы каменных углей и антрацита
Зола ТЭС (высокоосновная) Вяжущие для ячеистых бетонов	ГОСТ 25485-89, ОСТ 21-60-84	СаО не менее 40%, в т. ч. свободной СаО не менее 16%, SO ₃ не более 6%, R ₂ O не более 3,5%; обычно пригодны золы горючих сланцев и бурых углей
Зола-унос, золошлаковые смеси ТЭС Минеральный порошок в асфальтобетонные смеси	ГОСТ 9128-84	Лимитируются: зерновой состав, пористость, коэффициент водостойкости смеси порошка с битумом, показатель битумности, содержание водорастворимых соединений, свободной СаО, влажность
Золошлаковые отходы ТЭС Строительство автодорог, оснований аэродромов, укрепление обочин	ГОСТ 8267-93, ГОСТ 25607-94	Щебень регламентируется: по зерновому составу, прочности, морозостойкости, содержанию зерен пластинчатой и игольчатой формы, содержанию пылевидных и глинистых частиц, глины в комках и содержанию дробленых зерен в щебне из гравия, устойчивости структуры против распада

разделения ЗШО методами обогащения на магнитную фракцию (выход 5–10% по массе, содержание железа 35–50%, германия 10 г/т, крупность 80% –0,1+0,05 мм), легкую микросферсодержащую фракцию (выход 2%, плотность 0,3–0,5 г/см³) и немагнитную фракцию (выход 90%, крупность 70% –0,05 мм), которая является исходным сырьем для использования в стройиндустрии (и других областях техники).

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

Извлечение ϵ компонента в продукт сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе компонента в исходном.

Содержание β компонента в продукте сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе продукта сепарации.

Выход γ продукта сепарации — отношение массы продукта сепарации к массе исходного материала.

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

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

Например.

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

В 1 т ЗШО 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:

$$\epsilon = \frac{20 \text{ кг}}{50 \text{ кг}} \times 100 \% = 40 \% ; \beta = \frac{20 \text{ кг}}{25 \text{ кг}} \times 100 \% = 80 \% ; \gamma = \frac{25 \text{ кг}}{1000 \text{ кг}} \times 100 \% = 2,5 \%$$

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 (в виде магнитной фракции) свидетельствуют о том, что одностадийная магнитная сепарация недостаточна, требуется по крайней мере еще одна стадия, установка еще одного сепаратора по ходу процесса.

Содержание: 80% — высокое; по ГОСТу содержание железа в магнитной фракции — не менее 97% (следовательно, требуется перечистка).

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

Выбор лучшей технологии среди нескольких, решающих однотипные задачи, определяется аналитической оценкой технологических показателей (в первую очередь сравниваются показатели извлечения).

Выбор технологии определяется составом и свойствами исходного сырья, а также экологическими и экономическими параметрами. Монотехнология приемлема для переработки вторсырья однородного состава. Поскольку ЗШО — многокомпонентная система, важнейший показатель — комплексность использования сырья.

Под комплексной следует понимать такую переработку (использование) вторсырья, которая обеспечивает максимально полное его вовлечение в хозяйственный оборот и материально-энергетическую утилизацию как техногенного сырья.

Таблица 15.2. Многоотоннажные источники вторичного сырья — принципы технологического подхода

Вид источника вторсырья, краткая характеристика и запасы	Основные направления переработки и утилизации	Принципиальные технологии (технологические операции)	Основное оборудование
Золшлаковые отходы теплотехники (ЗШО) образуются при сжигании угля на ТЭС.	Получение цементного клинкера и высококачественного цемента	Оптимизация состава ЗШО (удаление железа), смешивание компонентов (известняк, глина, ЗШО), обжиг (1400°С), охлаждение цементного клинкера и его выдерживание на складе с последующим измельчением (с добавкой гипса и ЗШО) и образованием цемента	Барабанные печи (обжиг), шламовые бассейны (операция смешивания), оборудование для измельчения
Среди ЗШО различают золунос (продукт газоочистки), шлак и золошлаковую механическую смесь.	Получение прочного силикатного кирпича (сырье — высококальциевые золы, содержащие недожога более 15%)	Удаление из ЗШО недожога: двухступенчатое сжигание угля с гранулированием продукта первой ступени; термообработка гранул золошлаковой смеси при 900°С (выжигание угольных частиц); получение силикатного кирпича	Тарельчатый гранулятор, сушильный конвейер, печь кипящего слоя
Зола-унос — тонкодисперсный материал (выход класса —50 мкм ~60%, класса +90 мкм ~10%).	Обогащение ЗШО с выделением недожога и утилизацией продуктов обогащения	Грохочение, гидроциклонирование и гидрокласификация, фильтрование песков гидроциклонирования (обезвоженный уголь — на сжигание); пески гидрокласификатора после обезвоживания используются в гражданском строительстве	Вакуум-фильтр, гидрокласификатор
Основные компоненты ЗШО SiO_2 и Al_2O_3 ; специфический продукт — микросферы (поплавки тонкостенные сферические образования — с гладкой и перфорированной поверхностью); в виде микросфер присутствуют редкие и редкоземельные металлы.	Обогащение ЗШО с выделением магнитной фракции и недожога	Электродинамическая сепарация (извлечение черных металлов) и флотация (извлечение недожога). Уголь направляется на сжигание, хвосты флотации используются в производстве стройматериалов.	Электродинамический сепаратор, флотомашин
ЗШО содержат до 25% недожога; допускается содержание недожога не более 5%.	Извлечение золота из ЗШО (содержание золота 80 мг/т)	Гидроциклонирование (обезвоживание), грохочение, обогащение в центробежном поле класса — 6 мм (обогажительная чаша, имеет футеровку с рифлями)	Гидроциклон, дуговой грохот, центробежный сепаратор
В отвалах накоплено около 2 млрд т ЗШО, ежегодно образуется ~20 млн т.	Комплексное обогащение ЗШО с получением: – алюмосиликатов (для производства стройматериалов и использование в качестве вяжущих); – железосодержащих концентратов (утяжелитель суспензии); – углерода (недожог)	Грохочение, дробление, гидроциклонирование, винтовая сепарация, гидрокласификация, сгущение, электродинамическая сепарация	Производство в РФ: валковая дробилка, электродинамический сепаратор, винтовой сепаратор. Производство в Германии: виброобезвоживатель, гидрокласификатор, сгуститель
Уровень утилизации ЗШО в РФ ~10% (для примера: в Финляндии 90%).	Комплексное обогащение ЗШО с извлечением микросфер, недожога, РЗЭ, магнитной фракции и алюмосиликатного концентрата	Грохочение, отстаивание, классификация по крупности, магнитная сепарация, флотация	—
Осложняющий фактор масштабной утилизации ЗШО — нестабильный состав			

Для достижения максимальной эффективности (минимизации затрат и экологического риска) требуется, как правило, реализация комбинационных технологических решений (на базе объединения разных технологий); к комплексному следует также отнести использование одних отходов для обезвреживания и эффективной переработки других.

Комплексной переработке целесообразно подвергать техногенное сырье сложного вещественного состава (например, ЗШО), представляющего собой гетерогенную смесь органоминеральных компонентов, отличающихся крупностью, технологическими свойствами, степенью возможного вредного воздействия на окружающую среду и влияющие на показатели качества продуктов, получаемых при переработке ЗШО.

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

В идеале (при соответствующем составе техногенного сырья) сепарация ЗШО как подготовительная операция в технологиях их комплексной переработки должна обеспечить извлечение из потока ЗШО важнейших ценных компонентов:

- глинозем Al_2O_3 ;
- соли — сульфат алюминия и хлорид алюминия (пользуются спросом в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности);
- железо (вредная примесь в технологии цемента);
- недожог (несгоревший уголь, содержание лимитируется ГОСТ);
- микросферы (на основе их использования прочность легкого бетона повышается в три раза, увеличивается срок службы бурового оборудования);
- металлы (редкоземельные, благородные и др.);
- хвосты сортировки — обогащенная фракция, готовая к применению.

Показатель комплексности использования ЗШО — число извлеченных компонентов и их извлечение в кондиционные продукты.

Рациональная комплексная переработка ЗШО (рис. 15.5–15.16) обеспечивает извлечение и получение ресурсноценных компонентов и материалов и соблюдение действующих норм утилизации вторсырья.

Использование необогащенных ЗШО приемлемо в технологиях захоронения ЗШО (пересыпной материал), в дорожном строительстве, при рекультивации территорий, при ликвидации возгораний гидролизного лигнина на объектах их складирования.

Упрощенная блок-схема оптимизации состава ЗШО перед их переработкой и утилизацией (решение задач ресурсосбережения и экологической безопасности) представлена на рис. 15.17.

Общая степень утилизации ЗШО (выход вторсырья) — это количество ресурсов, выделенных для вторичного использования, выраженное в процентах от общего количества ЗШО, вовлеченных в переработку.

Продукты обогащения имеют более высокий спрос, чем исходные ЗШО.

При использовании обезжелезненной (немагнитной) фракции ЗШО потребление цемента снижается на 30% (данные Кузбасского государственного технического университета и Института теплофизики СО РАН). Использование ЗШО в производстве цемента без удаления железосодержащих соединений приводит к снижению механических и технологических показателей цемента, к увеличению времени схватывания.

Другая нежелательная примесь в ЗШО — недожог. Используемые разные технологии удаления из ЗШО недожога (флотация, гравитация и др.) сравниваются по технологическим показателям: выход угольного концентрата (обычно ~20%) и содержание в нем углерода (обычно 70–80%); содержание угля в хвостах — не более 5%. Выбирается технология с более высокими показателями.

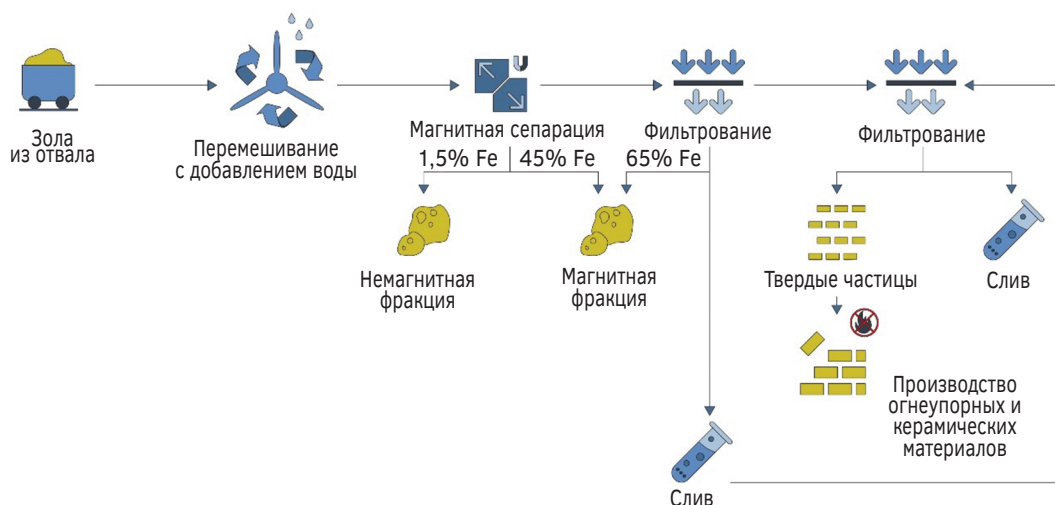


Рис. 15.5. Схема процесса полупромышленной установки обогащения золошлаковых отходов с извлечением магнитной фракции (Дальневосточный регион)



Рис. 15.6. Технологическая схема процесса опытно-промышленной установки обогащения золошлаковых отходов ТЭЦ-22 (Москва) с выделением недожога

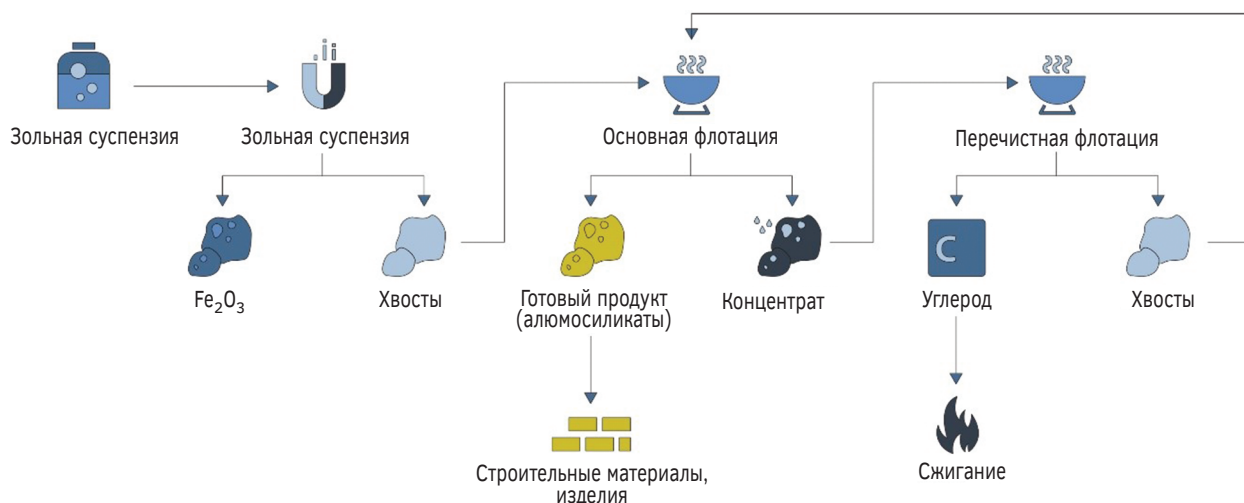


Рис. 15.7. Технологическая схема обогащения золы с выделением магнитного концентрата и недожога



Рис. 15.8. Технологическая схема извлечения золота из ЗШО



Рис. 15.9. Технологическая схема обогащения ЗШО с выделением магнитной фракции, алюмосиликатного концентрата и недожога

Для сравнения технологий утилизации обогащенных ЗШО в стройиндустрии и дорожном строительстве (производство бетона, цемента, вяжущих, цементного клинкера и др.) изучаются строительно-технологические свойства новой продукции: прочностные характеристики, нормализуемая влажность, сыпучесть, неслеживаемость и др.³

³ **Бетон** — один из важнейших строительных материалов, представляет собой искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердения уплотненной смеси вяжущего вещества, воды, заполнителей и в некоторых случаях добавок. Основной показатель 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 образует пластичную массу, приобретающую затем камневидное состояние.

Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, 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.

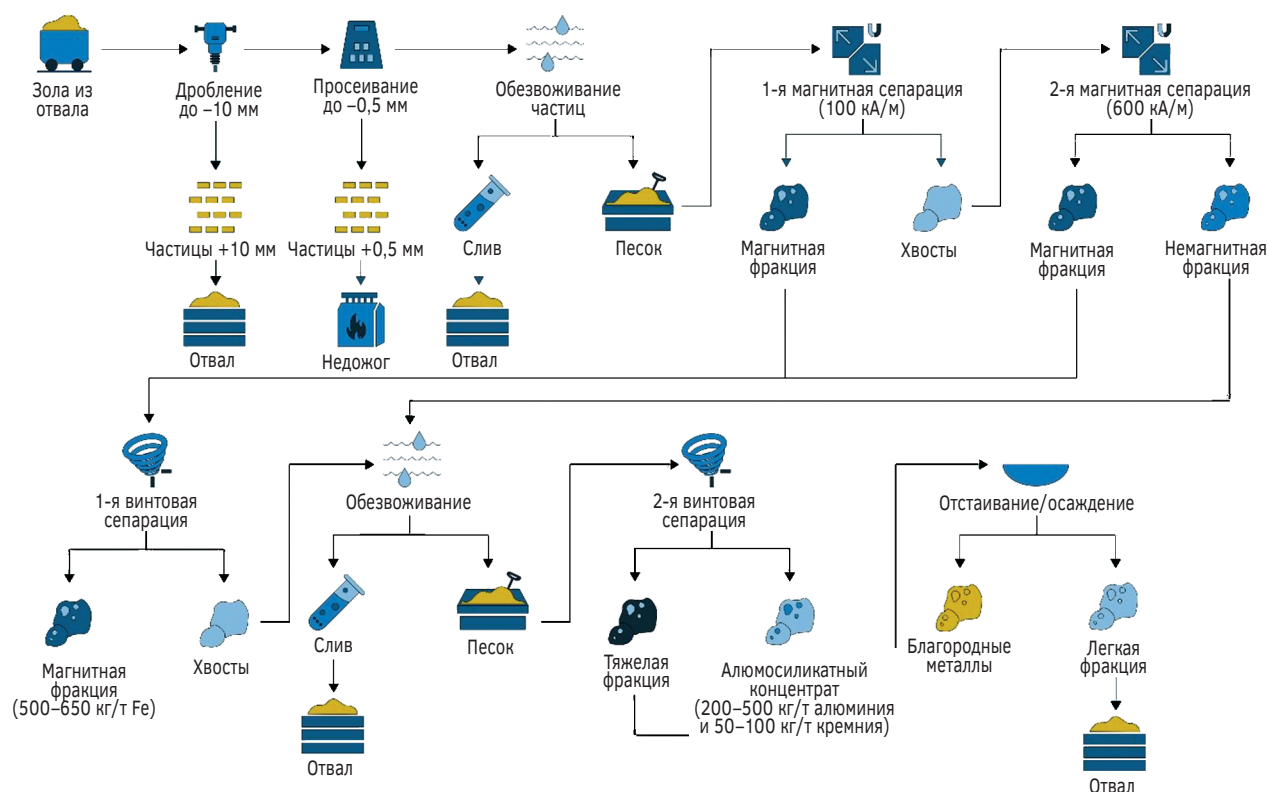


Рис. 15.10. Технологическая схема комплексного обогащения ЗШО⁴ (выделение недожога, магнитной фракции, алумосиликатного концентрата и благородных металлов)

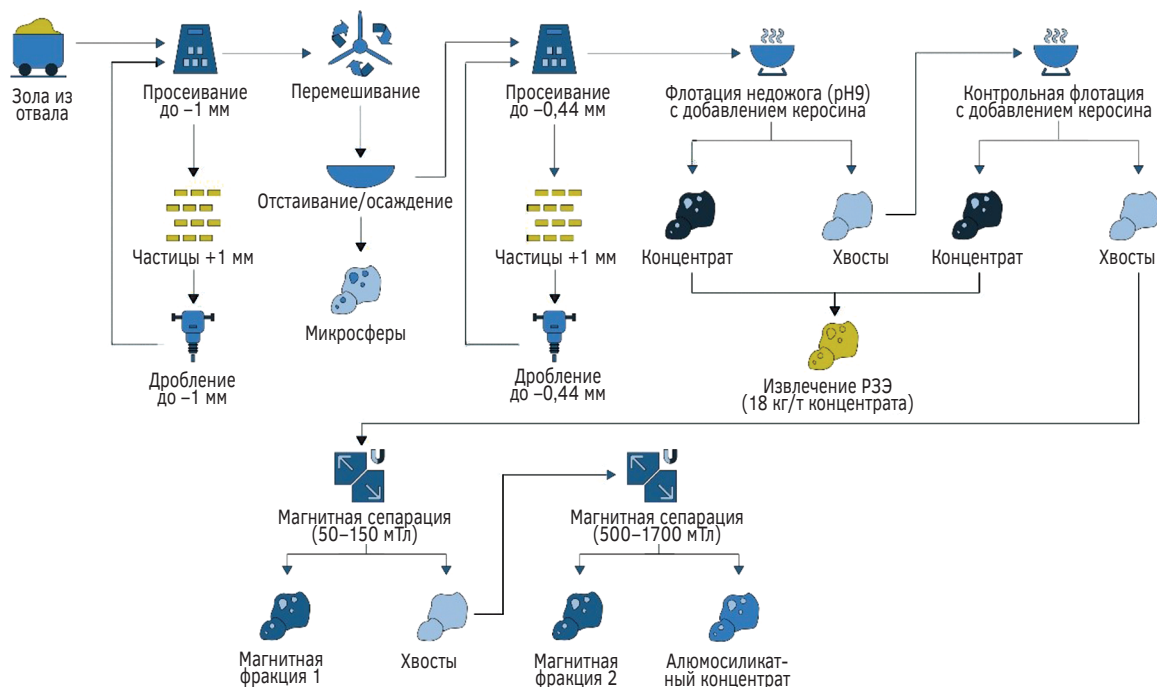


Рис. 15.11. Технологическая схема полупромышленных испытаний обогащения ЗШО с извлечением ценных компонентов (микроcферы, магнитная фракция, алумосиликатный концентрат, редкоземельные элементы совместно с недожогом)

⁴ Железосодержащий и алумосиликатный концентраты содержат по 4 кг/т титана.

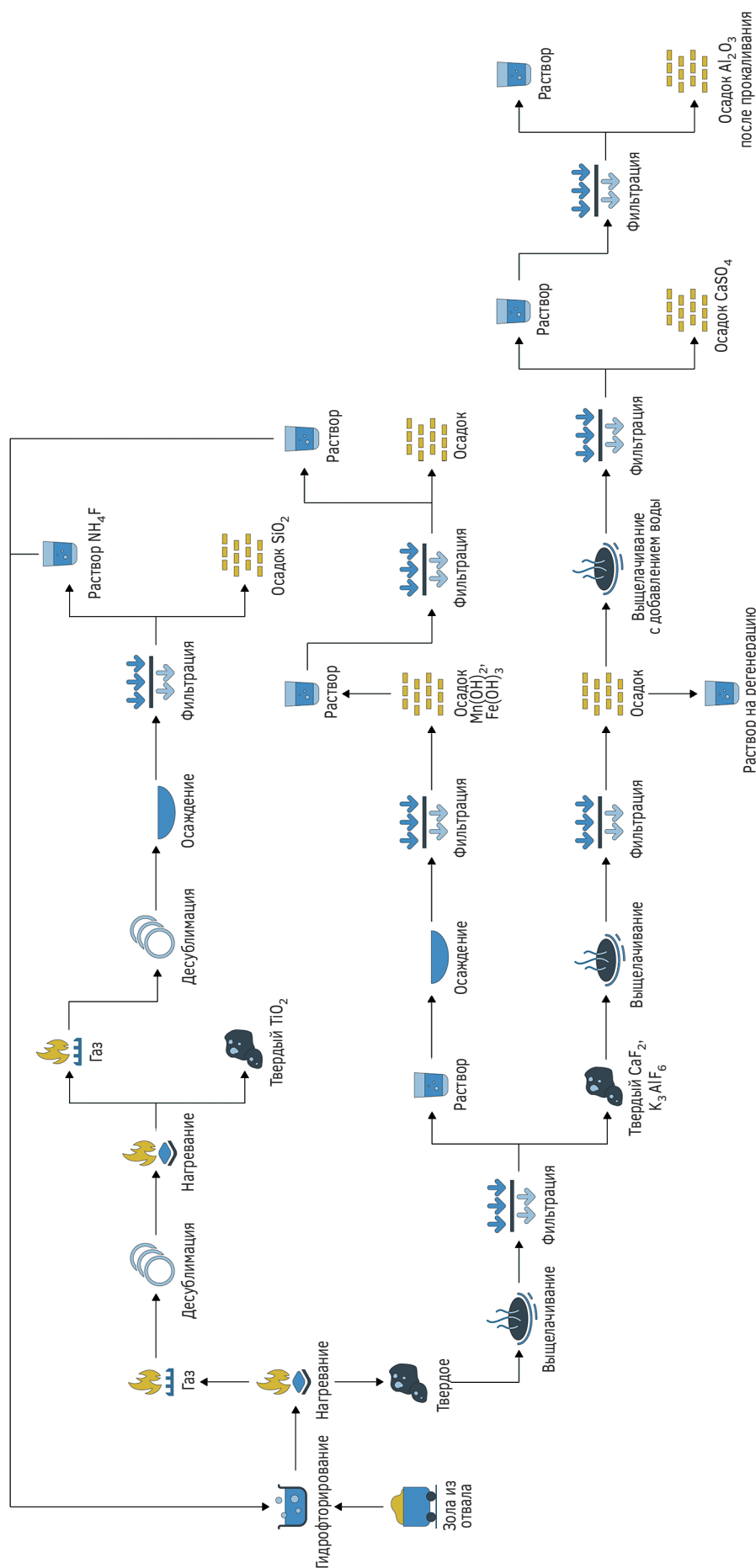


Рис. 15.12. Технологическая схема химической переработки ЗШО (выделение диоксидов титана, кремния и алюминия, сульфата кальция)

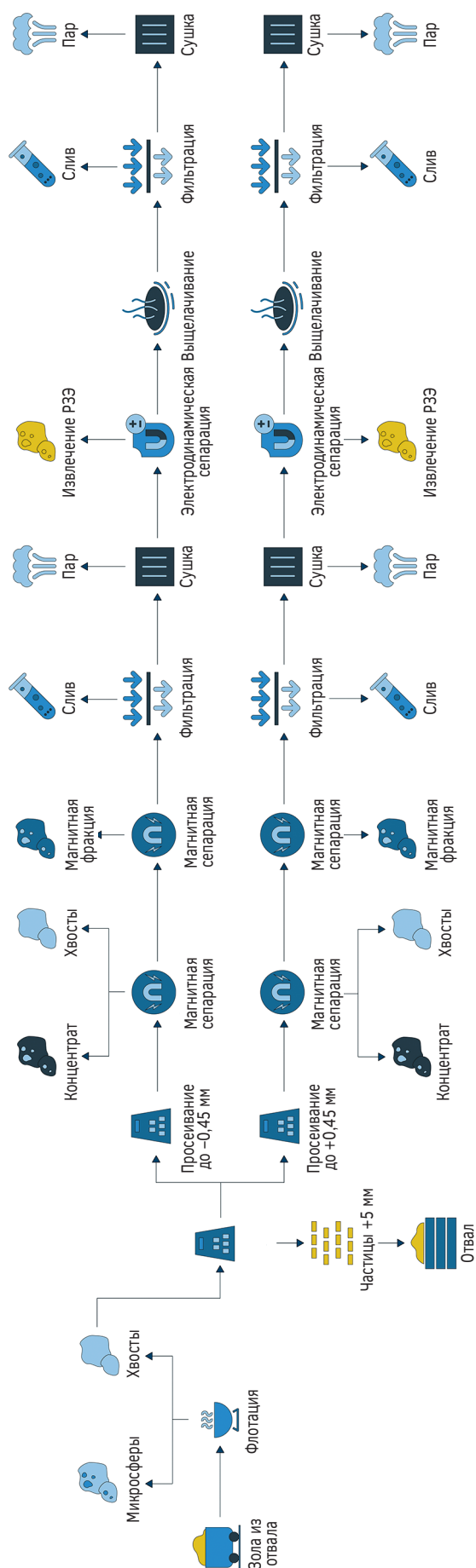


Рис. 15.13. Технологическая схема комплексной переработки ЗШО (извлечение микросфер, магнитной фракции, получение концентрата редких и редкоземельных элементов)

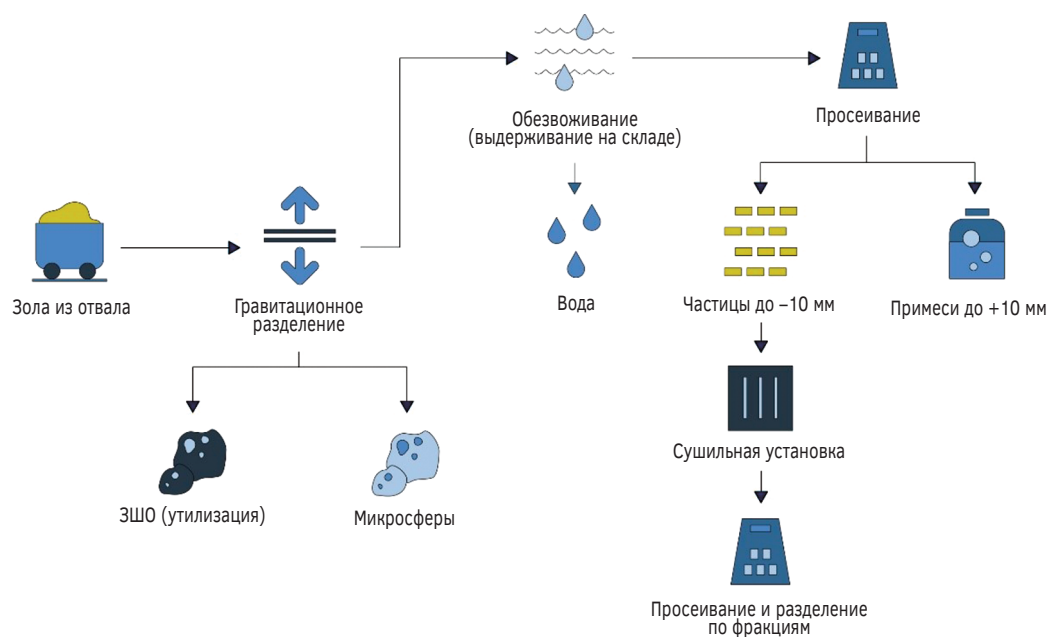


Рис. 15.14. Технологическая схема извлечения из ЗШО микрофер

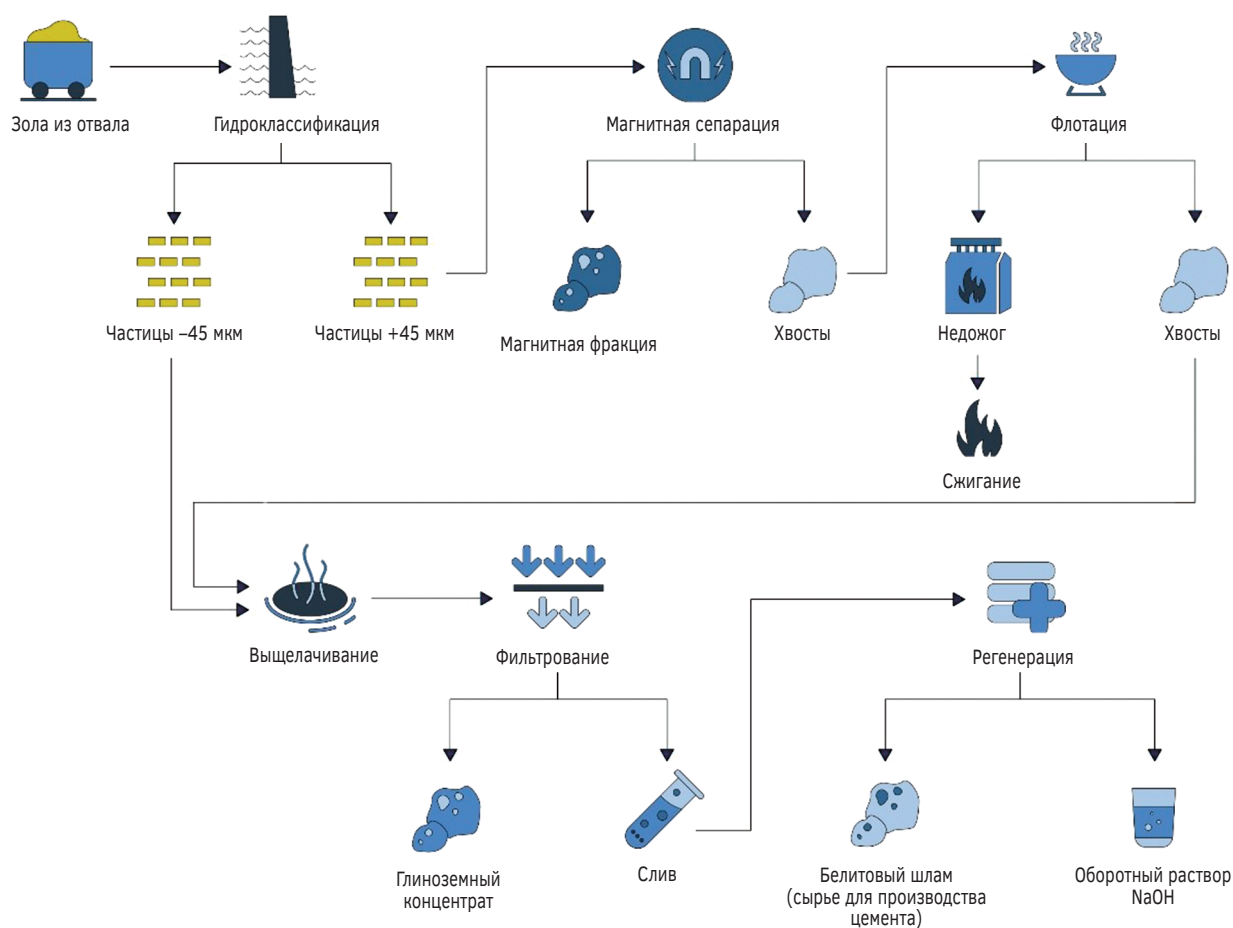


Рис. 15.15. Технологическая схема переработки ЗШО с извлечением недожога, глинозема, белитового шлама и магнитной фракции

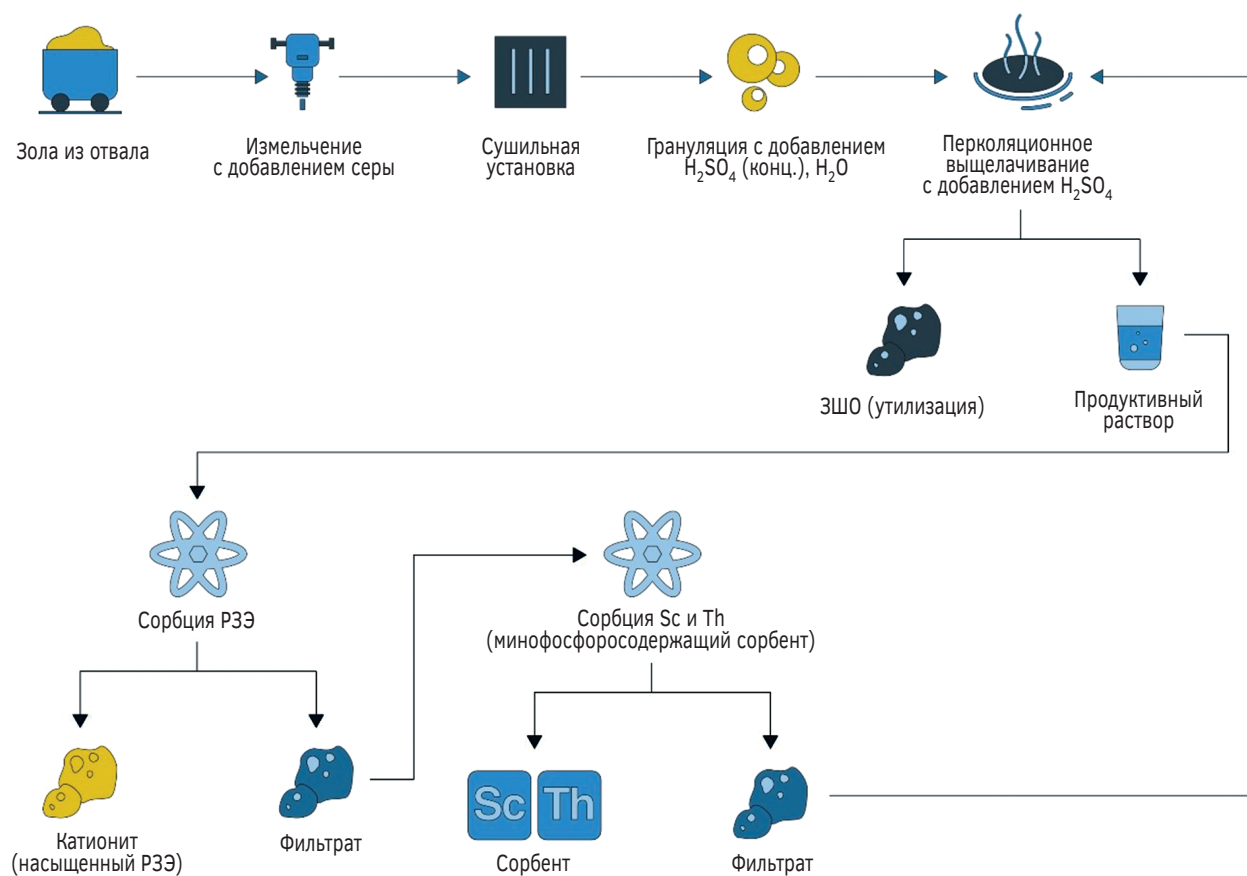


Рис. 15.16. Технологическая схема переработки ЗШО с извлечением редкоземельных металлов и скандия⁵ (непрерывный бесфильтрационный процесс)

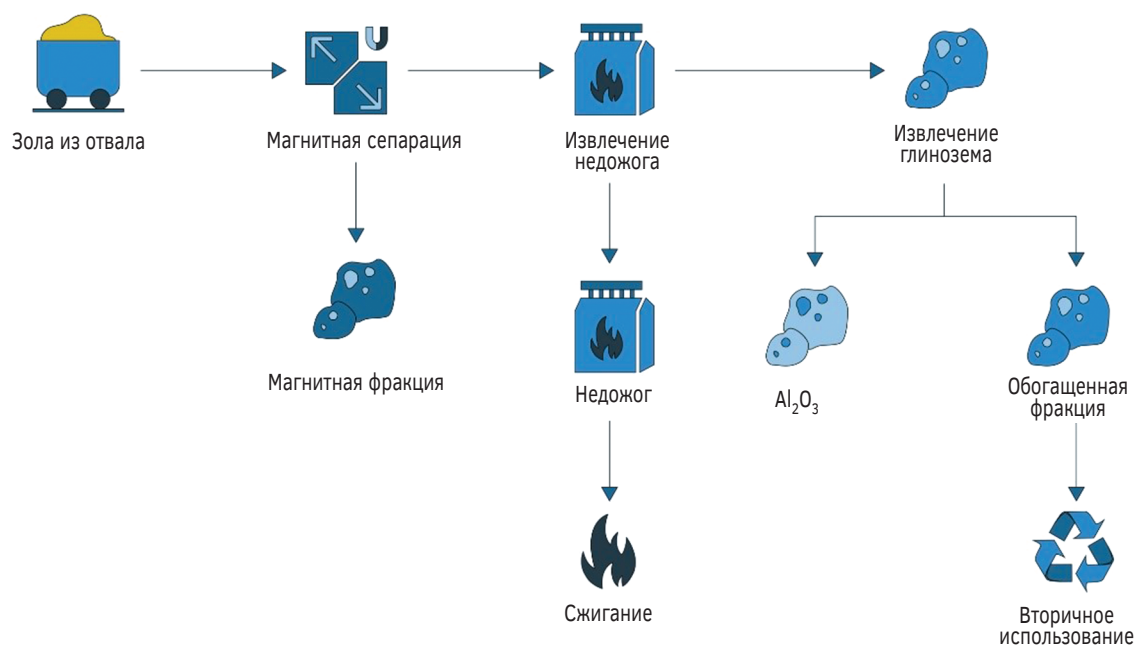


Рис. 15.17. Рекомендуемая упрощенная блок-схема обогащения ЗШО (подготовка к переработке и утилизации)

⁵ ЗШО после извлечения РЗЭ и скандия рекомендуется использовать в дорожном строительстве в качестве самостоятельного медленноотвердеющего вяжущего или гидравлической добавки к цементу.

Возможно использование ЗШО для очистки слабозагрязненных сточных вод (зола уноса обладает адсорбционными свойствами). Качество очистки оценивается по изменению состава сточных вод — с точки зрения снижения содержания тех или иных загрязняющих веществ.

Возможно также использование ЗШО в производстве гранулированного удобрения (повышает плодородие кислых почв). При этом известкование почвы с помощью мелиоранта, полученного из отходов, можно рассматривать как природоохранную и ресурсосберегающую технологию, поскольку при ее применении снижается расход азотных и фосфорных удобрений.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ОТРАСЛИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Развитие технологий переработки ЗШО может пойти по двум основным сценариям:

- упор на простые технологии переработки (стройматериалы, удобрения);
- упор на комплексные технологии переработки с выделением ценных компонентов.

Эти сценарии не являются взаимоисключающими, более того, они дополняют друг друга — в некоторых технологиях после выделения ценных компонентов из ЗШО остаток можно направить на технологически простую переработку в стройматериалы. Уже сейчас существуют комплексные безотходные технологии переработки ЗШО, однако пока не наблюдается их реализация.

Развитие технологий переработки ЗШО угольной энергетики может дать толчок развитию переработки ЗШО, получаемых от сжигания других материалов. В первую очередь, учитывая тенденции развития сектора переработки твердых коммунальных отходов, речь идет о ЗШО мусоросжигательных заводов (МСЖ). В процессе сжигания мусора вредные вещества или уносятся с дымовыми газами, или концентрируются в несгоревшем остатке. Зола МСЖ во многих случаях намного опаснее золы угольных электростанций и требует еще более сложных и надежных технологий переработки. Учитывая трудности, с которыми сталкивается отрасль переработки ЗШО в вопросе развития комплексных технологий, можно с уверенностью сказать, что в разработке комплексных технологий переработки ЗШО МСЖ возникнет еще больше проблем. Тем не менее накопленный опыт позволит как минимум попытаться адаптировать существующие технологии для других видов ЗШО.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Делицын, Л. М. Возможные технологии утилизации золы / Л. М. Делицын, Ю. В. Рябов, А. С. Власов // Энергосбережение. — 2014. — № 2. — С. 60–65.
2. Федорова, Н. В. Оценка экономической эффективности получения алюминия путем электролиза расплава угольного шлака [электронный ресурс] / Н. В. Федорова, Ю. Н. Рогатина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2005. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti-polucheniya-alyuminiya-putem-elektroliza-rasplava-ugolnogo-shlaka> (дата обращения: 01.07.2019).
3. Целиковский, Ю. К. Экологические и экономические аспекты утилизации золошлаков ТЭС / Ю. К. Целиковский // Энергия: экономика, техника, экология. — 2006. — № 4. — С. 27–34.
4. Эмдин, С. В. Система полной утилизации золошлаковых материалов / С. В. Эмдин, В. В. Жабо, Ю. К. Целиковский // Экология производства (Энергетика). — 2006. — № 1 (2). — С. 13–15.
5. Bourne, Jr. Coal's other dark side: Toxic ash that can poison water and people / Jr. Bourne, K. Joel // National Geographic [web site]. — URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/02/coal-other-dark-side-toxic-ash/> (accessed: 14.10.19).
6. Chen, X. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent / X. Chen, A. Lu, G. Qu // Ceramics International. — 2013. — Vol. 39, No. 2. — P. 1923–1929.
7. Davis, Raymond E. Properties of cements and concretes containing fly ash / R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly, H. E. Davis // ACI Journal, Proceedings. — 1937. — Vol. 33 (5). — P. 577–612.

8. Dubai buildings must use green concrete [electronic resource] // Kitco News. — URL: <https://www.kitco.com/news/2015-03-29/Dubai-buildings-must-use-green-concrete.html> (accessed: 31.05.2019).
9. History // EcoSmart Concrete [website]. — URL: http://ecosmartconcrete.com/?page_id=250 (accessed: 31.05.2019).
10. Key World Energy Statistics 2017 (PDF) [electronic resource]. — URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/30.IEA\(2017\)](http://www.iea.org/publications/freepublications/30.IEA(2017)).
11. Kingdom Tower report by Gaurav Jadhav [electronic resource] // Academia.edu. — URL: https://www.academia.edu/24071922/Kingdom_Tower_report (accessed: 31.05.2019).
12. Kohubu, M. Fly ash and fly ash cement. Proceedings / M. Kohubu // Fifth international symposium on the chemistry of cement. — Tokyo : Cement Association of Japan, 1969. — Part IV. — P. 75–105.
13. Kumar, A. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization / A. Kumar, S. Kumar // Construction and building Materials. — 2013. — Vol. 38. — P. 865–871.
14. Zhang, M. Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure, and chemical composition of red mud-fly ash based geopolymers / M. Zhang, T. El-Korchi, G. Zhang, J. Liang, M. Tao // Fuel. — 2014. — Vol. 134. — P. 315–325.

