

**НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ.
РЕЦИКЛИНГ И УТИЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ.
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦБП И ЛЕСОПЕРЕРАБОТКЕ**

УДК 504.064.4

**РЕЦИКЛИНГ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ –
ВАЖНЕЙШАЯ ДОМИНАНТА ПРОГРЕССА XXI ВЕКА**

Липунов Игорь Николаевич,
канд. хим. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: biosphera@usfeu.ru

Первова Инна Геннадьевна,
д-р хим. наук, заведующая кафедрой,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург, E-mail: biosphera@usfeu.ru

Ключевые слова: рециклинг, ресурсосбережение, технологический модуль рециклинга промышленных отходов.

Аннотация. Разработана концептуальная схема структурной системы производственного рециклинга внутри- и межотраслевого характера, которая прошла апробацию при разработке технологического модуля рециклинга отдельного вида промышленного отхода.

**INDUSTRIAL WASTE RECYCLING – THE MOST IMPORTANT CONCEPT
OF THE TECHNOLOGICAL PROGRESS IN THE XXI CENTURY**

Lipunov Igor Nikolaevich,
Ph.D. of Chemical Sciences, professor,
Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, E-mail: biosphera@usfeu.ru

Pervova Inna Gennadievna,
holder of an Advanced Doctorate in Chemical Sciences, head of the Department,
Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, E-mail: biosphera@usfeu.ru

Key words: recycling, resource saving, technological module of industrial waste recycling.

Abstract. The conceptual scheme of structural system for intra- and inter-branch production recycling was developed. This scheme was tested while creating of recycling technological module for specific type of industrial waste.

Проблема, связанная с разработкой принципов управления отходами производства и потребления в нашей стране, является одной из ключевых экологических проблем. Образование отходов оценивается порядка 4 млрд т в год, в том числе промышленных отходов – 2,6 млрд т/год. Свыше 30 млрд тонн отходов накоплено в результате прошлой хозяйственной деятельности. Анализ ситуации обращения с отходами в России показывает, что коэффициент использования отходов в качестве вторичного сырья в 2 – 2,5 раза ниже, чем аналогичный показатель в развитых странах мира. Использованию и обезвреживанию подвергается не более 39 % от общего количества образующихся твердых отходов.

В течение последних 10 лет (2003 – 2013 гг.) их количество увеличилось в 2 раза. Это привело к тому, что количество отходов, размещаемых на полигонах, возросло с 67 % (2003 г.) до 95 % (2013 г.) [1]. В результате низкого уровня использования отходов в качестве вторичного сырья продолжается их накопление в природной среде в виде техногенных месторождений.

Современный рециклинг – процесс промышленной переработки отходов производства и потребления с целью получения полупродуктов, продуктов или вторичного сырья – является быстро развивающейся динамичной областью ресурсосбережения в странах Евросоюза и Азии (Япония, Китай). Движущей силой развития рециклинга является все возрастающий дефицит природных ресурсов и обострение экологических аспектов проблемы отходов. Мировая тенденция сводится к трем основным направлениям решения проблемы отходов: сокращение потребления ресурсов; минимизация образования отходов; максимизация рециклинга, как основного процесса ресурсосбережения [2]. Таким образом, рециклинг отходов производства и потребления становится одной из доминант прогресса XXI века.

Разработанные и принятые к реализации в нашей стране "Основы государственной стратегии в области экологической безопасности на период до 2025 года" предусматривают при решении задачи обеспечения экологически безопасного обращения с отходами использование ряда механизмов, в том числе «... использование образовавшихся отходов путем переработки, регенерации, рекуперации, рециклинга». Одновременно стратегия ориентирует на «... поэтапное введение запрета на захоронение отходов, которые могут быть использованы в качестве вторичного сырья». Однако, темпы развития рециклинга в нашей стране значительно ниже, чем в странах Евросоюза, которые в конце XX столетия, начав разработку концептуальных и теоретических основ этого процесса, в начале XXI века приступили к его практической реализации.

Основные причины такого положения заключаются, во-первых, в том, что государственная политика в области обращения с отходами производства и потребления страдает инертностью и отсутствием креатива в разработке стратегии управления отходами, направленной на конечный результат, а во-вторых, отсутствие концептуальных и теоретических основ процесса рециклинга препятствуют его интенсивному развитию.

А потому, создание концептуальных основ управления отходами на разных уровнях иерархии и разработка гибких технологических модулей рециклинга отходов внутриотраслевого и/или межотраслевого характера является актуальной и своевременной необходимостью.

Это, в первую очередь, связано с тем, что техногенные месторождения, представляющие собой новый источник сырья, в отличие от природных, с одной стороны, обладают компактным размещением в зоне промышленных предприятий, что делает их более доступными и экономически выгодными для разработки. С другой стороны, техногенные ресурсы обладают сложным минералогическим и химическим составом, что требует проведения комплексного исследования их химического, фазового, радионуклидного состава, токсикологических и полезных свойств, а также разработки экологически безопасных, безотходных технологических процессов и высокотехнологичного оборудования их переработки.

В основу разработки структурной системы производственного рециклинга промышленных отходов нами положен циклоцентрический принцип (ЦЦП) обращения с отходами, как более прогрессивный и соответствующий главному требованию, предъявляемому к организации технологического цикла – обладать высокой степенью замкнутости, приближаясь к природному биологическому циклу.

В настоящее время существует два концептуальных подхода к решению проблемы отходов - отходоцентрический (ОЦП) и ЦЦП, отличающиеся уровнями иерархии управления отходами (рис. 1) [3].

ОЦП использует такие иерархические уровни обращения с отходами, конечным результатом которого является все возрастающее количество отходов и формирование техногенных месторождений.

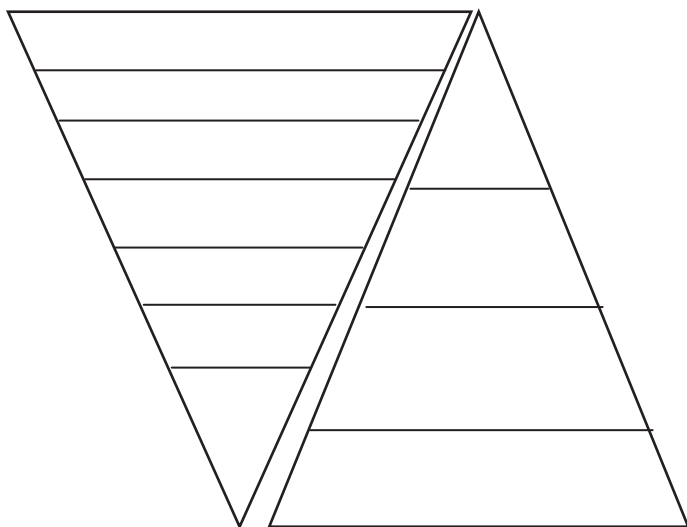


Рис. 1. Иерархия управления отходами на основе ОЦП и иерархия технических решений рециклинга на стадиях генезиса и трансформации отходов (ЦЦП)

Сущность ЦЦП заключается в том, что рециклинг есть сеть циклов, в которых материальный поток меняет параметры и статус в замкнутой цепи состояний: «сырье → полупродукт → продукт (и отходы производства) → отходы потребления → вторичный ресурс → сырье». Уровнями иерархии ЦЦП являются повторное применение отхода по прямому назначению (*рециклинг*) – возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (*регенерация*) – извлечение полезных компонентов для повторного использования (*рекуперация*) – *обезвреживание – захоронение*.

Иерархия управления отходами в рамках ЦЦП предполагает четыре основных уровня, которые определяют все технические решения рециклинга отходов: от выбора эффективных методов и технологий рециклинга, высокотехнологичного оборудования, оптимизации конструктивных и технологических параметров процессов до разработки технологических модулей рециклинга и проектирования сетей рециклинга. Таким образом, «традиционное обращение с отходами» (ОЦП) трансформируется в управление циклами и сетями рециклинга.

Циклообразующей стадией рециклинга являются процессы генезиса и трансформации отходов. Под генезисом отходов понимается последовательная смена стадий изменения характеристик качества отхода. Отходообразующими компонентами являются конкретные виды промышленных отходов, вовлекаемые в процесс техногенеза. Сетями рециклинга служат все материальные потоки контура рециклинга, а каналами – материальные потоки трансформации отходов.

Анализ литературных данных и собственный многолетний опыт авторов в области использования промышленных отходов в качестве техногенного сырья [4] послужили основой для разработки концептуальной схемы структурной системы производственного рециклинга промышленных отходов. Такая схема в виде основных элементов, характеризующихся соответствующими критериями, определяющими набор технологических и технических условий, лежащих в основе комплексной переработки отходов, представлен на рис. 2.

Основным элементом в структурной системе рециклинга являются промышленные отходы, вовлекаемые в рециклинг, характеризующиеся не только химическим составом и полезными свойствами, но и жизненным циклом и способностью каждого вида отхода к регенерации, поскольку промышленный отход, чаще всего, в исходном состоянии не представляет собой вторичный материальный ресурс, требуется подвергать его процессу регенерации.

Принцип комплексности использования техногенного сырья, который основан на максимальном извлечении всех полезных компонентов с последующей их утилизацией в полезные продукты производства или потребления, положен в основу выбора эффективного метода рециклинга.

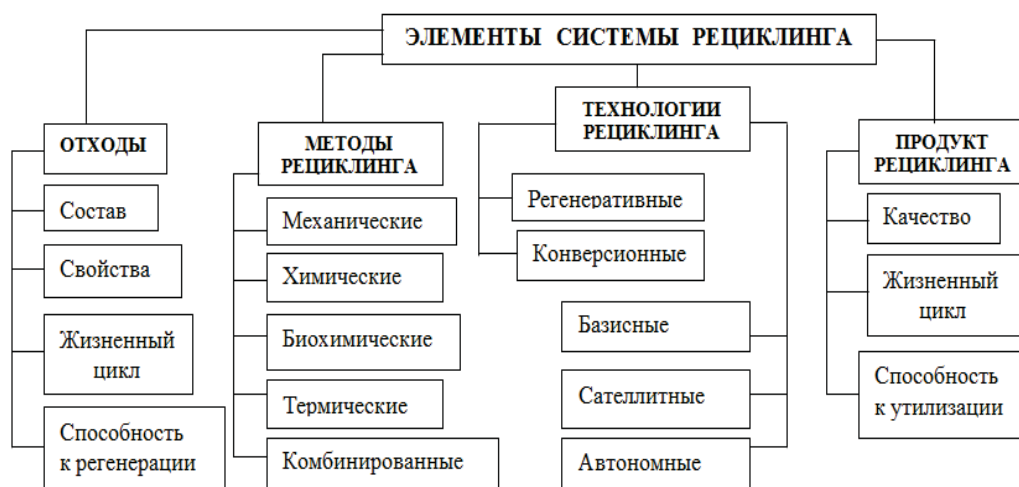


Рис. 2. Концептуальная схема структурной системы производственного рециклинга

Под технологиями рециклинга понимается организационное сочетание технологических процессов для создания замкнутых циклов в сетях рециклинга, которые должны разрабатываться, как и при переработке природного сырья, с учетом критериев их инженерного, экологического и экономического совершенства.

Наряду с традиционными механическими технологиями, которые классифицированы по физико-механическому признаку на технологии восстановления и дезинтеграции и химическими технологиями, классифицированными по физико-химическому принципу на регенеративные и конверсионные, в процессе рециклинга предложено также использовать технологии, которые классифицированы по генетическому признаку на базисные, сателлитные, автономные, гибридные и ассимиляционные технологии [3]. Генетический признак указывает причину создания и место реализации соответствующей технологии.

Например, базисные технологии способны вовлекать в переработку наряду с основным сырьем отходы извне, не проводя реконструкции основного производства. Сателлитные технологии дополняют базисные в том случае, когда переработка отходов интегрируется в специфическую часть производственного процесса и является продолжением основной технологии. Автономные технологии создаются исключительно для решения проблемы отходов и являются альтернативой депонированию или обезвреживанию отходов.

Структурная система рециклинга ориентирована на использование регенеративных и конверсионных, а также базисных, сателлитных и автономных технологий. Регенеративные и конверсионные технологии могут быть эффективно использованы в контурах регенерации, рекуперации и утилизации сети рециклинга отходов. Технологии физико-механического признака не введены нами в структурную систему рециклинга, поскольку регенеративные технологии (технологии восстановления) могут быть основаны на процессах трансформации как механической, так и химической природы. Важнейшим техническим условием такой структурной системы является высокотехнологичное процессно-аппаратурное оформление сетей рециклинга

Продукт рециклинга должен быть экологически безопасен, обладать качественно новыми полезными свойствами или свойствами аналога, получаемого из природного сырья, высоким жизненным циклом и способностью к утилизации, что и будут определять области его применения.

Предложенная концептуальная схема может служить методологией для разработки технологического модуля производственного рециклинга не только совокупности отходов различных промышленных производств (межотраслевой рециклинг), но и для отдельно взятого вида отхода (внутриотраслевой рециклинг). Покажем практическую реализацию данного концептуального подхода на примере разработанного нами технологического модуля производственного рециклинга одного из промышленных отходов.

Производства строительного материала из древесно-минерального композита, получаемого на основе мягких древесных отходов (наполнитель) и каустического магнезита (минеральное вяжущее) в середине 90-х годов XX столетия становятся нерентабельными в связи с высокой стоимостью связующего.

Альтернативой природному сырью, используемому для производства каустического магнезита, найдено техногенное сырье – магнийсодержащие отходы, образующиеся в производстве металлического магния электролизом расплава карналлита. Опуская подробности проведения комплексных исследований данного вида отхода, выделим только главное.

Магнезиальные вяжущие материалы, содержащие в своем составе химически активный оксид магния (MgO), способны при взаимодействии с растворами хлорида магния ($MgCl_2$) давать магнезиальное тесто, которое твердеет на воздухе за счет образования кристаллогидратных структур, образуя цемент Сореля. Такие вяжущие используются для получения композиционных материалов, в которых наполнителем могут служить различные полимерные материалы органической или минеральной природы.

Проведен комплекс исследований химического, фазового, радиоактивного состава шлама, его вяжущих свойств, токсикологии. Определены физико-механические характеристики лабораторных образцов, полученных из магнезиального теста на основе шлама, разработаны составы композиционных смесей для изготовления строительных и тепло – и звукоизолирующих материалов и отработаны оптимальные параметры процессов их получения. Разработаны и согласованы Технические условия «Магнезиальный порошок вяжущий (МПВ) на основе шлама карналлитовых хлоратов» [5].

Разработан гибкий технологический модуль производственного рециклинга шлама внутриотраслевого характера с получением МПВ и другой высоколиквидной продукции (рис. 3).

Фундаментальная иерархия изменением статуса материального потока в технологическом цикле производства магния показана следующими техническими цепочками: «природный ресурс (карналлитовая порода) – природное сырье (обогащенный карналлит) – продукция (металлический магний) – отход производства (шлам) – вторичный ресурс (регенерированный шлам, он же один из продуктов рециклинга МПВ) – техногенное сырье».

Иерархический уровень технологических и технических решений рециклинга шлама включает выбор и обоснование эффективных методов и технологий рециклинга, высокотехнологичного оборудования, разработку систем получения высоколиквидной продукции и, наконец, технологического модуля рециклинга внутриотраслевого характера. Регенеративный контур (А) обеспечивает процесс восстановления шлама методами сухого дробления и измельчения в замкнутом цикле (размер кусков 30–200 мкм) до состояния технического продукта, который по своему химическому составу и свойствам является хлормагнезиальным вяжущим, использованным нами в производстве древесно-минеральных композитов.

Рекуперативный контур (Б) гибкого технологического модуля предназначен для дальнейшей переработки регенерированного шлама (вторичное сырье). Используя комбинированные (химические и термические) методы и конверсионные и спутные технологии, ценные компоненты шлама утилизированы в технический оксид магния и синтетический карналлит (табл. 1).

Оксид магния, как технический продукт, и может быть использован в различных отраслях экономики: в строительной индустрии, цветной металлургии, стекольной, керамической и атомной промышленности, а синтетический карналлит по качественному и количест-

венному химическому составу является вполне доступным техногенным сырьем для производства металлического магния (табл. 2).

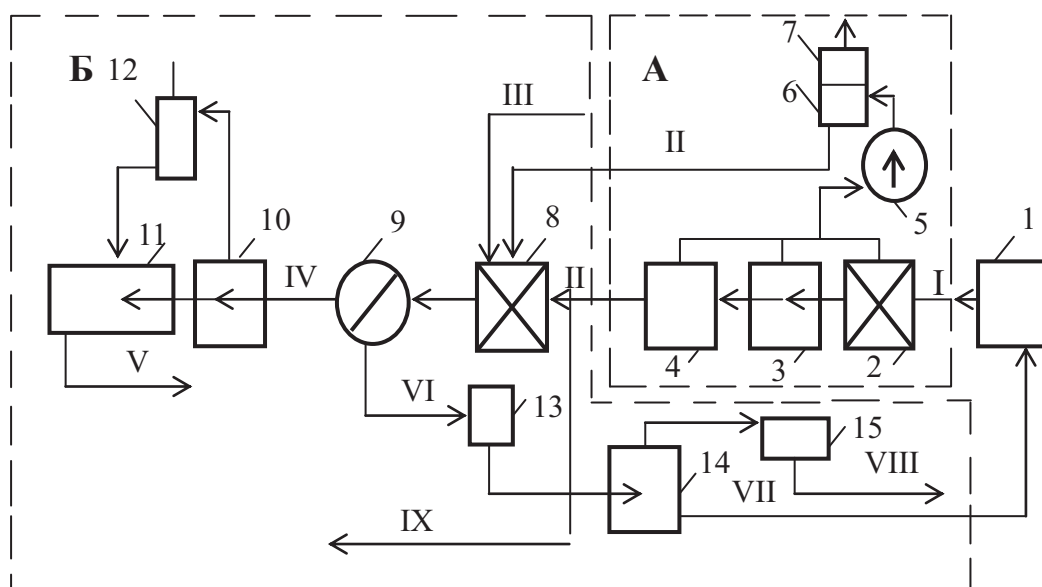


Рис. 3. Технологический модуль рециклинга ШКХ: 1 – цех производства магния; 2 – дробилка; 3 – шаровая мельница; 4 – классификатор; 5 – вентилятор; 6 – циклон; 7 – рукавный фильтр; 8 – реактор; 9 – вакуум-фильтр; 10 – сушилка; 11 – печь прокаливания; 12 – циклон; 13 – сборник фильтрата; 14 – выпарной аппарат; 15 – конденсатор. Потoki: I – отход; II – вторичный ресурс; III – вода; IV – осадок; V – продукт (технический MgO); VI – фильтрат; VII – техногенное сырье (синтетический карналлит); VIII – конденсат; IX – МПВ. Контурь рециклинга: А – регенеративный; Б – рекуперативный с последующей утилизацией ценных компонентов

Таблица 1

Состав и массовый выход продуктов рекуперации шлама

Продукт	Выход, мас. %	Химический состав, мас. %					
		MgO	Mg ₂ SiO ₄	SiO ₂	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	KCl	NaCl
Оксид магния	40,2	97,6	1,6	0,8	Не определено		
Синтетический карналлит	59,8	Не определено			86,7	7,0	6,3

Таблица 2

Химический состав сырья, используемого для производства магния

Сырье	Содержание основных компонентов, мас. %				
	MgCl ₂	KCl	NaCl	H ₂ O	MgO
Карналлитовая порода Верхнекамского месторождения	22-24	19-20	20-22	28-30	Отсутствует
Обогащенный (искусственный) карналлит	31-32	25-26	5-6	34-35	Отсутствует
Синтетический карналлит (хлормagneиный раствор)	27-29	24-25	3-8	31-34	Отсутствует
Шлам карналлитовых хлораторов	24-32	9-11	2-3	13-14	36-42

Таким образом, такой технологический модуль может быть интегрирован в специфическую часть производственного комплекса и служить продолжением технологического процесса основного производства.

Техногенный цикл материального потока в контуре рециклинга шлама магниевого производства с замкнутым циклом показан на рис. 4, где отходообразующими компонентами являются шламы магниевого производства, циклообразующей стадией рециклинга – процессы генезиса и трансформации шлама, каналами рециклинга – материальные потоки трансформации отхода (R_1 – R_6).

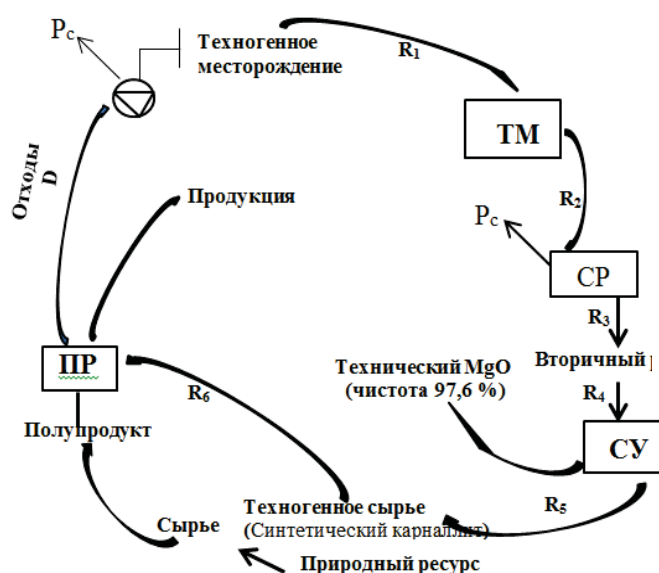


Рис. 4. Техногенный цикл материального потока в контуре рециклинга шлама магниевого производства

Список литературы

1. Леонова Л.Б. Концептуальные и экономические основы стратегического управления твердыми отходами производства и потребления. Современные исследования социальных проблем (электронный научный журнал), № 9(53), 2015. www.sisp.nkras.ru
2. Мюррей, Р. Цель - Zero Waste. [Текст]. / Р. Мюррей; перевод с англ. М.: ОМННО «Совет Гринпис», 2004. 232 с.
3. Гладышев Н.Г. Обращение с отходами. Организационно-технические решения // Экология и промышленность России. Сентябрь. 2007. С. 28-31.
4. Липунов И.Н. К вопросу о рециклинге промышленных отходов /И.Н. Липунов, И.Г. Перова, И.В. Николаев // Экология и промышленность России, 2015. Т. 19. № 4. С. 24-29.
5. Липунов И.Н. Композиционные материалы на основе техногенного сырья: физико-химические основы, разработка, освоение технологий и оборудования: монография / И.Н. Липунов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 159 с.