

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

П.И. Черноусов

# **Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии**

Монография



Москва 2011

УДК 669.054.8  
Ч-49

Рецензент

д-р техн. наук, проф. *А.Н. Пыриков*,  
д-р техн. наук, проф. *А.Н. Селезнев*

**Черноусов, П.И.**

Ч-49      Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии : моногр. / П.И. Черноусов. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 428 с.  
ISBN 978-5-87623-366-0

Изложена методология анализа рециклинга и элементопотока черных металлов в техносфере исходя из новой парадигмы развития черной металлургии, базирующейся на принципах Инициативы 3R и экологически чистого производства. Разработана имитационная модель рециклинга железа и выполнены исследования экологических сценариев развития черной металлургии в первой половине XXI в. Предложены методика анализа фазовых превращений элементов-микропримесей в доменном процессе и методика определения мощности техногенных месторождений в металлургических регионах. Описаны оригинальные технологические схемы переработки техногенных образований на базе шахтных печей. Рассмотрены особенности рециклинга вторичных ресурсов нового поколения: автомобилей и электронных и электробытовых приборов.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, студентов технических вузов, а также читателей, интересующихся проблемой устойчивого развития современной индустриальной цивилизации.

**УДК 669.054.8**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений .....	6
Введение .....	9
Глава 1. Формирование современной методологии оценки эффективности технологий, процессов и продуктов черной металлургии с точки зрения концепции экологически чистого производства .....	11
1.1. Устойчивое развитие и экологически чистое производство.....	11
1.2. Выбросы в окружающую среду .....	16
1.3. Обращение с отходами, техногенные ресурсы и месторождения .....	20
1.4. Концепция общества с оборотным использованием ресурсов .....	28
1.5. Интегрированная политика производства экопродукта.....	33
1.6. Экобаланс и анализ жизненного цикла изделия .....	38
1.7. Инициатива 3R и новая парадигма черной металлургии .....	42
1.8. Методология анализа техногенного элементопотока металлов.....	48
Глава 2. Глобальные элементопотоки металлов в техносфере .....	58
2.1. Ноосфера: движение вещества, энергии, информации.....	58
2.2. Металлизация биосферы .....	63
2.3. Глобальный элементопоток железа .....	67
2.4. Глобальный элементопоток хрома.....	74
2.5. Глобальный элементопоток марганца .....	82
2.6. Элементопоток ванадия в техносфере .....	91
2.7. Элементопоток галлия в техносфере .....	95
2.8. Сопоставительная количественная оценка элементопотоков черных металлов в природной и техногенной среде.....	98
Глава 3. Движение макро- и микроэлементов на современном интегрированном предприятии черной металлургии.....	99
3.1. Современные схемы утилизации текущих и накопленных отходов на отечественных и зарубежных интегрированных предприятиях.....	99
3.2. Макро- и микроэлементы в черной металлургии.....	104
3.3. Методика определения параметров элементопотоков для предприятий черной металлургии. Элементопоток железа .....	109
3.4. Элементопоток марганца .....	116
3.5. Элементопоток галлия .....	119
3.6. Баланс углерода и методология оценки энергоэффективности производства черных металлов и выбросов CO <sub>2</sub> .....	122
3.7. Оценка возможности энергосбережения при очистке металлургических газов от пыли .....	133
Глава 4. Микроэлементы в доменной плавке .....	137
4.1. Методология комплексных исследований поведения микроэлементов в сложных металлургических системах на примере доменной плавки.....	137
4.2. Принципиальная схема поведения микроэлементов в доменной плавке .....	146
4.3. Галлий .....	155

4.4. Стронций .....	165
4.5. Свинец .....	173
4.6. Мышьяк .....	176
4.7. Фосфор .....	178
Глава 5. Прогноз образования и оценка мощности техногенного месторождения для металлургического региона .....	189
5.1. Прогноз образования техногенного месторождения на территории металлургического региона .....	189
5.2. Оценка мощности техногенного месторождения для металлургического региона (на примере ОАО «Северсталь») .....	193
Глава 6. Технологические схемы переработки техногенных образований на базе шахтных печей .....	207
6.1. Техногенные материалы – перспективное сырье металлургии ближайшего будущего .....	207
6.2. Доменная печь – агрегат XXI в. ....	211
6.3. Печи малого объема – будущее доменного производства .....	214
6.4. Ресурсосберегающая технология утилизации шламов гальванического производства с использованием МДП .....	232
6.5. Вагранки и решение проблемы утилизации цинксодержащих металлургических пылей .....	237
Глава 7. Пирометаллургические способы утилизации отходов энергетической промышленности .....	247
7.1. Ванадий в продуктах нефтепереработки и золах ТЭС .....	247
7.2. Технологии извлечения ванадия из техногенного сырья .....	252
7.3. Экспериментальные исследования ванадийсодержащих ЗШО .....	256
Глава 8. Вторичные ресурсы нового поколения .....	264
8.1. Международный опыт организации авторециклинга .....	264
8.2. Современная технологическая схема авторециклинга .....	275
8.3. Оценка ресурсов авторециклинга в России .....	282
8.4. Электронные и электробытовые отходы .....	291
Глава 9. Прогнозные сценарии развития черной металлургии и рециклинга железа в техносфере .....	302
9.1. Развитие моделей, описывающих потребление металлолома в черной металлургии .....	302
9.2. Проблема учета в экобалансе стадии рециклинга металлолома .....	322
9.3. «Имитационная модель рециклинга» вторичных ресурсов черной металлургии в Обществе рециклинга .....	332
9.4. Анализ влияния различных факторов на параметры рециклинга вторичных ресурсов железа .....	337
Библиографический список .....	354
Приложение 1. Металлургические материалы, учитываемые в блок-схеме математического описания «ПОТОК» .....	377
Приложение 2. Содержание галлия в металлургических материалах Качканарского ГОК и ОАО НТМК по данным Гиредмета .....	382

Приложение 3. Баланс углерода металлургических предприятий и ГОКов России .....	383
Приложение 4. Содержание элементов-микропримесей в металлургических материалах .....	386
Приложение 5. Характерные балансы микроэлементов при выплавке перелитого чугуна .....	399
Приложение 6. Лабораторные образцы, содержащие галлий.....	403
Приложение 7. Схема элементопотока свинца в доменной плавке.....	405
Приложение 8. Химический состав гальваношламов некоторых промышленных предприятий г. Кургана .....	406
Приложение 9. Характерный состав ванадийсодержащих ЗПО ТЭС .....	407
Приложение 10. Основные положения европейской Директивы 2000/53/ЕС .....	408
Приложение 11. Распределение некоторых элементов-металлов в результате авторециклинга .....	409
Приложение 12. Описание составляющих элементов/подсистем имитационной модели рециклинга .....	410
Приложение 13. Исходные данные для расчета движения железа в экономике Японии в период 1958 – 2008 гг. ....	426

## Список принятых сокращений

3R – три приоритетных направления «Индустриального общества циркуляционного типа»: reduce, reuse, recycling (recycling – оборотное использование, reuse – повторное использование, reduce – переработка, утилизация); в последнее время часто добавляют четвертое R – recovery – восстановление

AHSS – Advanced High Strength Steels – многофазные стали – эффективные высокопрочные стали, которые обладают повышенным уровнем прочности при хороших пластических свойствах

BAT – Best available technology – лучшая из осуществленных на практике технологий

BDSV e.V. – Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling und Entsorgungsunternehmen e.V. – Федеральное объединение немецких предприятий по рециклингу лома черных металлов и избавлению от отходов

BIR – Bureau International Recycling – Международное бюро по рециклингу отходов

BPT – Best practicable control technology currently available – лучшая из возможных технологий

BREF – Best available techniques reference – ссылка на наилучшие имеющиеся технологии

cradle to gate – от истока до выхода – методика расчета затрат различных ресурсов на технологические процессы

CSR – Corporate Social Responsibility – корпоративная социальная ответственность – составная часть концепции экомбината для передовых предприятий Европы

DSD – Dual System Deutschland – Немецкая двойная система, занимающиеся утилизацией и сепарацией упаковочных отходов

DUX – итоговый индекс, характеризующий состояние окружающей среды, предложенный Комиссией ООН по устойчивому развитию для макроэкономических систем отчетности

EBRD – European Bank for Reconstruction and Development – Европейский Банк реконструкции и развития (ЕБРР)

EINECS – European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances – база данных предварительной регистрации опасных веществ в рамках регламента REACH

ELV – End of Life Vehicle – Директива ЕС по утилизации отслуживших автомобилей 2000/53/EC

ELV – Emission Limit Value – предельные величины выбросов во все природные среды, Директива 96/61/EC

EMAS – Community environmental management and audit scheme – О добровольном участии предприятий в системе экологического менеджмента и аудита (Директива ЕС 1836/93)

EP – end-of-pipe – на конце трубы

EPA – Environmental Protection Agency – Управление охраны окружающей среды, США

ESID – Ecologically sustainable industrial development – устойчивое экологически безопасное промышленное развитие

EWG – European Waste Catalogue – Европейский каталог отходов (Директива EC 94[3]EC)

HWL – Hazardous Waste List – Перечень опасных отходов (Директива 94/904/EC)

ISI – International Iron and Steel Institute – Международный институт черной металлургии

IPM – Impact Pathway Methodology – методология последовательности воздействия

IPP – Integrated Product Policy – Интегрированная политика производства продукта, устанавливающая экологические стандарты изделий с учетом всего жизненного цикла изделия (ЖЦИ)

IPPC – Integrated Prevention and Pollution Control – Комплексное предупреждение и регулирование загрязнений (Директива 96/61/EC)

ISWA – International Solid Waste Association – Международная ассоциация по переработке твердых отходов

LCA – Life Cycle Analysis (Assessment) – Анализ жизненного цикла изделия (оценка жизненного цикла)

LCI – Life Cycle Inventory Analysis – анализ – инвентаризация жизненного цикла

MACT – Maximum achievable control technology – лучшая на данном этапе технология охраны окружающей среды

NMAB – National Materials Advisory Board – Национальный консультативный совет по материаловедению

NSB – New Steel Body – проект сверхлегкого автомобильного кузова компании ThyssenKrupp Stahl AG

OTA – Office of Technology Assessment – Бюро технической оценки проектов при Конгрессе США

PI – Prevention Integrated Technology – мероприятия по охране окружающей среды, встроенные в технологический процесс

PRTR – Pollutant Release and Transfer Registers – регистр выбросов и переноса загрязнителей (Япония)

REACH – Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals – Регламент по Регистрации, Оценке, Уничтожению и Ограничению Химических веществ

StEP – Solving the E-waste Problem – решение проблемы электронного мусора

TA-Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – нормативное положение ЕС по защите воздушного бассейна

TRI – Toxic Release Inventory – Кадастр токсичных выбросов (США)

Ulcoss – ultra low CO<sub>2</sub> steelmaking – производство стали со сверхнизким объемом выбросов CO<sub>2</sub> (программа Международного института черной металлургии)

ULSAB – UltraLight Steel Auto Body – сверхлегкий стальной кузов автомобиля.

USGS – Mineral Commodity Summaries – Геологическая служба США

UVP – GVP – концепция аудиторской проверки технологий и производств на совместимость: с окружающей средой – UVP – Umweltverträglichkeitsprüfung и требованиями здоровья – GVP; составная часть международной серии стандартов ISO14000.

VDEh – Verein Deutscher Eisenhüttenleute – Общество немецких металлургов

WFD – Waste Framework Directive – Рамочная директива ЕС по отходам



## ВВЕДЕНИЕ

Наступившее тысячелетие окончательно утвердило глобальный подход к оценке эффективности использования и управлению вторичными ресурсами, важнейшими из которых являются ресурсы вторичных металлов. В последнее десятилетие активно разрабатываются теоретические основы организации рециклинга как необходимой составной части экологически чистого производства. Получили развитие инновационные концепции «Общества рециклинга» («Общества с оборотным использованием ресурсов»), «Экогорода», «Экопродукта», «Экокомбината», «Венозного потока вторичных сырьевых материалов». Их реализация осуществляется на базе передовых научных разработок динамических математических моделей жизненного цикла изделий с использованием методологии «экологических сценариев».

В передовых индустриальных странах (ЕС, Японии, США) приняты законы, нормирующие методы переработки автомобилей, электробытовых и электронных отходов (ЭЭО), упаковочных, строительных и пищевых вторичных ресурсов. Таким образом, законодательно закладывается фундамент экономической системы, ориентированной на рециклинг. В качестве приоритетных подходов в отношении вторичных ресурсов упомянутые законы определяют:

- 1) обратное использование (recycling);
- 2) утилизацию (reuse), в том числе тепла;
- 3) восстановление вторичных материалов (recovery);
- 4) ограничение образования и безопасное для окружающей среды и человека депонирование отходов (reduce).

Ключевыми принципами экологически чистого производства (ЭЧП) являются ресурсосбережение, рациональное обращение с отходами, снижение выбросов в окружающую среду и рециклинг. Эти принципы являются основополагающими понятиями при обучении как в технических, так и в гуманитарных вузах.

В основу инновационной концепции экогородов положена методология глобального рециклинга техногенных материалов. Среди типовых экогородов Японии особое место заняли города, системы обратного использования ресурсов которых базируются на металлургических технологиях. Для реализации концепции экогородов на базе металлургических технологий организован Специальный комитет по изучению перспектив экотехнологии в металлургии. В разработанной

комитетом стратегии развития технологий рециклинга отмечается, что металлургия представляет собой технологический комплекс, в котором представлены многочисленные специальные области, включая технологию металлов, материаловедение, машиностроение, электротехнику, информационные технологии. Металлургические процессы отличаются большой энерго- и материалоемкостью, и отрасль в целом располагает уникальными возможностями с точки зрения использования в качестве вторичного сырья отходов других производств. Общественная система рециклинга, использующая в качестве основы металлургические технологии и инфраструктуру, получила название «экокомбинат». Совершенствование экокомбинатов уже в ближайшем будущем потребует существенной модернизации металлургических технологий. Естественным этапом создания общества с оборотным использованием ресурсов стало формирование и законодательное оформление инфраструктуры транспортной системы рециклинга получившей название «Венозный поток вторичных сырьевых материалов».

Рециклинг является ключевым понятием в охране окружающей среды в металлургии. Производство металлов от обогащения сырья и во всех последующих переделах является процессом, для которого требуются большие количества сырьевых и вспомогательных материалов. Рециклинг представляет собой стратегию, позволяющую справиться с большими потоками материалов и связанными с этим факторами воздействия на окружающую среду.

Современные центры рециклинга, которые функционируют во многих регионах мира, особое внимание уделяют проблеме переработки сложного лома и смешанных отходов цветных металлов, а также мелкодисперсных отходов шредирования. Для их решения организуются специальные международные проекты под эгидой ООН. Например, в 2007 г. начал разрабатываться проект «StEP» (Solving the E-waste Problem – решение проблемы электронного мусора).

Для технологов-металлургов особую актуальность и научный интерес представляют вопросы промышленной переработки вторичных ресурсов в соответствии с принципами экологически чистого производства, с учетом миграции в их составе загрязняющих металл элементов – вагантов. Это, в частности, требует разработки новых принципов управления потоками лома, как черных, так и цветных металлов.

# **Глава 1. ФОРМИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ, ПРОЦЕССОВ И ПРОДУКТОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ПРОИЗВОДСТВА**

## **1.1. Устойчивое развитие и экологически чистое производство**

Проблемы охраны окружающей среды и экономного использования ресурсов рассматриваются совместно начиная со второй половины XX в. Принято считать, что экологические проблемы стали приоритетом с 1972 г., когда состоялась первая всемирная конференция ООН по состоянию окружающей среды [1–14].

Формирование мировой концепции охраны природы и ресурсосбережения представляет собой «общемировой процесс, базис которого определился достижениями в кибернетике (анализ сложных систем), экологии (системный подход к биосферным процессам) и технике (научно-техническая революция)». Обобщенную схему этого процесса часто представляют в виде цепочки: контроль (end-of-pipe – EP) – предотвращение (экологически чистое производство – ЭЧП) – управление (устойчивое развитие) [5–9, 14].

В настоящее время концепция устойчивого развития является основой системы хозяйствования практически для всех стран мира. Развитие цивилизации, приемлемое для сохранения окружающей природной среды, должно реализовываться независимо от границ государств и в промышленно развитых странах, и в странах третьего мира. Перечень проблем, решение которых необходимо для устойчивого развития, был утвержден на встрече руководителей стран-членов ООН в 1992 г. в Рио-де-Жанейро (Бразилия) в виде декларации «Agenda 21» и в последствии подтвержден конкретными законодательными актами отдельных государств [13–15].

Конкретизация концепции устойчивого развития выразилась в разработке модели устойчивого экологически безопасного промышлен-

ного развития (Ecologically sustainable industrial development – ESID). Принятие ESID означает начало эпохи экологически чистого производства, или экологически чистых технологий. Программа ЮНИДО определяет экологически чистое производство как «непрерывное использование совокупной превентивной стратегии защиты окружающей среды для процессов и изделий с целью снижения рисков для человека и окружающей среды» (1992).

Конференция по ЭЧП в Оксфорде, прошедшая в сентябре 1996 г. [16,17], подтвердила приведенное выше определение и дала следующее его расширенное толкование. Применительно к производственным процессам ЭЧП означает сокращение материальных и энергетических затрат, исключение из производственного процесса токсичных сырьевых материалов и уменьшение количества и уровня токсичности всех выбросов и отходов до их выхода из производственного процесса. Применительно к продукции ЭЧП означает уменьшение негативного воздействия в течение всего жизненного цикла изделия (ЖЦИ), начиная от добычи сырья для его производства и заканчивая удалением, когда продукт становится отходом или вторичным ресурсом. Применительно к сфере услуг ЭЧП означает соблюдение экологических норм при разработке и предоставлении услуг.

Широкое использование определения «устойчивое развитие» вызвало распространение и частое употребление понятия «устойчивое производство». Термины «экологически чистое производство» и «устойчивое производство» можно считать синонимами [6–8, 14].

В основу общепризнанной концепции ЭЧП в настоящее время положены разработанные в США в 80 годах XX в. принципы организации производственных процессов в соответствии с технологиями BAT и BPT. В 1990 г. Конгресс США принял Закон о чистом воздухе, определив 189 токсичных загрязнителей (Кадастр токсичных выбросов – TRI), и Управлению охраны среды (EPA) было поручено выработать национальные стандарты на выбросы, основанные на определении «максимально достижимая технология охраны окружающей среды» – МАСТ (впоследствии – BPT – лучшая из возможных технологий). Было впервые официально введено поня-

тие BAT (Best available technology) – лучшая из осуществленных на практике технологий. При лицензировании эксперты стали сравнивать предлагаемую для использования в производстве технологию с BAT [16,17].

В Европе концепция BAT была принята в результате Директивы 92/61/ЕС (IVU), главными документами которой стали материалы под названием «Наилучшие имеющиеся технологии» (BAT) и «Ссылка на наилучшие имеющиеся технологии» (Best available techniques reference – BREF) [17]. Концепция получила дальнейшее развитие в Директиве 96/61/ЕС от 24 сентября 1996 г. – «Комплексное предупреждение и регулирование загрязнений» (Integrated Prevention and Pollution Control – IPPC). Директива IPPC изменила технологию контроля и регулирования предельных величин выбросов путем ввода новых параметров, характеризующих «конечные технологии» – улавливание пыли отходящих газов, захоронение отходов и др. Целью IPPC в области охраны окружающей среды является стремление к более чистому производству (Cleaner production), осуществляемому по передовым промышленным технологиям. Таким образом, директива IPPC направлена на предупреждение образования отходов и снижение соответствующих производственных затрат, т.е. ресурсосбережение [18–24].

Директива IPPC распространяется на шесть основных категорий промышленного производства:

- 1) энергетику;
- 2) производство металлов;
- 3) обработку металлов;
- 4) обработку минеральных ресурсов;
- 5) химическую промышленность;
- 6) другие (целлюлозно-бумажную и пищевую промышленность, отрасли сельскохозяйственного производства).

Общие принципы директивы IPPC, определяющие условия эксплуатации промышленного оборудования, следующие:

– должны быть приняты все соответствующие предупредительные меры против загрязнения окружающей среды и в особенности с применением наилучших разработанных технологий (BAT);

- не допускаются существенные загрязнения окружающей среды;
- предотвращается получение отходов (иерархия в управлении промышленными отходами согласуется с Рамочной директивой по отходам (Waste Framework Directive – WFD);
- энергия используется максимально эффективно;
- принимаются необходимые меры по приостановлению функционирования предприятия для устранения риска загрязнений и возвращения территории промышленного предприятия к удовлетворительному состоянию.

Главной целью директивы IPPC стало определение предельных величин выбросов во все природные среды (Emission Limit Value – ELV) и разработка Базового документа технологий BAT (BREF). В документах BREF, которые были внедрены в 1999 г., было установлено различие между мероприятиями по охране окружающей среды, встроенными в процесс (Prevention Integrated technology – PI), и «технологиями на конце трубы» (EP – end-of-pipe). Базовый документ BREF для производства чугуна и стали с использованием природных и вторичных ресурсов был издан в мае 2000 г. [21–23].

Нормативы BAT [21–25] охватывают все металлургическое оборудование от агломерации до прокатки и связаны с установлением уровней выбросов (табл. 1.1). В России вопросы ресурсосбережения и обращения с отходами в настоящее время регламентируются системой ГОСТов, принятых в 1995–2001 гг. [5–7, 14, 26–33].

Таким образом, согласно концепции BREF «наилучшая имеющаяся технология»:

- 1) отражает новейшую и наиболее эффективную разработку;
- 2) служит основой для определения уровней выбросов, обеспечивающих их минимально возможное воздействие на окружающую среду;
- 3) охватывает вопросы проектирования, строительства, эксплуатации, обслуживания и остановки предприятий и оборудования;
- 4) предопределяет развитие в соответствующем масштабе экономически и технически оправданных мер в данной промышленной отрасли с учетом отношения затраты/прибыль;
- 5) вводит в действие технологию, которая наиболее эффективна в целом с точки зрения достижения высокого уровня экологической защиты.

**Технологии БАТ для основных производств черной металлургии [21–25]**

Производство	Технологии БАТ согласно документу BREF
Агломерация	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обеспыливание отходящих газов процесса агломерации.</li> <li>2. Обеспыливание отходящих газов из зоны охлаждения агломерата.</li> <li>3. Регенерация физического тепла со всей поверхности аглоленты, а также тепла, выделяющегося при охлаждении агломерата.</li> <li>4. Минимизация выбросов диоксинов и фуранов (PCDD/F) за счет рециркуляции отходящих газов.</li> <li>5. Минимизация выбросов тяжелых металлов за счет применения системы мокрых скрубберов или исключения пыли, уловленной на выходе из электрофилтра.</li> <li>6. Минимизация генерирования отходов.</li> <li>7. Минимизация содержания углеводородов в первичных отходящих газах за счет изменения качества топлива в аглошихте.</li> <li>8. Утилизация тепла.</li> <li>9. Минимизация выбросов диоксида серы за счет уменьшения введения серы или десульфурации отходящего газа.</li> <li>10. Минимизация выбросов оксидов азота за счет рециркуляции отходящих газов или деазотирования.</li> <li>11. Минимизация загрязнения воды</li> </ol>
Доменное	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Комплексная регенерация колошникового газа.</li> <li>2. Прямое вдувание восстановительных агентов в горн доменной печи.</li> <li>3. Регенерация энергии давления доменного газа.</li> <li>4. Регенерация физического тепла отходящих газов воздухонагревателей доменной печи.</li> <li>5. Использование желобов из материала, не содержащего смол, которые вредны для здоровья человека.</li> <li>6. Использование эффективной системы очистки доменного газа.</li> <li>7. Обеспыливание на литейном дворе (в зонах летки, желобов и т.д.).</li> <li>8. Минимизация выбросов с участка обработки доменного шлака.</li> <li>9. Обработка сбросной воды из мокрой системы очистки газа.</li> <li>10. Комплексная утилизация и минимизация вторичных продуктов (твердых отходов, побочных продуктов)</li> </ol>
Кислородно-конвертерное	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Эффективное обеспыливание в процессах предварительной обработки жидкого чугуна.</li> <li>2. Эффективное обеспыливание первичного конвертерного газа.</li> <li>3. Эффективное обеспыливание в процессах обработки жидкой стали (переливание плавки из одного ковша в другой, выпуск стали, скачивание шлака).</li> <li>4. Минимизация процесса образования отходов.</li> <li>5. Минимизация сбросных вод при мокрой очистке газа.</li> <li>6. Минимизация загрязнения воды при прямом охлаждении в процессе непрерывной разливки.</li> <li>7. Минимизация образования побочных продуктов (шлаки после операции скачивания шлака, шлаки после десульфурации, пыль и шламы) и максимальная их утилизация</li> </ol>

Производство	Технологии ВАТ согласно документу BREF
Электростале- плавильное	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Эффективное обеспыливание внутреннего пространства печи и использование закрытой конструкции печи.</li> <li>2. Минимизация выбросов диоксинов/фуранов и полихлорированного дифенила.</li> <li>3. Предварительный нагрев лома посредством утилизации физической теплоты, выделяющейся в системе очистки первичного отходящего газа электродуговых печей.</li> <li>4. Минимизация генерирования побочных продуктов.</li> <li>5. Применение замкнутой системы водяного охлаждения для оборудования печи</li> </ol>

## 1.2. Выбросы в окружающую среду

До середины XX столетия считалось, что природная среда в состоянии поглотить и переработать все техногенные и антропогенные выбросы. Затем в основу взаимоотношений технической цивилизации и природы была положена концепция очистки воздуха и воды от выбросов, получившая название «end-of-pipe» – «на конце трубы» [1–10].

В любом производственном цикле образующиеся отходы и выбросы в целом неустраняемы: они могут быть существенно уменьшены технологическими способами, переведены из одной физико-химической формы в другую или перемещены в пространстве. Поэтому в ходе настоящего этапа устойчивого развития индустриальной цивилизации в передовых странах пришли к выводу, что «end-of-pipe» требует существенного усовершенствования и принципы «экологически чистого производства» должны базироваться на превентивном подавлении выбросов технологическими методами [1–12].

Упомянутое обстоятельство хорошо иллюстрируется постепенным совершенствованием структуры нормативного положения ЕС по защите от выбросов воздушного бассейна TA-Luft, действующего с 1986 г. В 1994 г. в основу TA-Luft были положены документы аудиторской проверки технологий и производств на совместимость: с окружающей средой (UVP) и требованиями здоровья (GVP). Аналогичный подход был реализован в Японии в виде регистра выбросов и переноса загрязнителей (PRTR). Концепция UVP – GVP в итоге стала составной частью международной серии стандартов ISO14000 [34–39].



Наиболее эффективными способами организации и контроля охраны окружающей среды в передовых индустриальных странах в современных условиях считаются: менеджмент окружающей среды, экологические балансы, добровольные соглашения и привлечение общественности [17, 40]. Менеджмент окружающей среды в Европе базируется на двух основных программных документах: Директиве ЕС 1836/93 и стандарте DIN ISO-14001: 1996 «Системы менеджмента охраны окружающей среды: техническая характеристика и руководство по применению» [17, 22, 40].

Таким образом, оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) в 90-х годах XX в. была доведена до общепринятой практической реализации. Установившаяся международная практика предусматривает обязательное проведение экологического аудита. Основным международным документом, регламентирующим нормы и процедуру его проведения, стандарты серии ISO14000, разработан Международной организацией стандартов и принят Европейским Союзом в апреле 1995 г. В экологическом аудите участвуют многие международные организации. Наиболее крупными и известными из них являются Круглый стол по экологическому аудиту, Форум по экологическому аудиту, Институт экологического аудита [6, 7, 14, 33, 41, 42].

Широко распространенную методику по проведению экологического аудита предприятий (в том числе промышленных) разработал Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР) [7, 17, 22]. Процедура экологического аудита по версии ЕБРР подразделяется на следующие этапы: подбор команды аудиторов; сбор необходимой информации; анализ полученных данных; выдача рекомендаций и составление заключительного отчета. Протокол аудита оценки состояния окружающей среды является аналогом финансового аудиторского отчета. Согласно этому документу в заключительный отчет наряду с общей информацией о сбросах, выбросах и захоронениях отходов необходимо включать:

- историю развития предприятия;
- вопросы, касающиеся использования и экономии энергии;
- данные по оборудованию, использующему технические масла;
- информацию по асбесту, мелкодисперсным порошкам и волокнистым материалам;
- данные о технике безопасности и охране здоровья людей;

- материалы по шуму, вибрациям, магнитным полям;
- планы пожарной безопасности, охраны и действий в условиях аварий.

Первыми компаниями, разработавшими собственные программы экологического аудита, стали US Steel, Allied Chemical, Occidental Petroleum. В ЕС активные работы по экологическому аудиту стали проводиться после принятия директивы ЕС 1836/93 от 29 июня 1993 г. «О добровольном участии предприятий в системе экологического менеджмента и аудита (EMAS)».

При проведении процедуры EMAS (в отечественном варианте – ОВОС – оценка воздействия на окружающую среду) для проектируемого предприятия или внедряемой технологии должны быть решены следующие основные задачи:

- выявлены и проанализированы все возможные воздействия реализуемого инженерного решения на окружающую среду в районе внедрения или проектирования;
- спрогнозированы и оценены изменения окружающей среды, которые произойдут в результате оказанных на нее воздействий;
- предсказаны и классифицированы по значимости экологические и связанные с ними социальные, экономические и другие последствия реализации проекта;
- учтены возможные последствия осуществления реализуемых проектов [6–8].

Отличительной особенностью экологически чистого производства является отказ от применения систем очистки газов и воды от загрязнений как основного средства борьбы с выбросами и требования их превентивного подавления технологическими способами. Однако для выбора стратегии подавления выбросов необходимо решить ряд задач методического характера, поскольку во многих случаях как производители продукции, так и контролирующие службы не знают, что в действительности выбрасывается в окружающую среду при проведении производственного процесса и что должны, следовательно, выявлять и контролировать службы экологического мониторинга. Поэтому в содержание ОВОС должны входить расчеты возможных выбросов. Между тем для большинства действующих технических систем вся схема экологического мониторинга основана на контроле выбросов нескольких наиболее известных газовых и конденсированных компо-

нентов. Остальные составляющие выбросов, таким образом, считаются неизвестными и контролем не охватываются [8, 14, 15, 21, 23–28]. Параметры, контролируемые в настоящее время применительно к агрегатам черной металлургии, приведены в табл. 1.2 [7, 14, 23, 25].

Таким образом, расчет выбросов в окружающую среду должен основываться на двух фундаментальных принципах:

- составление материального баланса химических элементов на входе и выходе любой действующей техногенной системы;
- определение наиболее вероятного химического состава и физических свойств выбросов в окружающую среду [8].

Таблица 1.2

**Выбросы, контролируемые на предприятиях черной металлургии в соответствии с требованиями международного стандарта DIN ISO-14001 [25]**

Металлургическое производство	Контролируемые выбросы
Производство кокса	Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ); оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ); пыль, каменноугольная смола, фенолы, сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), стоки, летучие органические вещества, полициклические ароматические углеводороды, диоксины и фураны (PCCD/F)
Производство агломерата	Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), сульфиды, пыль, монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), диоксины и фураны (PCCD/F); свинец, кадмий, цинк, никель, хром, щелочи, радиоактивные изотопы ( $^{210}\text{Po}$ , $^{210}\text{Pb}$ ), летучие органические вещества, углеводороды, полихлордифенил, хлориды, фториды
Фабрики окомкования	Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), пыль, монооксид углерода ( $\text{CO}$ )
Доменное производство	Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), сульфиды, пыль, монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), фенолы, сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), цианиды, шлак, шлам
Кислородно-конвертерное производство	Монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), пыль, шлак, шлак, дымовые газы, тяжелые металлы, включая цинк, свинец и олово
Электросталеплавленное производство	Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ); оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), пыль, шлак, шлак, дымовые газы, тяжелые металлы, летучие органические вещества, полициклические ароматические углеводороды, полихлордифенил, диоксины и фураны (PCCD/F)

### **1.3. Обращение с отходами, техногенные ресурсы и месторождения.**

«Обращение с отходами» – термин, охватывающий весь объем операций, связанных с мониторингом, хранением, переработкой отходов и законодательным оформлением этих действий [6–8, 43–48]. При самых совершенных технологиях предотвратить возникновение отходов невозможно. Утилизация основной массы отходов может осуществляться по следующим направлениям:

- уничтожение отходов с переводом их в безопасные продукты;
- консервация отходов в безопасном состоянии для их использования в ближайшем или отдаленном будущем;
- текущее использование «свежих» отходов в производственном цикле (внутренний или производственный рециклинг);
- использование «свежих» отходов на предприятиях других отраслей промышленности (глобальный рециклинг);
- использование «отложенных» отходов (продукции, потерявшей потребительские свойства) в собственной или других отраслях народного хозяйства (глобальный рециклинг).

Вопросами методологии и логистики в обращении с отходами и вторичными техногенными материалами занимаются многие специализированные международные организации. Наиболее крупная – Международная ассоциация по переработке твердых отходов (International Solid Waste Association – ISWA) – насчитывает около 1100 членов из 70 стран. ISWA выпускает авторитетный журнал «Waste management world». Методологией рециклинга активно занимается Международное бюро по рециклингу отходов (Bureau International Recycling). По положению на 2009 г. BIR включало свыше 1000 компаний и федераций из 80 стран мира. Основная специализация участников – переработка черных и цветных металлов, бумаги, текстиля.

Тем не менее в методологии обращения с отходами до сих пор существуют спорные вопросы. Например, до настоящего времени остается дискуссионным вопрос о разграничении понятий «вторичный сырьевой материал» и «отходы». В частности, он подробно рассматривался на пленарной дискуссии конференции Федерального объединения немецких предприятий по рециклингу лома черных металлов и избавлению от отходов (BDSV e. V.). В Германии отработанную

логистику в этом вопросе применительно к бытовым отходам предоставляет система DSD [49].

До сих пор не разработано универсальное или общепринятое международное определение понятия «отходы» [49–51]. Основное определение отходов в ЕС дается в Общей директиве ЕС по отходам 75/442/ЕЕС от 15 июля 1975 г. Ее редакция была изменена специальной Директивой Совета 91/156/ЕЕС от 18 марта 1991 г.

Общая Директива ЕС требует полного перечня отходов. Он был впервые опубликован в виде решения Комиссии ЕС 94/3/ЕС от 20 декабря 1993 г. – Европейский каталог отходов (EWC). Каталог EWC является справочной номенклатурой, предусматривающей применение общей терминологии в масштабах всего Сообщества с целью улучшения эффективности деятельности по менеджменту отходов [50–52].

Директива 92/689/ЕС от 12 декабря 1991 г. по «опасным» отходам ссылается на определение отходов в Общей директиве ЕС по отходам и дополнительно определяет опасный отход как отход, который включен в Перечень опасных отходов (HWL). Действующая вплоть до настоящего времени (несмотря на введение Директивы REACH) система каталогов EWC – HWL была утверждена решением Комиссии 94/904/ЕС от 22 декабря 1994 г. Оба каталога (EWC и HWL) регулярно обновляются (через 2–3 года) Комитетом по технической адаптации Комиссии ЕС. Классификация металлургических отходов, принятая в каталогах EWC и HWL ЕС приведена в табл. 1.3 [51].

*Таблица 1.3*

**Металлургические отходы в каталогах EWC и HWL ЕС [51]**

Код	Отходы
10 02 01	Отходы обработки шлака
10 02 02	Необработанный шлак
10 02 03	Шламы обработки газов конвертеров
10 02 04	Шламы обработки газов электродуговых печей
10 02 05	Другие шламы
10 02 06	Отработанные огнеупоры
10 02 07	Твердые отходы обработки газов электродуговых печей, содержащие опасные вещества
10 02 08	Твердые отходы обработки газов электродуговых печей, отличные от отходов, указанных под кодом 10 02 07

Код	Отходы
10 02 09	Твердые отходы обработки газов из других агрегатов для производства чугуна и стали
10 02 10	Окалина, образовавшаяся на прокатных станах
10 02 11	Отходы обработки охлаждающей воды, содержащие нефтепродукты
10 02 12	Другие отходы обработки охлаждающей воды
10 02 13	Шламы обработки газов, содержащие опасные вещества
10 02 14	Шламы обработки газов, отличные от шламов, указанных под кодом 10 02 13

В отличие от мировой практики российское законодательство дает точное определение понятий «отходы», «утилизация и переработка отходов» и других терминов, имеющих отношение к обращению с отходами. Они приведены в Федеральном законе «Об отходах производства и потребления» и Межгосударственном стандарте ГОСТ 30772–2001, введенном в действие в 2002 г. [30]:

- Отходы – остатки продуктов или дополнительный продукт, образующиеся в процессе или по завершении определенной деятельности и не используемые в непосредственной связи с этой деятельностью. Под определенной деятельностью понимается производственная, исследовательская и другая деятельность, в том числе, – потребление продукции. Отечественное законодательство дает определение отходов производства, потребления и бытовых отходов.

- Отходы производства и потребления – остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, веществ, предметов, изделий или продуктов, образовавшиеся в процессе производства или потребления продукции, выполнения работ (услуг) и утратившие полностью или частично но исходные потребительские свойства.

- Бытовые отходы – отходы потребления, образующиеся в бытовых условиях в результате жизнедеятельности населения.

- Утилизация отходов – деятельность, связанная с использованием отходов на этапах их технологического цикла, и/или обеспечение повторного (вторичного) использования или переработки списанных изделий. В процессах утилизации перерабатывают отслужившие установленный срок и/или отбракованные изделия, материалы, упаковку, другие твердые отходы, а также жидкие сбросы и газообразные выбросы.

- Переработка отходов – деятельность, связанная с выполнением технологических процессов по обращению с отходами для обеспечения повторного использования в народном хозяйстве полученных сырья, энергии, изделий и материалов. Цель реализации технологических операций с отходами – превращение их во вторичное сырье, энергию, продукцию с потребительскими свойствами.

Переработка отходов является основой направления, которое получило название «рециклинг» (Recycling) [5–8, 14]. Официальное определение понятий «Recycling» (оборотное использование), «Re-use» (повторное использование) и «Recovery» (восстановление) было впервые дано в Постановлении о переработке использованных автомобилей. Оно было принято Евросоюзом в 1997 г. В 2000 г. Европейская Комиссия одобрила проект новой директивы, в которой аспекты авторециклинга проработаны наиболее детально (Директива ЕС по утилизации отслуживших автомобилей (ELV) 2000/53/EC). Были поставлены «количественные задания по повторному использованию, рециклингу и утилизации автомобилей и их узлов, чтобы заставить автомобилестроителей изготавливать новые автомобили с учетом лучшей пригодности их для рециклинга» [17, 22, 50–54].

В официальных документах РФ дается следующее определение [30]: «Рециклинг (рециклизация) – процесс возвращения отходов, сбросов и выбросов в процессы техногенеза». При этом оговариваются два варианта рециклинга отходов:

- повторное использование отходов по тому же назначению, например, стеклянных бутылок после их соответствующей безопасной обработки и маркировки (этикетирования);

- возврат отходов после соответствующей обработки в производственный цикл, например жестяных банок – в производство стали, макулатуры – в производство бумаги и картона.

Кроме того, особыми терминами обозначаются:

- рециклинг «совокупности отходов и сбросов» – рекуперация;
- рециклинг сбросов, порошкообразных и пастообразных отходов – регенерация;
- рециклинг сбросов и выбросов – рециркуляция [30].

Рециклинг, осуществляемый в рамках собственной отрасли индустрии, наиболее предпочтителен, он эффективен с точки зрения экономики, энергопотребления и защиты окружающей среды. Однако практи-

ка показала, что более 70 % всех образующихся техногенных отходов не могут быть переработаны предприятиями, которые их производят. Это относится к энергетике, транспорту, машиностроению и др. [7, 8, 14]

Оригинальная классификация техногенных ресурсов предложена в работе [8]. Они подразделяются на две основные группы (рис. 1.1):

- техногенные энергоносители или вторичные энергоресурсы (ВЭР);
- техногенные материалы.

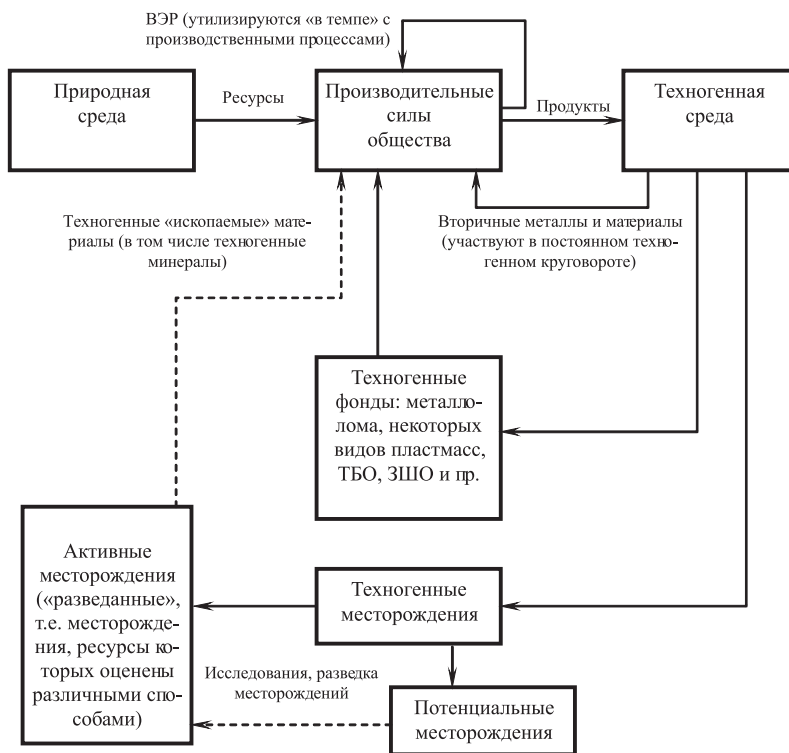


Рис. 1.1 Техногенные ресурсы и месторождения

В свою очередь, в группе техногенных материалов выделяются следующие виды ресурсов:

- техногенные месторождения различных промышленных комплексов;



- техногенное сырье (техногенные месторождения, переработка которых технологически обеспечена и экономически приемлема);
- вторичные материалы (в основном вышедшая из употребления продукция – аналог полуфабрикатов промышленной продукции);
- твердые бытовые отходы (ТБО);
- осадки сточных вод;
- перемещенные грунты;
- вскрышные породы.

В настоящее время основное количество техногенных ресурсов накоплено в виде техногенных месторождений в горных и металлургических регионах мира. Техногенные месторождения в отличие от природных возникли как «непланируемая» продукция, и их запасы формировались стихийно. Долгое время в индустрии было выгодно использовать первичное сырье, и анализом техногенных месторождений практически никто не занимался. Поэтому выделим основные особенности техногенного сырья, отличающие его от природных ископаемых [55, 56].

1. Техногенные месторождения – продукт «быстрого созревания», время их жизни – десятки лет вместо миллионов лет, характерных для природных месторождений. При этом запасы многих техногенных месторождений и в настоящее время пополняются за счет «свежих» отходов.

2. Малый срок жизни техногенного месторождения определяет более низкий уровень его однородности, большой разброс свойств по площади и глубине залегания.

3. «Созревание» техногенного месторождения означает изменение свойств техногенного сырья во времени и сильную зависимость свойств и скорости их изменений от параметров окружающей среды.

4. В техногенных отходах могут находиться опасные компоненты, на «дезактивацию» которых природе потребуются миллионы лет.

5. Техногенное сырье имеет, как правило, повышенную концентрацию редких и рассеянных элементов, прежде всего – металлов. С этой точки зрения техногенные материалы представляют собой первичное сырье, прошедшее стадию обогащения.

Из сказанного выше следует, что техногенное сырье принципиально отличается от природного. Поэтому для определения качества и способов переработки техногенного сырья методы и технологии, раз-

работанные для анализа и переработки природного сырья, применимы далеко не всегда. В настоящее время методология оценки качества техногенного сырья активно разрабатывается во всем мире. В частности, она включает создание банка данных по отходам всех видов деятельности человека.

Поскольку лишь некоторые отрасли индустриального общества могут частично или полностью перерабатывать собственные отходы, стратегия переработки техногенных ресурсов в рамках государства или сообществ государств должна строиться исходя из следующих базовых принципов:

- не допустимы потери компонентов, ресурсы которых в природе малы или уже исчезли;
- основными методами утилизации техногенных материалов всех видов должны быть высокотемпературные процессы их переработки, так как они обеспечивают максимально возможную в настоящее время степень извлечения ценных компонентов, в наибольшей мере гарантируют безопасность продуктов переработки и наиболее полное уничтожение экологически опасных отходов;
- функцию отрасли, ответственной за переработку отходов производства и потребления в целом, наиболее полно может и должна выполнять металлургия.

Техногенные месторождения на территории металлургических предприятий и регионов имеют особую специфику. Их главными особенностями являются: расположение в промышленно развитых районах; размещение на поверхности; преимущественно мелкодисперсный состав. Техногенные месторождения, формирующиеся в регионах черной металлургии, образуются главным образом на базе золошламонакопителей, шлаковых отвалов и техногенных грунтов, использованных при перепланировках местности во время расширения и реконструкции производства.

Структура техногенных месторождений отечественных металлургических предприятий зависит от вида и условий складирования отходов. На крупных металлургических комбинатах отвалы формируют по видам производств (доменные и сталеплавильные шлаковые отвалы), а производственный мусор складировать отдельно по видам отходов. На малых заводах, как правило, устраиваются общие отвалы для всех видов техногенных материалов. При хранении техногенных ма-

териалов происходят процессы, изменяющие их исходные свойства: химический, минеральный и гранулометрический составы, а также физико-механические характеристики (прочность, плотность и пр.). Поэтому каждое техногенное месторождение является уникальным, так же как уникальным является любое комплексное месторождение природных полезных ископаемых.

Возможности переработки ресурсов техногенных месторождений используются в настоящее время весьма ограниченно. Главной задачей разработки техногенных месторождений металлургических регионов, как правило, считается максимально полное извлечение металлических образований с целью использования в качестве оборотного лома. Наряду с включениями металлов практический интерес представляют вторичные огнеупоры и некоторые шлаки.

Опыт разработки шлаковых отвалов и шламонакопителей показывает, что на каждом предприятии сложились технологические приемы, которые учитывают специфику конкретных техногенных месторождений. Однако можно выделить и ряд уже сформировавшихся «типовых» технологических решений. В технологическую схему разработки техногенных месторождений в настоящее время, как правило, включаются следующие виды работ:

- рыхление, усреднение и перемещение техногенных масс на участки временного складирования;
- разрушение, дробление и сортировка прочных техногенных образований;
- извлечение металлических включений, лома огнеупоров и других техногенных материалов.

Процессы разработки техногенных месторождений на всех стадиях связаны с обработкой и перемещением больших объемов металлургических материалов. С точки зрения комплекса операций, входящих в производственный процесс разработки техногенных месторождений, их можно считать аналогичными горным работам открытого типа.

Практически все виды материалов, получаемых при переработке техногенных месторождений, находят применение в различных отраслях производства и успешно конкурируют с природными материалами. Характерными видами техногенных материалов являются щебень, песок и щебеночно-песчаные смеси для дорожного строительства, оборотный и магнитный продукты для доменного, сталеплавильного и ли-

тейного производств, удобрения для сельского хозяйства. Из отвальных шлаков производятся абразивные материалы для струйной обработки поверхностей, зернистые материалы для фильтров и защитных покрытий для мягких кровельных материалов, наполнители и пигменты для шпатлевок, красок, мастик и линолеума и т.п.

Возможности использования техногенных ресурсов, т.е. превращение техногенных отходов в техногенное сырье, зависят от их качества и способов его оценки. Важно знать о формах пребывания основных элементов в техногенном сырье. В литосфере минералы являются наиболее распространенной природной формой нахождения химических элементов. Изоморфные смеси в минералах представляют собой закономерные замещения аналогичных элементов друг другом в кристаллических решетках. Из изоморфных смесей добывается основная часть редких и рассеянных элементов. При существующих в настоящее время методах извлечения элементов значительная их часть попадает в атмосферу и промышленные стоки. Освобождаясь из кристаллических решеток, бывшие изоморфные примеси начинают самостоятельную (антропогенную) миграцию в биосфере.

Таким образом, основные сложности переработки отходов связаны с тем, что сложившаяся практика контроля технологий переработки вторичных ресурсов не предусматривает подробного анализа компонентов технологического процесса (сырья и продуктов) на содержание всех возможных элементов [8, 55, 56].

#### **1.4. Концепция общества с обратным использованием ресурсов**

В Японии в 1991 г. был принят Закон о стимулировании использования вторичных ресурсов (№ 48 от 1991 г.). Сформулирована концепция рециклинга отходов как вторичных ресурсов и введено понятие «расширенной ответственности производителей, которая предполагает ответственность производителей за утилизацию (рециклинг) промышленных отходов и изделий, выработавших срок эксплуатации». Законом предусматривался комплекс мероприятий по стимулированию использования побочных продуктов производства, промышленных отходов, а также по активизации сбора и переработки твердых бытовых отходов. Была поставлена задача совершенствования методов проектирования изделий с учетом их последующего использо-

вания в качестве вторичных ресурсов, т.е. создание экопродукта [57, 58].

Во второй половине 90-х годов XX в. объектом обсуждения стало не просто развитие технологий рециклинга, а необходимость построения экономической и социальной системы, в рамках которой в перспективе удалось бы решить проблемы охраны среды и природных ресурсов. В 1999 г. Министерство внешней торговли и промышленности Японии подготовило отчет «Эколого-экономические перспективы», в котором был сформулирован вопрос о необходимости преобразования прежней экономической системы с массовым производством продукции, массовым потреблением ресурсов и массовым образованием отходов в систему оборотного использования ресурсов. В результате в 2000 г. был принят ряд фундаментальных законов экологического и экономического направления, что позволило назвать этот год годом рождения общества рециклинга [57–59].

Базовый закон о формировании общества с оборотным использованием ресурсов (№ 110 от 2 июня 2000 г.) вступил в силу в 2001 г. Закон оперирует термином «оборотные (вторичные) ресурсы», которые определяются как пригодная для использования часть отходов производства и потребления. В качестве приоритетных подходов в отношении отходов закон определяет: 1) ограничение образования (*reduce*); 2) утилизация (*reuse*); 3) оборотное использование (*recycling*); 4) утилизация тепла; 5) безопасное для окружающей среды и человека депонирование отходов. Первые три приоритетных направления – *reduce, reuse, recycle* – часто сокращенно называют принципом 3R. Законом предусматривается ежегодная оценка и анализ глобального материалопотока японской экономики путем составления «Белой книги общества с оборотным использованием ресурсов» [59]. Кроме базового закона в 2000 г. были приняты и другие: закон о «зеленых закупках», стимулирующий производство утилизируемых изделий, и законы об оборотном использовании конкретных видов изделий – объектов рециклинга.

Первым из группы законов, призванных активизировать оборотное использование конкретных изделий, стал Закон о стимулировании сбора, сортировки и переработки тары и упаковки (Закон о рециклинге упаковки – в последней версии № 113 от 7 июня 2000 г.), принятый в июне 1995 г. и полностью вступивший в силу в апреле 2000 г.

В апреле и июне 2001 г. вступили в силу Закон о рециклинге электробытовых приборов (№ 97 от 5 июня 1998 г.) и Закон о рециклинге пищевых продуктов (№ 116 от 7 июня 2000 г.). В 2002 г. начал действовать Закон о рециклинге строительных материалов (№ 104 от 2000 г.), согласно которому в оборотном цикле должно использоваться не менее 95% строительных отходов. Наконец, в соответствии с вступившим в силу в январе 2005 г. Законом о рециклинге автомобилей (№ 87 от 2002 г.) предусматривается, что к 2015 г. коэффициент оборотного использования вторичных автомобильных ресурсов должен составить 95 %, а масса пыли шрединг-установок, подвергаемая захоронению, должна уменьшиться до 1/5 показателя 1996 г.

В 1997 г. Министерство экономики Японии начало опытную компанию по созданию экогородов с нулевым выходом отходов. В основу концепции экогородов положен принцип глобального рециклинга техногенных материалов [57, 58]. Все возникающие в городах вторичные материалы и отходы должны либо перерабатываться на производящих их предприятиях, либо использоваться в качестве сырья для других отраслей. Функционирование 18 экогородов обеспечивалось созданием специальных предприятий для рециркуляции наиболее сложных видов отходов и включало оказание содействия мелким предпринимателям по приобретению наиболее эффективного оборудования по рециркуляции. По истечении шести лет после начала функционирования системы экогородов были отобраны их наиболее успешные типовые планы, которые получили совместное одобрение Министерства экономики и Министерства окружающей среды и были рекомендованы для внедрения на территории всей страны.

Среди типовых планов экогородов Японии особое место занимают города, системы оборотного использования ресурсов которых базируются на металлургических технологиях. В городах Китаюсю, Кавасаки, Фукуяма приняли курс на симбиоз предприятия с городом и развитие экологически ориентированного металлургического производства, стремясь реализовать все возможности промышленной утилизации городских отходов. Основным оборудованием для рециклинга вторичных ресурсов стали шахтные печи. Для реализации концепции экогородов на базе металлургических технологий в сентябре 2002 г. организован Специальный комитет по изучению перспектив экотехнологии в черной металлургии [60, 61].

В разработанной комитетом стратегии развития технологий рециклинга отмечается, что черная металлургия представляет собой технологический комплекс, в котором представлены многочисленные специальные области, включая технологию металлов, материаловедение, машиностроение, электротехнику, информационные технологии. Процессы в черной металлургии отличаются большой энергетической и материалоемкостью, и отрасль в целом располагает уникальными возможностями с точки зрения использования в качестве вторичного сырья отходов из других промышленных отраслей, более всего нуждающихся в ликвидации, без отрицательного влияния на окружающую среду. Располагающая таким потенциалом черная металлургия должна сыграть определяющую роль одновременно в качественном и количественном решении экологических и энергетических проблем XXI в. Эта роль была определена следующим образом:

- использование металлургической инфраструктуры как платформы для создания замкнутых межотраслевых взаимосвязей в области использования вторичных ресурсов;
- выполнение технических разработок с целью превращения металлургической отрасли в отрасль – поставщика экологически чистых энергоносителей (водород, электроэнергия);
- помощь в решении проблемы снижения выброса углекислого газа путем производств экопродуктов и экологически чистые металлургические технологии.

Общественная система, которая использует в качестве платформы технологии и инфраструктуру металлургических заводов и предприятий других передовых отраслей, где организована высокоэффективная циркуляция материальных ресурсов и энергоносителей за счет тесного межотраслевого и межрегионального взаимодействия, получила наименование «экокомбинат». В дальнейшем развитии концепции экокомбината был учтен успешный опыт передовых предприятий Европы, на которых прочно закрепилось понятие «корпоративная социальная экологическая ответственность (CSR)». В Японии также появились товары с элементом экологической ответственности, выпускаемые на предприятиях с лицензированным ЭЧП. Эти предприятия формируют особый индустриальный экофонд («зеленый» фонд). Стимулируемое государством активное инвестирование в область социальной ответственности означает со стороны инвесторов реализацию

принципа: «Заранее предотвратить экологические риски, которые могут возникнуть в будущем» [6, 7, 14, 33, 62–65].

Совершенствование экокомбинатов и развитие экофонда уже в ближайшем будущем потребует существенной модернизации металлургических технологий. Будут намного шире востребованы технологии извлечения и удаления примесей и получения металлургических шлаков с заданными свойствами. В последние годы ведутся активные разработки по рециклингу с помощью металлургических технологий самых разнообразных техногенных материалов [62, 63].

Естественным этапом создания общества с оборотным использованием ресурсов стало формирование инфраструктуры транспортной системы рециклинга. В 2003 г. образован Комитет по развитию портов рециклинга. Согласно разработанной комитетом методологии «порты рециклинга» представляют собой узловые точки в сетевой системе движения вторичных ресурсов, которая получила название «венозного» материалопотока [61, 63].

В числе основных технических составляющих портов рециклинга (опорных баз) в системе венозного материалопотока были обозначены:

- металлургическое оборудование, связанное с рециклингом;
- портовые сооружения, формирующие инфраструктуру для перевозок (в том числе международных) вторичных ресурсов;
- склады и специальное оборудование для перегрузки и хранения техногенных материалов;
- разветвленная дорожная сеть.

Перечисленные сооружения и объекты должны быть технологически связаны между собой и органично включены в единый комплекс. В качестве характерных примеров уже функционирующих портов рециклинга называют порты Муроран и Томакомаи, в систему которых входят металлургические предприятия этих городов [61].

После принятия в 2000 г. парламентом страны шести законов, направленных на построение экономической системы, ориентированной на рециклинг, были нормированы методы утилизации строительных, пищевых, упаковочных, электробытовых вторичных материалов и автомобилей. Таким образом, металлолом, который ранее рассматривался как естественно возникающий материал, после 2000 г. превратился во вторичный ресурс, с которым следует обращаться, опираясь на соответствующую законодательную базу [66–68].



## **1.5. Интегрированная политика производства экопродукта**

В Европе формирование Общества рециклинга осуществляется с помощью реализации концепции (Integrated Product Policy) интегрированной политики производства продукта (экопродукта) [69–71].

По представлениям Европейской Комиссии, в будущем в процессе формирования и реализации интегрированной политики производства продукта должны быть разработаны комплексные систематизированные экологические требования к изделию на протяжении всего его жизненного цикла, в особенности, к фазе утилизации и качеству используемых природных и техногенных материалов. Приоритетными направлениями ИРР являются:

- ресурсосбережение – уменьшение количества ресурсов всех видов, используемых в процессе производства;
- рециклинг – предотвращение образования и утилизация отходов;
- качество и оптимальный срок эксплуатации продукта;
- снижение выбросов всех видов, в том числе при эксплуатации и рециклинге;
- снижение массы изделий, что связано с ресурсосбережением;
- способность к ремонту, демонтажу и утилизации.

Для реализации политики ИРР в первую очередь рассматриваются следующие основные правовые инструменты.

1. Экономические инструменты – в течение всего жизненного цикла изделия затраты, связанные с охраной окружающей среды, включаются в стоимость продукта.

2. Ответственность производителя – экологические расходы, связанные с рециклингом или утилизацией, включаются в стоимость самого изделия.

3. Экологический знак – планомерное расширение практики маркировки экологическим знаком разных видов продукции с целью помочь потребителю в поисках экологически чистого продукта.

4. Общественное снабжение – продвижение экологически чистых продуктов по системе общественного снабжения с помощью обязательной оценки их влияния на окружающую среду как составной части экологического баланса.

5. Информация о продукции – имеющаяся в наличии информация о влиянии продукции на окружающую среду и здоровье людей долж-

на сопровождать изделия на всем протяжении их жизненного цикла. Производитель должен знать экологические свойства материалов и изделий; конструкторы могут проверять целесообразность использования выбранного материала на всем протяжении жизненного цикла продукции; торговые структуры и конечный потребитель должны знать альтернативные экологические варианты.

Упомянутые требования для продукции с точки зрения норм охраны окружающей среды не являются принципиально новыми. В качестве примера можно привести директивные документы для утилизации вышедших из эксплуатации автомобилей и упаковки [72]. Основополагающий принцип заключается в следующем: первенство процессов повторного использования конструкционных элементов и переработки материалов перед термической утилизацией и депонированием отходов. Оба директивных документа содержат заданные значения долей утилизации изделий (табл. 1.4).

*Таблица 1.4*

**Заданные значения доли утилизации вторичных ресурсов в соответствии с Директивой ЕС 2000/53/ЕС.**

Способ обращения с изделиями и материалами, вышедшими из сферы эксплуатации	Доля, % от массы изделия	
	2005 г.	2015 г.
Рециклинг и повторное использование	> 80	> 85
Термическая переработка	> 5	> 10
Использование в качестве вторичных ресурсов, итого	> 85	> 95
Депонирование	< 15	< 5

В связи с особой ролью рециклинга в металлургическом производстве продукты, содержащие металлы, имеют существенные преимущества в рамках политики IPR. В настоящее время они составляют до 70 % экопродуктов, официально признанных ЕС [69, 70]. «Рециклинг является ключевым словом в охране окружающей среды в черной металлургии. Производство стальных изделий от обогащения сырья и по всем последующим переделам является процессом, для которого требуются большие количества сырьевых и вспомогательных материалов. Рециклинг представляет собой стратегию, позволяющую справиться с большими потоками материалов и связанными с этим факторами воздействия на окружающую среду» [54].

Интегрированная политика производства продукта устанавливает требование совместной работы поставщика материала и производителя продукции над экологическим развитием продукта. Разработанная компанией Thyssen Krupp Stahl концепция кузова New Steel Body (кузов NSB) является примером такого сотрудничества. Автомобилестроители и их поставщики поставили перед собой задачу сбережения природных ресурсов и уменьшения вредных выбросов. Центральным вопросом в этой области стало снижение расхода потребления топлива, которое было достигнуто главным образом за счет снижения массы изделия. Компания Thyssen Krupp Stahl разработала специальные многофазные стали, так называемые Advanced High Strength Steels – эффективные высокопрочные стали, которые обладают повышенным уровнем прочности при хороших пластических свойствах, что позволило сделать конструкционные элементы кузова более тонкими и тем самым более легкими.

Кузов NSB примерно на 24 % (соответственно на 75 кг) легче по сравнению с сопоставимым традиционным изделием при обеспечении аналогичного уровня безопасности и очень низких дополнительных расходах, которые составляют 3 % по сравнению с эталонной конструкцией традиционного каркасного исполнения. При этом уменьшение массы кузова на 100 кг обеспечивает снижение расхода топлива на 0,3 л на 100 км пройденного пути. При пробеге в 150 тыс. км сэкономленные на кузове NSB 75 кг позволяют снизить расход бензина на 338 л и тем самым – на 767 кг выбросы CO<sub>2</sub>.

Проект NSB является примером того, как с помощью установки разумных краевых условий политика ИРР позволяет действительно достичь экономически эффективных улучшений. То, что данные результаты были достигнуты именно со сталью, – не случайность: уже первичные свойства сплавов железа, а также сам процесс производства стальных и чугунных изделий соответствуют основным критериям устойчивого развития [70, 71]. В работах [63, 69] приведены другие характерные примеры металлургических экопродуктов XXI в.:

- проект ULSAB (сверхлегкий стальной кузов автомобиля): увеличение доли высокопрочных сталей в конструкции несущего автомобильного кузова с целью уменьшения массы автомобилей и повышения топливной экономичности;

- листовая сталь с бессвинцовистым металлопокрытием и высокой коррозионной стойкостью;

- нержавеющая бесхромистая оцинкованная листовая сталь с поглощением вибрации для электробытовых приборов;
- сверхтонкостенные стальные банки из особо тонкой жести и ультратонкой ламинированной листовой стали, позволяющие существенно повысить коэффициент оборотного использования;
- листовая трансформаторная сталь, значительно повышающая эффективность преобразования энергии в трансформаторах и электродвигателях;
- котельные стальные трубы, рассчитанные на высокие температуры и давление в энергетических агрегатах, резко повысившие КПД этих агрегатов;
- листовая сталь, плакированная титаном, для мостовых опор, сооружаемых в морской акватории.

Особо следует упомянуть проект «Стальное жилище» – жилое здание, в котором деревянные элементы конструкции заменены стальными. В ЕС, США и Японии в настоящее время сооружение таких конструкций уже превышает 15 % всего объема жилищного строительства. Это жилье рекламируют как экологически благоприятный дом, указывая на долговечность, низкую нагрузку на окружающую среду, возможность оборотного использования, малую энергоемкость.

Важнейшим этапом формирования общеевропейской системы интегрированной политики производства экопродукта стало внедрение регламента Европарламента в области химикатов – Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals – REACH (Регламент по регистрации, оценке, уничтожению и ограничению химических веществ) [73, 74].

REACH вступил в силу 1 июня 2007 г. Он возлагает на промышленность основную ответственность в сфере управления рисками для здоровья человека и окружающей среды от применения химических веществ. В соответствии с REACH все вещества, произведенные на территории ЕС или ввезенные на территорию ЕС в количестве более 1 т/год, подлежат регистрации, если вещество присутствует в указанных изделиях в концентрациях более чем 0,01% масс. Под действие REACH подпадают следующие отрасли индустрии:

- химическая промышленность (производство органических и неорганических веществ, лаков, красок и др.);

- нефтеперерабатывающая промышленность;
- черная и цветная металлургия;
- текстильная промышленность;
- электронная промышленность;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- автомобильная промышленность.

Регламент REACH призван гарантировать свободное обращение продуктов на внутреннем рынке Европейского Союза. По мнению Еврокомиссии, все предыдущие (в сумме более 40) различные постановления не могли в полной мере оценить вредное влияние на человека и окружающую среду веществ, экспортируемых в ЕС. Теперь же создан универсальный сертификат безопасности о вреде здоровью и окружающей природной среде.

Реализацией регламента REACH в ЕС занимается Европейское химическое агентство, которое располагается в Хельсинки. Все, что связано с управлением продуктом, организацией исследований веществ, токсикологических исследований, экологической безопасности, программой Responsible Care объединено в Управление продуктовой безопасности. Управление располагает двумя лабораторными комплексами: токсикологическим и экотоксикологическим. На уровне предварительной регистрации используется база данных EINECS, где зарегистрировано около 100 тыс. веществ; из них в Европе в торговом обороте участвует 30 тыс. веществ; 2 тыс. веществ, имеющих оборот в ЕС, считаются особо опасными.

Для регистрации продукта в рамках REACH заявителю необходимо пройти идентификацию вещества не только на его состав, наличие смесей, опасностей, объем, но и последующее применение. Это требует получения от потребителя продукта подтверждения на его дальнейшее использование. Другими словами, заявитель должен иметь сценарий применения продукта.

С помощью REACH ЕС намеревается: во-первых, ограничить оборот особо опасных и опасных веществ; во-вторых, провести многосторонние исследования веществ на степень их опасности и токсичности. Обмен информацией по этим исследованиям обязателен. Если компания не хочет представлять данные, то для нее рынок в Европе закрыт. Все опасные вещества требуют получения дополнительного разрешения в агентстве или Еврокомиссии. Также обязательным является предоставление информации по цепочке поставок.

Таким образом, с развитием интегрированной политики экопродукта Европейская комиссия планирует оказать содействие процессам создания экологических видов продукции и формирования правового с точки зрения экологии поведения потребителей. Это подразумевает тщательное изучение всего жизненного цикла изделия.

## **1.6. Экобаланс и анализ жизненного цикла изделия**

В промышленно развитых странах успешно используется и продолжает активно развиваться методика расчета затрат различных ресурсов на технологические процессы, в основу которой положен принцип «cradle to gate» (от истока до выхода), или «от колыбели до могилы», впервые предложенный в США в 1960 г.

Анализ жизненного цикла (Life Cycle Analysis – LCA) в современном виде заключается в количественной оценке использованных для производства продукции энергии и материалов, а также выбросов в окружающую среду [1, 2, 6–10, 14, 24]. Стадии жизненного цикла:

1. Получение сырья: добыча источника энергии и его переработка в энергию; добыча сырья; транспортировка сырья и энергии.

2. Производство продукции: подготовка сырья; изготовление продукции; производство попутной продукции; производственный рециклинг; упаковка; транспортировка продукции.

3. Использование продукции.

4. Глобальный рециклинг.

Для всех стадий ЖЦИ рассчитывают расходы энергии, материалов, транспортные издержки, выбросы в окружающую среду. Итог расчета ЖЦИ представляют в виде экологического баланса (экобаланса).

Количественный анализ движения элементов и веществ, охватывающий все этапы ЖЦИ, с самого начала был одним из основополагающих требований к экологическим балансам, которые включают в себя материальные балансы и «оценки действия». Общепринятые термины Life Cycle Assessment (LCA – оценка жизненного цикла) и Life Cycle Inventory Analysis (LCI – анализ-инвентаризация жизненного цикла) широко используются как в технической литературе, так и в законодательстве [1, 2, 6, 7, 24, 75, 76].

Концепция производства «металлургического экопродукта» с учетом всех стадий ЖЦИ была предложена в 90-х годах XX в. [77, 78]. В работе [78] отмечается, что в черной металлургии Германии данные

для составления экобалансов определяют по всем этапам производства начиная с 1992 г. По этому принципу были построены экобалансы упаковки [79], составленные экологическим ведомством, и полный экобаланс автомобильных деталей [80], составленный Институтом изучения и испытаний пластмасс при Штутгартском университете.

В 1994 г. опубликованы экобалансы металлургической продукции фирм Thyssen Stahl AG и Krupp AG. Были исследованы изделия из листового проката, используемые в автомобильной промышленности: электролитически оцинкованный стальной тонкий лист; горячеоцинкованный тонкий лист; холоднокатаный тонкий лист [81, 82]. Экобаланс охватывал 14 технологических этапов от добычи сырых материалов до рециклинга в виде лома. При этом были учтены около 1000 отдельных входных параметров, определены 13 потоков материалов и шесть потоков энергии, 29 типов выбросов и девять видов отходов, утилизируемых и депонируемых.

Аналогичный подход к составлению экобалансов для металлургической продукции реализован в Японии [83, 84], где он получил название «оценка жизненного цикла на основе анализа экологических сценариев». Оценку жизненного цикла на основе анализа сценариев, как правило, выполняют с привлечением модели ЖЦИ, в которой увязаны потоки материалов и процессы в сферах производства и потребления продукта.

Например, авторы работ [85, 86] исследовали способы переработки отходов пластмассы в черной металлургии и составили модели металлургических процессов с использованием пластика. Разработанная модель жизненного цикла включает и другие технологии оборотного использования пластмасс. На ее основе провели сравнительный анализ вариантов использования пластика в качестве сырья в доменной печи, дуговой сталеплавильной печи, других агрегатах черной металлургии, а также переработки отходов пластика в специальных процессах, в том числе ожижения и брикетирования со сжиганием в энергоустановках. Выполнили оценку жизненного цикла изделий из пластмассы (LCA) на основе анализа сценариев по критериям энергопотребления, выброса  $\text{CO}_2$  и финансовых затрат, связанных с переработкой пластика. В работах [87–89] на основе оценки жизненного цикла изучали эффективность энергосбережения и уменьшения выброса диоксида углерода в результате рециклинга отходов пластмас-

сы с их переработкой в химическое сырье в коксовых печах. Оценку жизненного цикла выполнили методом системной экспансии.

В России оценка ЖЦИ регламентируется системой ГОСТ на основе международной системы стандартов ИСО 14000 [6, 7, 14, 90–93]. Для расчета «жизненного цикла» продукции на действующем производстве предложена следующая схема:

- определение полного химического состава сырья и источников энергии;
- расчет выбросов при добыче сырых материалов;
- расчет транспортных выбросов при перевозке сырья;
- расчет выбросов в окружающую среду при производстве энергии;
- определение элементопотоков на предприятии;
- расчет параметров техногенного месторождения;
- расчет выбросов при производстве продукции;
- расчет рециклинга отложенного отхода на собственном или другом предприятии.

С позиции анализа и совершенствования экобаланса для металлургического продукта в настоящее время принято выделять четыре основных стадии ЖЦИ [6, 7, 70, 71]. Первая стадия включает в себя собственно процесс производства металлов. Здесь отрабатывается производственный процесс с минимальным энергопотреблением и нагрузкой на окружающую среду. Вторая стадия включает производственный процесс на предприятии – потребителе продукции металлургии. При этом рассматривается возможность уменьшения воздействия на окружающую среду применением специфических видов металлопродукции и металлообработки. На третьей стадии экологическая направленность проявляется в использовании конечных изделий из металлов с определенными качественными характеристиками. Четвертая стадия – этап утилизации лома металлов с целью их вторичного использования. На этой стадии обычно производится очистка лома и подготовка к переработке на металлургических предприятиях. На второй и последующих стадиях вклад в дело охраны среды реализуется в процессе использования металлургических продуктов как рыночного товара потребителями металлопродукции и конечных изделий. Здесь металлопродукция превращается в экопродукт, т.е. экологически ориентированный продукт или изделие. Природоохранный вклад экопродукта включает:



– формирование общества с оборотным использованием ресурсов (оборотное использование материалов, уменьшение массы отходов);

– ограничение выбросов веществ, создающих нагрузку на среду;

– уменьшение энергопотребления и выбросов CO<sub>2</sub>.

Повышение степени рециклинга при производстве стальных изделий признается важнейшим вкладом в ресурсосбережение и охрану окружающей среды в рамках международных тенденций построения общества с оборотным использованием ресурсов. В связи с этим Международный институт черной металлургии (IISI) учредил специальную рабочую группу (под руководством Общества немецких металлургов – VDEh), которая регистрирует положение дел с ломом во всем мире и разрабатывает методы по повышению степени рециклинга амортизационного лома [21].

По мнению специалистов IISI, количественное описание технологии рециклинга стальных изделий связано со значительными методическими проблемами. Фактические условия эксплуатации и переработки стальных изделий не могут быть отображены соответствующими замкнутыми оборотными циклами движения металлургических материалов. Например, для описания рециклинга в материальные балансы часто вводят так называемые записи в кредит или в дебет. Однако трудности возникают уже при определении критериев, по которым следует выбирать эти записи [24, 54, 71].

В работах [7, 8, 94–96] указывается, что при составлении экобалансов изделий из металлов (или включающих металлы) необходимо учитывать такие факторы, как «скрытый материалопоток» и «диффузивные металлы». Отмечается проблема количественного определения параметров материалопотока на стадиях потребления, утилизации, переработки. Переработка многих изделий, веществ и материалов после использования (сбор, хранение, предварительная обработка, транспортировка) в настоящее время, как правило, поручена потребителям. Поэтому в условиях неопределенного контроля и инспекции происходит смешивание бытовых и промышленных отходов. В результате выделить их в общем материалопотоке оказывается невозможно, и таким образом часть веществ и материалов рассеивается в форме скрытого материалопотока. Кроме того, некоторые вещества и материалы (в том числе металлы) не поддаются сбору и рециклингу. Такие вещества, склонные к

рассеянию, в западной специальной литературе называют диффузивными. Круг диффузивных металлов очень широк. Некоторые металлы, на первый взгляд пригодные для рециклинга, присутствуют в изделиях в виде микродобавок, поэтому их часто оставляют за рамками контроля. Это является характерным свойством диффузивных материалов.

Особо выделяют металлы, присутствующие в изделиях в малом количестве и не поддающиеся отслеживанию. Они примешиваются к материалам – объектам рециклинга и создают проблемы. Такие вещества и металлы тоже рассматривают как диффузивные. Кроме того, их часто называют «вагантами» (т.е. «бродячими металлами»). Во многих работах [14, 24, 54, 71, 94–96] отмечается, что правильное представление о материалопотоке с учетом диффузивности участвующих в нем веществ и металлов имеет важнейшее значение. Причем не только с точки зрения стабильного контроля над выбросами, способными вызвать существенное загрязнение природной среды, но и с позиции ухода от массового производства, массового потребления, массового образования отходов и построения общества с оборотным использованием ресурсов.

### **1.7. Инициатива 3R и новая парадигма черной металлургии**

В период после 2000 г. произошли принципиальные изменения в подходах к оценке эффективности использования и управлению вторичными ресурсами. Требования к продуктам, технологиям, вторичным материалам, выбросам, которые ранее формулировались изолированно друг от друга, теперь рассматриваются взаимосвязано, в рамках комплексных концепций Общества рециклинга и Экопродукта (табл. 1.5).

В июле 2004 г. на саммите Группы восьми (G8), проходившем в Си-Айленде, правительство Японии выдвинуло Инициативу 3R (Японский план действий по развитию мирового сообщества) в области обращения с отходами: *Reduce* – сокращение, *Reuse* – повторное использование, *Recycle* – использование в качестве вторичных ресурсов. Лидеры стран, входящих в G8, инициативу поддержали. В апреле 2005 г. в Токио состоялась международная конференция по проблемам эффективного использования вторичных ресурсов и переработке отходов, в которой принимали участие представители всех заинтересованных министерств и ведомств на уровне Группы восьми. На конференции была принята декларация о введении Инициативы 3R в действие [97–99].

Таблица 1.5

## Развитие концепции экологически чистого производства

Требования к продуктам, отходам, материалам	Требования к технологиям	Требования к предотвращению выбросов	Количественная оценка ЖЦИ
<i>80-е годы XX в.</i>			
Директива по отходам 75/442/ЕС. Закон о вторичных ресурсах, Япония	Концепция BAT – BPT	Кадастр токсичных выбросов TRI, США TA-Luft и PRTR – нормативные положения, ЕС и Япония	Методика расчета затрат ресурсов на технологические процессы «cradle to gate»
<i>1992 г. Конференция по ESID, Рио-де-Жанейро. Agenda 21</i>			
1994 г. Система каталогов отходов EWC – HWL, ЕС	1992 г. Директива ЕС по BREF	1994 г. Системы аудита EMAS и UVP – GVP, ЕС	Макроэкономическая система отчетности ООН. Индекс DUX
<i>1996 г. Конференция по ЭЧП, Оксфорд. Общепринятая трактовка терминов ЭЧП и ЖЦИ</i>			
1997 г. Принцип 3R, ЕС. Концепции эко-города и эко-комбината, Япония	1996 г. Директива 96/61/ЕС по IPPC. 1999 г. Концепция PI – EP	1996 г. Концепция ELV – WFD, ЕС. Международная серия стандартов ISO-14000, 1999 г.	Концепция экобаланса LCA – LCI, ISO-14040
<i>2000 – 2004 гг.</i>			
<p><i>Япония.</i></p> <p>Система законов о формировании Общества с оборотным использованием ресурсов. «Белая книга» – анализ глобального материалопотока экономики. Методология венозного потока ресурсов. «Зеленый фонд» – социальная ответственность производителей.</p> <p><i>Европейский Союз.</i></p> <p>IPP – интегрированная политика производства экопродукта. CSR – корпоративная социальная ответственность</p>			Оценка ЖЦИ на основе методологии анализа экологических сценариев
<p>2004 г. (саммит Группы восьми в Си-Айленде)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Введена в действие Инициатива 3R в области обращения с вторичными ресурсами и отходами: <i>Reduce</i> – сокращение, <i>Reuse</i> – повторное использование, <i>Recycle</i> – рециклинг</li> <li>Первоочередные задачи по реализации Инициативы 3R: <ul style="list-style-type: none"> <li>– совершенствование законодательно-правовой базы использования вторичных ресурсов,</li> <li>– разработка национальной политики содействия научным исследованиям в сфере 3R,</li> <li>– разработка национальной политики развития образования в направлении 3R,</li> <li>– разработка и внедрение новых технологий в сфере 3R.</li> </ul> </li> </ul> <p>2007 г. – директива REACH</p>			

В соответствии с принятой декларацией поддержка инициатив и мероприятий в сфере 3R является основополагающим условием построения в XXI в. Общества рециклинга. Поэтому на конференции была подтверждена насущная необходимость разработки ведущими индустриальными державами соответствующей национальной политики, поощряющей проведение научных исследований и внедрение инновационных технологий в сфере 3R. В качестве первоочередных задач по реализации Инициативы 3R в области обращения с вторичными ресурсами и отходами выделены следующие:

- разработка национальных стратегий построения общества, ориентированного на рециклинг и экологически чистые технологии,
- развитие и совершенствование законодательно-правовой базы,
- разработка и внедрение новых технологий производства экопродуктов.

Особенно важно отметить, что Инициатива 3R выделяет конкретные сферы государственного управления вторичными ресурсами и рекомендует опробованный на практике механизм поощрения социально ответственных производителей. Этот механизм заключается в предоставлении предприятиям, прошедшим аттестацию и вошедшим в так называемый Зеленый фонд производителей экопродуктов, государственных льгот на приобретение вторичных ресурсов [58, 70, 97–100].

Упомянутые сферы государственного управления применительно к черной металлургии определяются тремя основополагающими принципами: социальной ответственности производителей, социальных техногенных ресурсов, превентивного предотвращения экологических рисков [70, 97, 100].

Принцип социальной ответственности производителей, как уже отмечалось выше, заключается в аттестации предприятий черной металлургии с целью предоставления им льгот в снабжении или кредитовании приобретения вторичных ресурсов. Важнейшей составляющей аттестации предприятий является представление ими концепции управления потоками вторичных материалов (производственного рециклинга) [58, 100].

На встрече старших должностных лиц по вопросам реализации Инициатива 3R, прошедшей в октябре 2007 г. в Бонне (ФРГ) особо отмечалось, что ключом к реализации концепции 3R являются технологии. При этом речь идет не только о технологиях, обеспечивающих безопасность утилизации бытовых и промышленных отходов или повышающих возможности рециклинга вторичных ресурсов, а

о повышении эффективности технологий по всей цепочке: добыча сырья – транспортировка – производство – потребление – рециклинг. Все более актуальным в связи с этим становится внедрение принципов «экодизайна», когда возможности повторного использования, рециклинга, безопасной утилизации продукта закладываются на этапе проектирования [101, 102].

По существу в индустриально развитых странах в последние годы сформулирована новая парадигма черной металлургии (табл. 1.6). В ее основе – интенсификация использования вторичных ресурсов, минимизация выбросов всех видов, повышение степени извлечения железа в готовую продукцию как главный критерий увеличения материального и энергетического КПД в черной металлургии [17, 70, 97, 98, 100, 103].

Таблица 1.6

**Изменение парадигмы (общего стиля работы) черной металлургии**

Общество потребления	Общество рециклинга
Приоритет – природные ресурсы и индустриализация	Приоритет – вторичные ресурсы и окружающая среда
Цель инноваций – повышение производительности труда и эффективности использования природных ресурсов	Цель инноваций – повышение эффективности использования вторичных ресурсов
Окружающая среда должна приспосабливаться к технологии. Применение систем улавливания выбросов	Технология должна приспосабливаться к окружающей среде. Внедрение технологий предотвращения выбросов
Капиталовложения в расширение мощностей	Вложения в оптимизацию управления, уменьшение издержек и повышение качества
Кадры, материалы, финансы. Финансовый менеджмент	Кадры, информация, материалы, финансы. Технологический менеджмент
Конструирование процессов и технологий в расчете на расширение в будущем и долгосрочную рентабельность	Конструирование процессов и технологий в расчете на немедленное применение и краткосрочную рентабельность
Контроль качества	Внедрение концепции «всестороннего менеджмента качества»
Укрепление руководства предприятия путем многоуровневой иерархии. Вертикальная система принятия решений	Укрепление «основания предприятия» благодаря простой иерархии. Создание творческих коллективов на соответствующих уровнях внедрения инновационных решений

Определяющим принципом развития индустрии в XXI в. является устойчивое долгосрочное совершенствование и развитие технологических процессов. В конечном итоге целью деловой активности является:

- создание стоимости в рамках сбалансированного взаимоотношения с окружающей средой («сохранения прав природы»);
- организация сети снабжения вторичными ресурсами;
- выбор технологий, отвечающих принципам ЭЧП;
- осуществление контроля над воздействием своей продукции на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла;
- применение социальной политики, обеспечивающей реализацию принципов рециклинга и безопасного депонирования.

Ориентация на эффективное использование вторичных материалов, в том числе долгое время складываемых и хранящихся как отходы, потребовала от предприятий системного подхода в использовании природных и вторичных ресурсов. Системный подход необходим для того, чтобы «встроить» потоки техногенных материалов в уже существующие технологические схемы, не допуская при этом их значительного усложнения и ухудшения качества продукции. Решая поставленную перед ними задачу, металлургические предприятия руководствуются различными концепциями [104–111].

Принцип Социальных техногенных ресурсов (качество вторичных ресурсов – забота общества) предусматривает законодательно регулируемый срок эксплуатации металлоизделий, прежде всего продуктов, определяющих уровень жизни (товаров народного потребления). Поэтому амортизационный металлолом, который ранее использовался как «естественно возникающий материал», теперь рассматривается в качестве вторичного ресурса, с которым следует обращаться, опираясь на соответствующую законодательную базу. Соответственно, качество и оптимальный срок эксплуатации металлоизделий, обращение с отходами, сбор и обращение с вторичными ресурсами металлов и материалов в рамках современных концепций ЭЧП рассматриваются в качестве «социальных параметров», на которые можно эффективно влиять с помощью целенаправленного изменения законодательства и повышения уровня экологического образования [100, 103, 112–114].

Принцип превентивного предотвращения экологических рисков, которые могут возникнуть в будущем» начал реализовываться с принятием в 2007 г. Директивы REACH (контроль движения потенциально опасных веществ). Для регистрации продукта в рамках REACH

заявителю необходимо пройти идентификацию продукта не только на его состав, наличие примесей, таж, но и последующее применение. Это требует получения от потребителя продукта подтверждения на его дальнейшее использование. Таким образом, заявитель должен иметь «экологический сценарий» производства, применения, рециклинга или безопасного депонирования продукта после завершения срока его эксплуатации [73, 74, 97, 115].

Отметим, что в ЕС и Японии в последнее десятилетие активно проводили исследования в области методологии вторичных ресурсов металлов. Приведем две характерные цитаты, отражающие сущность разрабатываемых комплексных методик.

«Рециклинг амортизационного лома означает гарантированное снабжение сырьем и щадящее использование природных ресурсов. Сталь как материал имеет большие экологические преимущества. Новая концепция черной металлургии будет заключаться в следующем: целесообразно повышать долю стали в изделиях, масса которых не оказывает существенного влияния на затраты энергии и выбросы (например, стационарная электротехника, конструкции). Это обеспечит высокую долю рециклинга. Но при этом необходим соответствующий «социальный фон», потому что качество и уровень сбора (освоения) амортизационного лома – «забота общества». Она проявляется в совершенстве законодательства и уровне экологического образования» [112].

«В основе экономической стратегии развития черной металлургии в обществе рециклинга – опыт и информация, накопленные за прошлое столетие. К неотложным вопросам, требующим решения, относятся следующие. Необходимо проведение исследований связанных с примесями. Необходим корректный прогноз развития металлургии, связанный с возможностями работы с амортизационным металлоломом. Но главное – в экономическом обществе рециклинга требуется осознание социальной ответственности, базирующееся на непрерывном экологическом образовании, и жесткое выполнение законов» [100].

Во многих работах отмечается [100, 103–113], что для стальных изделий возможности оптимизации стадии жизненного цикла «изготовление продукта» незначительны, поскольку достигнутые технологические параметры близки к предельным значениям. Поэтому определяющий вклад в улучшение экобалансов для стальных продуктов может быть сделан на стадиях эксплуатации и рециклинга. На стадии эксплуатации актуальными направлениями исследований являются:

разработка продуктов и деталей с оптимизацией по массе, содержанию примесей и оптимальным сроком службы; на стадии рециклинга – разработка технологий повторного использования деталей и конструкций, селективный сбор лома сложного состава, экологически безопасная переработка мелкодисперсных отходов заготовки и подготовки лома к плавке. Наиболее важными сферами фундаментальных исследований признаются:

- разработка методологии анализа единого жизненного цикла стальных изделий, учитывающей стадию рециклинга;
- разработка и теоретическое обоснование количественных критериев, характеризующих соответствие технологии черной металлургии принципам концепции 3R.

## **1.8. Методология анализа техногенного элементопотока металлов**

С середины 90-х годов в МИСиС разрабатывается Ресурсо-экологическая концепция развития общества, которая является конкретизацией «концепции устойчивого развития» [6–8, 55, 56, 77, 116–119].

Основные положения ресурсо-экологической концепции:

1. Главная проблема развития современного индустриального общества – ограниченность практически всех видов ресурсов: энергетических, материальных, социальных, экологических. В настоящее время состояние окружающей среды является определяющим ресурсом индустриального общества.

2. Правильный выбор направления общественно-экономического развития и роль конкретных предлагаемых решений оценивается на основе расчета общего расхода ресурсов и определения лимитирующего ресурса. Расчеты проводятся на двух уровнях – глобальном и региональном.

3. В глобальном масштабе в качестве лимитирующего ресурса принимается состояние окружающей среды. На региональном уровне могут иметь место другие виды лимитирующего ресурса. В связи с тем, что ряд природных экосистем находится на грани уничтожения, затраты на их реабилитацию могут вызвать обоснованный временный рост расхода ресурсов.

4. Как правило, действие, вызывающее снижение потребления ресурсов, оказывает благоприятное влияние на состояние окружающей среды. Поэтому большая часть эффективных решений по защите



окружающей среды находится в сфере управления ресурсами, и заключается в совершенствовании технологий.

5. В решении проблемы снижения расхода материальных ресурсов основным направлением является рециклинг материалов.

6. Человеческое общество в результате своей производственной деятельности производит, в конце концов, только отходы – техногенные материалы. В связи с истощением природных ресурсов будущее цивилизации зависит от того, насколько эффективно человечество сможет использовать техногенные ресурсы.

Важнейшими практическими вопросами, вытекающими из ресурсоэкологической концепции, являются:

- количественная оценка ресурсов всех видов;
- разработка эффективной системы управления техногенными ресурсами на базе оптимизации количественных критериев оценки ЖЦИ.

В индустриально развитых странах обсуждались аналогичные (ресурсоэкологические) подходы, но завершённой общепризнанной концепции пока разработать не удалось [22, 71]. Например, чтобы оценить, как далеко какая-либо страна продвинулась на пути в будущее устойчивое общество, в документе «Agenda 21» было сформулировано требование создания статистических информационных систем. Комиссия ООН по устойчивому развитию разработала концепцию для макроэкономических систем отчетности, в основу которой были положены более 100 статистических показателей. Итоговый индекс (DUX), характеризующий состояние окружающей среды, складывается из суммы отдельных статистических показателей, оценивающих состояние климата, воздушного бассейна, почвы, рекреационной нагрузки, водного бассейна, расхода энергии и сырья [22]. В 90-х годах XX в. эта система испытывалась на пригодность в специально выбранных странах (21 страна).

Альтернативой упомянутого подхода является расчет так называемой интенсивности расходования ресурсов. Данная методология разрабатывается, в частности, в Германии [71]. В основе выполняемых расчетов находятся потоки материалов и энергии, включая рециклинг и диффузию элементов и веществ. Расход потребляемых природных ресурсов соотносится с масштабами национального производства. В результате экологические данные увязываются с экономической эффективностью. Благодаря такой методике можно установить, в какой степени расход ресурсов и материалов оправдывает масштабы экономического роста. При таком

подходе хорошие показатели имеют государства, в которых физическое использование ресурсов, как природных, так и вторичных, на единицу валового национального продукта постепенно уменьшается. Это доказывает, что экономический рост сам по себе не равнозначен более интенсивному расходованию ресурсов окружающей среды [22, 71].

Таким образом, можно констатировать, что основой современного подхода как к оценке эффективности использования различного рода ресурсов, так и к оценке техногенного воздействия производств на окружающую природную среду является принцип построения циклов или круговоротов химических элементов или материалов. Такой подход позволяет наиболее четко проследить причинно-следственные связи многофакторных природно-техногенных процессов. После того как были сформулированы понятия и рассчитаны круговороты ряда химических элементов – азота, серы, углерода, фосфора и др., имеющих особое значение для органических процессов на нашей планете, следующим логическим шагом в этой тенденции является введение понятия потока химического элемента или элементопотока [3–8, 14].

Важно отметить, что методология построения и исследования элементопотоков принципиально отличается от широко распространенной методологии построения материалопотоков. Построению материалопотоков с целью определения влияния на природную среду тяжелых металлов большое внимание уделялось в 90-х годах, но данная методология так и не стала общепризнанной [120–124]. Наоборот, в последние годы появляется все больше исследований, в которых отдается предпочтение изучению потоков элементов, как «глобальных» [125, 126], так и «технологических» [127].

С 2000 г. в Японии подробно анализируется техногенный элементопоток свинца [94]. Результаты анализа ежегодно публикуются в «Белой книге общества с оборотным использованием ресурсов» [59]. Характерные результаты получены авторами [125] при сопоставлении масштабов природного и техногенного элементопотоков фосфора. На основе большого массива исходных данных [128–135] показано, что «хозяйственная деятельность человека в XX веке коренным образом изменила глобальные миграционные потоки фосфора и многие негативные изменения окружающей среды – закономерное следствие интенсификации поверхностного стока фосфора». Сток общего фосфора с речной водой возрос в 4,5 раза, более 75 % его прироста – фосфор городских канализационных вод.

Необходимость разработки Методологии анализа техногенного элементопотока металлов вытекает из следующих соображений. В современных условиях все большее, а часто и определяющее значение, как в вопросах влияния на качество продукции, так и при образовании выбросов суперэкоотоксикантов, играют примесные, или микроэлементы, присутствующие в техногенном материале иногда в количестве всего лишь нескольких граммов на тонну материала. Окружающая человека среда становится все более сложной по номенклатуре химических соединений и материалов, не свойственных среде природной, и этот процесс продолжает развиваться.

В упомянутых условиях необходимо иметь не только максимально достоверную информацию об используемых и проектируемых технологических процессах, но и надежную основу для анализа и прогноза возможных социальных и экологических последствий принимаемых технических решений. Надежность подобного анализа может обеспечить только учет движения в рассматриваемой комплексной ноосферной (техногенно-природной) системе каждого химического элемента независимо от его количества, базирующийся на балансовом методе исследования и подтвержденный термодинамическими расчетами состава всех образующихся в системе фазовых составляющих. Количественная оценка этого движения отражается в виде элементопотока. На рис. 1.2 представлена принципиальная схема элементопотока на примере элемента, извлекаемого из природной среды в составе твердого минерала (такая форма извлечения является наиболее распространенной). Приведенная схема наглядно демонстрирует «глобальный» характер распределения элемента. Таким образом, техногенный элементопоток представляет собой совокупность всех количественно определенных параметров движения химического элемента в техносфере, включая:

- извлечение из сплошной природной среды (недр);
- транспорт и проверку сырья и продукции;
- производство и потребление энергии;
- все технологические стадии производства и потребления продукта;
- все формы обращения с отходами производства и потребления, в том числе их рециклинг и депонирование;
- распространение исследуемого элемента с выбросами во все природные среды.

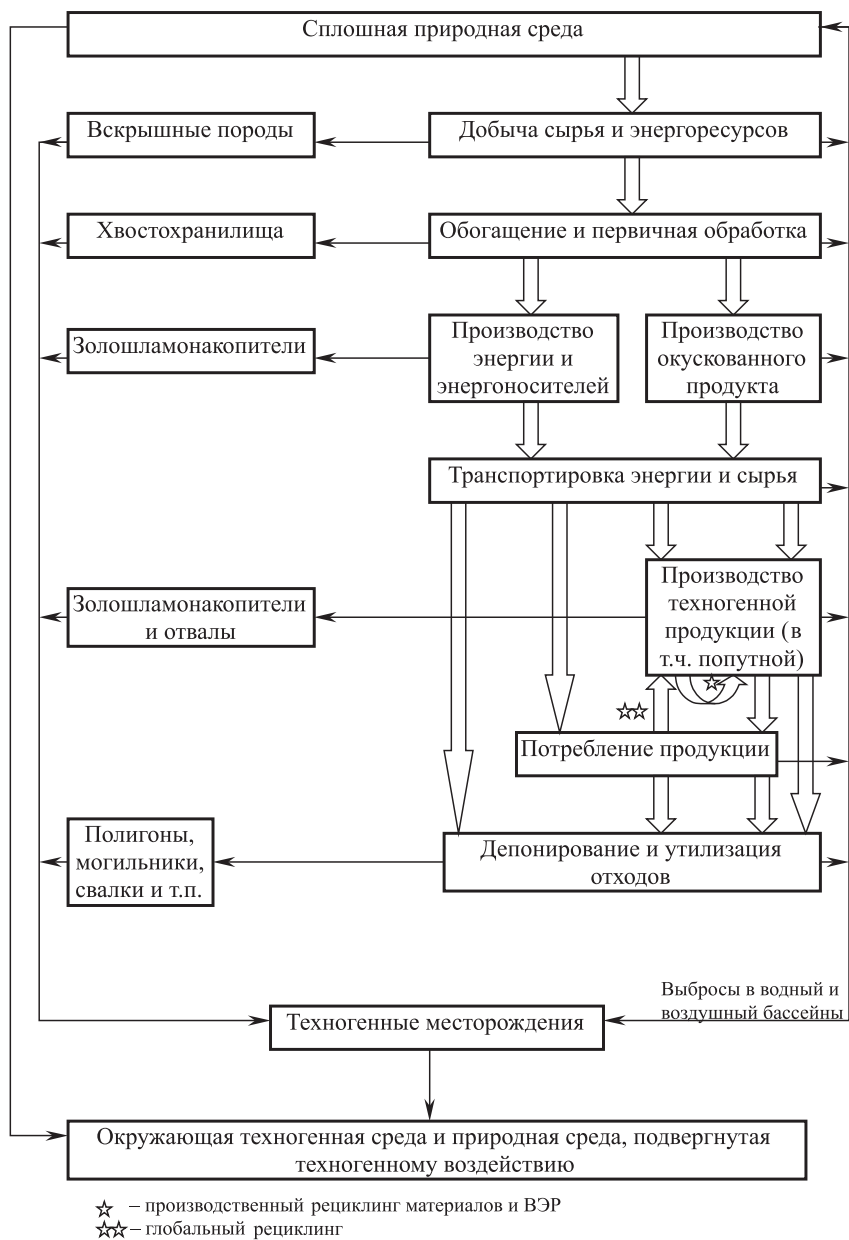


Рис. 1.2. Принципиальная схема элементопотока

В зависимости от цели и глубины проводимых исследований строятся следующие схемы техногенных элементопотоков:

- для отдельных составляющих глобальной схемы (для стадии добычи и подготовки ресурсов к потреблению, для транспортной, производственной или бытовой сферы);
- для различных географических регионов и территорий, в том числе используемых для складирования отходов;
- для конкретных производственных подразделений или агрегатов;
- для различных историко-географических условий.

Элементопотоки металлов могут подразделяться с учетом временного фактора:

- среднесуточные, среднемесячные, среднегодовые, «мгновенные»;
- интегральные за определенный период, например, за время функционирования какого-либо производственного предприятия.

Возможны следующие формы представления элементопотока: графическая, табличная, аналитическая.

В ходе формирования и развития методологии элементопотоков разработаны следующие методики, являющиеся ее составными частями (рис. 1.3).

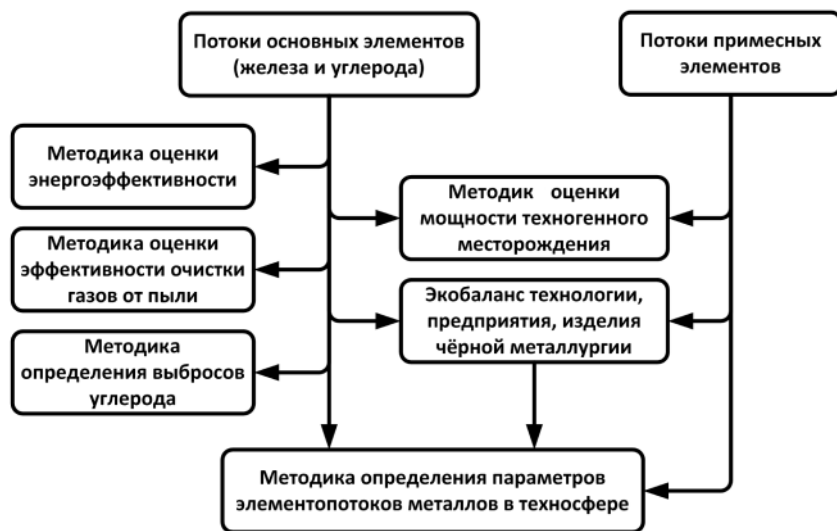


Рис. 1.3. Схема взаимосвязи разработанных методик

1. Методика определения параметров элементопотоков для предприятий черной металлургии (Ноу-Хау МИСиС № 4-202–2009 ОИС от 10 февраля 2009 г.).

2. Методика оценки мощности техногенного месторождения в металлургическом регионе [8, 55, 56, 136].

3. Методика оценки энергоэффективности производства черных металлов и выбросов CO<sub>2</sub> [8, 137–142].

4. Методика оценки эффективности очистки промышленных газов от пыли [143–145].

5. Методика определения параметров элементопотоков металлов в техносфере (Ноу-Хау № 3-202–2009 ОИС от 10 февраля 2009 г.) [8, 146–150].

6. Методика составления экобаланса технологии производства черных металлов [8, 77].

Выполнена комплексная ресурсоэкологическая оценка эффективности основных металлургических технологий производства чугуна и стали [151–154]. В целом методология элементопотоков является составной частью понятийного аппарата Ресурсоэкологической концепции развития общества (табл. 1.7).

Таблица 1.7

**Методология элементопотоков в структуре  
«Ресурсоэкологической концепции развития общества»**

Ресурсоэкологическая концепция		
Комплексная ресурсоэкологическая количественная оценка эффективности металлургических технологий		
Методология элементопотоков: – терминологический и понятийный аппарат анализа, – содержательная ориентация исследований, – математический и экспериментальный аппарат анализа.		
Ресурсоэкологические сценарии развития металлургических технологий и продуктов		
Ретроспективный	Современный	Прогнозный
Выявление глобальных тенденций развития	Анализ эффективности существующих технологий, определение направлений модернизации и развития	Анализ рисков инновационных технологий
Определение общих принципов принятия инженерных решений	Выработка критериев эффективного управления	Выработка критериев устойчивого развития в соответствии с принципами ЭЧП

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Ключевыми принципами в концепции ЭЧП являются:

- ресурсосбережение: уменьшение количества ресурсов всех видов (в том числе энергетических), используемых в процессах производства, эксплуатации и предоставления услуг;
- качество и оптимальный срок эксплуатации изделия или материала;
- организация эффективного глобального и производственного рециклинга;
- минимизация выбросов (в том числе вторичных) в окружающую среду на всех стадиях производства, потребления, рециклинга и депонирования продуктов и материалов;
- обращение с отходами всех видов, включая отходы производства и потребления.

2. Отличительной особенностью экологически чистого производства является отказ от применения систем очистки газов и воды от загрязнений как основного средства борьбы с выбросами и организация их превентивного подавления технологическими способами. Поэтому в оценку воздействия на окружающую среду должны входить расчеты возможных выбросов, которые должны основываться на двух фундаментальных принципах:

- составление материального баланса химических элементов на входе и выходе любой действующей техногенной системы;
- определение наиболее вероятного химического состава и физических свойств выбросов в окружающую среду.

3. В последнее десятилетие в передовых индустриальных странах приняты законы, нормирующие технологии переработки автомобилей, электробытовых и электронных, упаковочных, строительных и пищевых вторичных материалов. Таким образом, происходит активное преобразование прежней экономической системы с массовым производством продукции, массовым потреблением ресурсов и массовым образованием отходов в систему оборотного использования ресурсов. Законодательно закладывается фундамент экономической системы, ориентированной на рециклинг. В качестве приоритетных подходов в отношении вторичных ресурсов упомянутые законы определяют: 1) оборотное использование (*recycling*); 2) утилизацию (*reuse*), в том числе тепла; 3) восстановление вторичных материалов (*re-*

covery); 4) ограничение образования и безопасное для окружающей среды и человека депонирование отходов (*reduce*).

4. Формирование общества рециклинга осуществляется с помощью реализации концепции интегрированной политики производства продукта (экопродукта), которая предусматривает разработку комплексных экологических требований к изделию на протяжении всего его жизненного цикла, в особенности к фазе рециклинга (или депонирования) и качеству используемых природных и техногенных материалов. Стимулируемое государством активное инвестирование в область социальной ответственности означает со стороны инвесторов реализацию принципа: «Заранее предотвратить экологические риски, которые могут возникнуть в будущем». Для регистрации продукта в рамках REACH заявителю необходимо пройти идентификацию вещества не только на его состав, наличие примесей, таж, но и последующее применение. Таким образом, заявитель должен иметь экологический сценарий производства, применения и рециклинга продукта.

5. Metallургические процессы отличаются большой энергетической и материалоемкостью, и metallургическая отрасль в целом располагает уникальными возможностями с точки зрения реализации принципов глобального рециклинга. Таким образом, рециклинг на базе metallургического производства представляет собой глобальную стратегию, позволяющую организовать и эффективно управлять большими потоками вторичных ресурсов и связанными с этим факторами воздействия на окружающую среду.

6. Metallолом, который ранее рассматривался как естественно возникающий материал, после 2000 г. превратился во вторичный ресурс, с которым следует обращаться, опираясь на соответствующую законодательную базу. Некоторые специалисты относят его к категории «социальных техногенных ресурсов».

7. Определяющий вклад в улучшение эcobалансов для стальных продуктов может быть сделан на стадиях эксплуатации и рециклинга. На стадии эксплуатации актуальными направлениями исследований являются разработка продуктов и деталей с оптимизацией по массе, содержанию примесей и оптимальным сроком службы, на стадии рециклинга – разработка технологий повторного использования деталей и конструкций, селективный сбор лома сложного состава, экологи-



чески безопасная переработка мелкодисперсных отходов заготовки и подготовки лома к плавке.

8. Наиболее важными сферами фундаментальных исследований в области рециклинга признаются:

- разработка методологии анализа единого жизненного цикла стальных изделий, учитывающей стадию рециклинга;

- разработка методов комплексного количественного анализа жизненного цикла материалов и изделий черной металлургии с использованием методологии экологических сценариев с целью внедрения новых принципов управления движением вторичных ресурсов;

- разработка и теоретическое обоснование количественных критериев, характеризующих соответствие технологии черной металлургии принципам концепции 3R.

## **Глава 2. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТОПОТОКИ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОСФЕРЕ**

### **2.1. Ноосфера: движение вещества, энергии, информации**

По мнению специалистов различных областей фундаментальной и прикладной науки, современный период в развитии цивилизации может рассматриваться как начало преобразования биосферы в ноосферу. Это глобальное явление с позиций общего развития Земли развивается чрезвычайно быстрыми темпами [2–8, 155–157].

Согласно общепризнанному учению В. И. Вернадского ноосфера представляет собой высшую стадию развития биосферы, характеризующуюся сохранением всех присущих ей естественных закономерностей при максимальных возможностях общества удовлетворять материальные и культурные потребности человека и научной организацией техногенного воздействия на природную среду. Таким образом, ноосфера – это не просто общество, существующее в определенной среде, и не просто природная среда, подвергающаяся сильному воздействию общества, а нечто целое, в котором сливаются развивающееся общество и изменяемая природа. Возникает совершенно новый объект, в котором переплетаются законы живой и неживой природы, общества и мышления, а «геохимические функции человечества» характеризуются масштабами его производственной деятельности.

В современном понимании геохимическая деятельность человечества (техногенез) представляет собой процессы перемещения (перераспределения), происходящие в результате технической деятельности людей. После исследований В. И. Вернадского, показавших, что особенностью биосферы является неразрывная связь и взаимопроникновение живых организмов и неживой материи, и в качестве важнейшего вывода, декларировавшего, что «...человек становится крупнейшей геологической силой», насущной задачей стала необходимость количественных оценок «геологической силы человека» [9–12].

Для исследования процессов взаимодействия человека с природой используется понятие о самостоятельной оболочке Земли – техносфере. Вместе с тем общепринятое определение техносферы до сих пор отсутствует. По определению Акимовой и Хаскина (1998): «Техносфера – «техническая оболочка» – искусственно преобразованное про-

странство планеты, находящееся под воздействием продуктов производственной деятельности человека. Техносфера – это глобальная совокупность орудий, объектов, материальных процессов и продуктов общественного производства» [3]. По определению, предложенному Юсфиным (2002), под техносферой понимается «пространство, в котором к основным процессам, определяющим ход развития, наряду с природными следует отнести антропогенные. Геометрически эта оболочка включает в себя часть экосферы, освоенную человеком» [8]. По определению Карабасова и Чижиковой (2006) техносфера представляет собой «часть биосферы, преобразованную в технические и техногенные объекты», т.е. тождественна артеприродной среде [7].

По различным оценкам общая масса техносферы составляет около 20 Гт [3–7]. Основную ее часть образуют скопления пустой породы горных разработок, отработанных руд, перемещенных грунтов, производственных отходов, оставленные сооружения, развалины, культурные слои на земле и под землей, т.е. накопившееся за всю историю человечества техногенное вещество.

Современные исследователи процессов техногенеза подчеркивают, что использование природного сырья неразрывно связано с уровнем технологий и инновациями. Выполненные авторами [58–164] расчеты показывают, что каждым жителем Германии за всю жизнь, средняя продолжительность которой составляет 78 лет, потребляется около 1000 т сырья (2001 г.). В среднем на одного жителя стран западного мира в год требуется около 15 т сырья, а в развивающихся странах с переходной экономикой этот показатель примерно в 10 раз ниже (2001–2005 гг.). Однако Китай, Индия, страны Юго-Восточной Азии и Латинской Америки быстрыми темпами развивают свою промышленность, и разрыв в потреблении ресурсов в разных регионах мира быстро сокращается [158–161].

Оценка материальных потоков на уровне отдельной страны может служить наиболее объективным индикатором ее устойчивого развития [12, 22, 24, 41, 59]. Количественная оценка приращения техносферы ежегодно производится в Германии (с 1991 года), Японии и США (с 2000 г.), Италии (с 2005 г.). К сожалению, при этом используются разные методики и учитываются различные балансовые статьи. Однако в целом для передовых индустриальных стран можно отметить прирост техносферы, главным образом за счет строительства зданий,

дорог, развития инфраструктуры, в размере около 10 т на человека в год. При этом доля металлов (по сути, стальных изделий) составляет от 3 до 7 % (от 300 до 700 кг/чел. в год).

Все вещества в биосфере мигрируют в рамках биогеохимического цикла, или круговорота. Принято выделять два основных круговорота: большой (геологический) и малый (биологический). Круговорот элементов рассматривается [2–8, 14, 147] в качестве важнейшего параметра устойчивости биосферы и, как правило, определяется в виде суммы трех основных компонентов:

$$G = G^S + G^{db} + G^{dg},$$

где  $G^S$  – запас элементов в антропосфере (техносфере);  $G^{db}$  – баланс элементов в малом биологическом круговороте;  $G^{dg}$  – баланс элементов в большом геологическом круговороте.

Участие элементов в биологическом круговороте характеризуется показателями биофильность (Bf) и биотичность (Bt) [4–8]. Показатель биофильности элементов представляет собой отношение содержания элемента в золе растений к кларку литосферы. Показатель биотичности элементов, оценивающий полноту биогеохимической связи с биосферой в целом, представляет собой отношение содержания элемента в живом организме к кларку биосферы. Чем выше показатель биотичности, тем интенсивнее растения накапливают данный элемент. В группу, характеризующуюся высокой биотичностью ( $>0,5$ ), входят элементы с относительно высокими (K, Ca), средними (S, Cl, P) и низкими (Ba) кларками биосферы. Наименьшая биотичность свойственна элементам с очень высокими кларками биосферы (Si, Fe, Al).

С развитием техносферы биогеохимические циклы трансформировались в технобиогеохимические. Для создания необходимой продукции и получения энергии человек находит, добывает и перемещает к местам переработки необходимые природные ресурсы, вовлекая их в ресурсный круговорот или ресурсный цикл. Ресурсный цикл часто определяется как «совокупность превращений и пространственных перемещений определенного вещества или группы веществ, происходящих на всех этапах использования его человеком» [4–8, 164–168].

В природопользовании выделяют несколько ресурсных циклов, которые, несмотря на относительную самостоятельность, тесно связаны друг с другом. Например, известны и проанализированы циклы:

– почвенно-климатических ресурсов и сельскохозяйственного сырья и продукции;

– природных материально-сырьевых ресурсов;

– энергетических ресурсов;

– природных биологических ресурсов.

Эффективность организации антропогенных ресурсных циклов требует контроля ряда процессов, который еще не нашел свое место в системе управления ресурсами. Для этой цели предлагаются некоторые характеристики и показатели.

Потенциал самоочищения – геохимическая характеристика – способность геохимического ландшафта без самоуничтожения разлагать отбросы и отходы, устранять их вредное влияние на природу. Потенциал самоочищения в основном определяется особенностями самого ландшафта, в частности, развитием в его пределах различных живых организмов [5–7].

Рекреационная нагрузка – степень влияния людей (их транспортных средств и строительства) на природные (биогенные) ландшафты или рекреационные объекты – выражается числом людей (человеко-дней) на единицу площади в единицу времени [5–8].

Технофильность – отношение годовой добычи элемента к его кларку (фоновому содержанию) в земной коре. Показатель введен А. И. Перельманом. Коэффициент технофильности ( $K_t$ ) представляет собой отношение ежегодного объема добычи элемента к его кларку:

$$K_t = Q_t / K_t,$$

где  $K_t$  – коэффициент технофильности;

$Q_t$  – ежегодный объем добычи элемента;

$K_t$  – кларк этого элемента.

Коэффициент технофильности является мерой использования данного элемента и может изменяться со временем. Наиболее высокую технофильность имеют С, Pb, Hg, Ni, Cu. С позиций геохимии в современных условиях преобразования биосферы в ноосферу именно для элементов с высокими коэффициентами технофильности должны происходить наибольшие изменения миграционных потоков.

Коэффициент техногенной фиксации ( $K_f$ ) [4–8] равен отношению объема добычи элемента из недр земли ( $Q_1$ ) к объему его рассеивания за то же время ( $Q_2$ ):

$$K_f = Q_1/Q_2$$

где  $K_f$  – коэффициент техногенной фиксации;

$Q_1$  – объем добычи элемента из недр земли;

$Q_2$  – объем рассеивания элемента за то же время.

Показатель относительного использования химических элементов представляет собой отношение количества элемента (в тоннах), поступающего в любой форме нахождения в определенный регион (страну, область, город) в течение года к его истинному кларку. При подсчете показателя учитывается поступление элементов из других регионов в виде сырья, различных машин, механизмов, продуктов питания [4–8, 14].

Показатель относительного техногенного накопления химических элементов представляет собой отношение количества элемента (в тоннах), накопившегося в ландшафте или в его определенной части в результате техногенеза, к кларку (местному фоновому содержанию) этого элемента в аналогичном природном ландшафте, не испытывающем техногенного воздействия [4–8, 14].

При постоянно возрастающей скорости перехода биосферы в ноосферу проблемы объективной комплексной оценки состояния окружающей среды и разработки научно обоснованного прогноза изменений, происходящих под воздействием антропогенной деятельности, становятся все более актуальными. Это в первую очередь обуславливается непрерывно возрастающим загрязнением биосферы, сопровождающим различные техногенные процессы. Без объективной комплексной оценки невозможно как принятие научно обоснованных решений, связанных с охраной окружающей среды, так и рациональное использование природных ресурсов [3–8, 14, 165–168].

Ноосфера подразумевает необходимость мониторинга и управления движением вещества, энергии и информации в масштабе, как минимум, биосферы и антропосферы (техносферы). Движение (круговорот) элементов в большом технобиогeoлогическом круговороте реализуется в подвижных средах (миграционными потоками). Особо выделяют следующие миграционные потоки:

- гидросферный перенос (поверхностными, подземными и океаническими водами);
- атмосферный перенос;

- техносферный перенос (в результате промышленной деятельности и торговли).

Скорость движения элементов в технобиогеохимическом потоке зависит от свойств элементов, среды потока, ландшафтных условий. Технобиогеохимические потоки приводят к существенному перераспределению элементов в биосфере – дифференциации. Характер (обеднение или аккумуляция) и уровень дифференциации оценивается кларком концентрации. Кларк концентрации некоторого элемента  $KK_i$ :

$$KK_i = [C_i]/K_i$$

где  $[C_i]$  – концентрация элемента в конкретном объекте;

$K_i$  – кларк того же элемента.

В связи с развитием техносферного переноса скорость движения элементов в технобиогеохимическом потоке во все большей степени определяется социальными факторами и может практически контролироваться и управляться с помощью законодательства [69–171].

Функционирование техносферы, представляющей собой глобальную динамическую систему, основано на взаимодействии трех потоков: вещества, энергии и информации. Соотношение между потоками вещества, энергии и информации как в живом организме, так и в технологическом процессе, производстве, экономике в целом определяет важнейшие количественные и качественные характеристики деятельности системы. Поэтому в последние десятилетия активно предпринимаются попытки установления функциональной связи информации с веществом и энергией и количественного описания основных техногенных потоков, а также количественной оценки взаимодействия природных и техногенных миграционных потоков [6–8, 14, 147].

## 2.2. Металлизация биосферы

Важнейшей отличительной чертой переходного (из биосферы в ноосферу) периода является существенное увеличение массы химических элементов, прежде всего – металлов, мигрирующих в форме техногенных соединений, не имеющих природных аналогов. Больше всего производится, а следовательно, постепенно и рассеивается преимущественно в техногенных ландшафтах черных металлов – железа и сплавов на его основе. Интенсивность миграции железа за послед-

нее столетие увеличилась более чем в сто раз. В еще большей мере возросла интенсивность миграции рассеянных химических элементов. До начала формирования ноосферы они практически не добывались, а их рассеяние происходило из сплавов, в которых они присутствовали в виде случайных примесей. За последние 50 лет добыча большинства металлов и, следовательно, интенсивность их миграции возросли в десятки, сотни и даже тысячи раз [174–176].

Для обобщенной оценки массы металлов, накопленных в техносфере, введено понятие «коэффициент будущего загрязнения» [5–8, 94–96]. Он представляет собой отношение массы некоторого металла «присвоенного обществом» (т.е. находящегося в техносфере) к массе этого металла, присутствующего в природной среде в естественном состоянии (т.е. кларку концентрации элемента в биосфере).

Коэффициент будущего загрязнения превышающий единицу имеют: ртуть – 90; свинец – 71; медь – 60; цинк – 20; теллур – 15; кадмий – 10; мышьяк – 5; молибден – 4; хром – 3; никель – 2; олово – 2. Остальные металлы характеризуются коэффициентом меньше единицы.

Вторая половина XX в. характеризуется резко возросшей интенсивностью и дальностью техногенной (социальной) миграции химических элементов. Она стала соизмеримой с другими видами миграции, происходящими в биосфере. Ее последствия – формирование технобиогеном – локальных геохимических аномалий с концентрациями некоторых химических элементов, иногда в тысячи раз превышающими их кларковое содержание, и региональных геохимических аномалий, захватывающих сотни тысяч квадратных километров [172, 173].

В настоящее время практически все значительные по размерам селитебные ландшафты рассматриваются как крупные технобиогео-мы, образовавшиеся в результате осаждения коллоидных частиц из атмосферного воздуха, гидросферного переноса сточными и подземными водами, формирования и перемещения техногенных грунтов. Основными источниками этих частиц являются промышленные предприятия, транспорт, сельское хозяйство. Техногенный вклад в формирование технобиогеном характеризуется факторами обогащения (интенсивностью техногенного переноса).

Фактор обогащения при переносе элементов из атмосферы (на землю или поверхность океана) определяет тот предел, до которого атмосфера привносит элемент сверх природного (фонового) уровня:



$$EF_a = (J_m/C_m)/(J_{im}/C_{im}),$$

- где  $EF_a$  – фактор обогащения при переносе из атмосферы на поверхность земли или океана;
- $J_m, J_{im}$  – средний поток (осадки) из атмосферы на землю или поверхность океана соответственно элемента  $m$  и индексного элемента  $im$ , в качестве которого обыкновенно используется алюминий, поскольку он циркулирует в атмосфере без заметных антропогенных изменений);
- $C_m, C_{im}$  – концентрация соответственно элемента  $m$  и индексного элемента  $im$  на поверхности земли (в почве) или в морской воде.

Фактор обогащения при переносе элементов водной средой (посредством рек)

$$EF_w = (C_w/C_s)_m/(C_w/C_s)_{im},$$

- где  $EF_w$  – фактор обогащения при переносе реками;
- $(C_w)_m, (C_w)_{im}$  – средняя концентрация элемента  $m$  и индексного элемента  $im$  в пресной воде;
- $(C_s)_m, (C_s)_{im}$  – средняя концентрация элемента  $m$  и индексного  $im$  в почве.

Фактор  $EF_w$  не учитывает транспортировку элементов через донные отложения и растворимость элементов в пресной воде.

Низкие значения факторов обогащения при переносе из атмосферы на поверхность океана (за исключением Pb) являются доказательством того, что техногенный поток элементов из атмосферы в океан незначителен. В случае переноса элементов из атмосферы в почву обнаружены значительные техногенные отложения ( $EF_a > 100$ ) для Pb, Sb, Cu, Zn и особенно высокие для Hg, Cd (значения фактора обогащения равны 1972 и 5917 соответственно). Доказана значимость техногенного переноса реками Ag, Hg, Mo [4, 169].

В соответствии с разработанной методикой определения глобальных элементопотоков металлов в природной и техногенной среде их движение, связанное с физическим или химическим превращением веществ, может быть описано с помощью следующих основных зависимостей:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}^{\text{пг}} + \mathcal{E}^{\text{пб}} + \mathcal{E}^{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{в}}^{\text{т}},$$

где  $\mathcal{E}$  – глобальный элементопоток металла в природной и техногенной среде;

$\mathcal{E}^{\text{пг}}$  – поток элемента в рамках большого геологического цикла миграции (БГЦМ);

$\mathcal{E}^{\text{пб}}$  – поток элемента в рамках малого биологического цикла миграции (МБЦМ);

$\mathcal{E}^{\text{т}}$  – поток элемента в техносфере;

$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}}$  – поток элемента на границе природной и техногенной сред (своеобразный трансграничный перенос), возникающий вследствие потребления человечеством природных ресурсов;

$\mathcal{E}_{\text{в}}^{\text{т}}$  – трансграничный перенос выбросов из техногенной среды в природную, диссипация металлов.

Геологический цикл миграции можно подразделить на стадии движения металлов в основных природных средах: атмосфере ( $\mathcal{E}_{\text{а}}^{\text{пг}}$ ), гидросфере ( $\mathcal{E}_{\text{г}}^{\text{пг}}$ ), литосфере ( $\mathcal{E}_{\text{л}}^{\text{пг}}$ ), и соответствующие трансграничные потоки между средами: перенос атмосфера – гидросфера ( $\mathcal{E}_{\text{аг}}^{\text{пг}}$ ), атмосфера – литосфера ( $\mathcal{E}_{\text{ал}}^{\text{пг}}$ ) и т.п. Тогда элементопоток металла в рамках большого геологического цикла миграции можно записать следующим образом:

$$\mathcal{E}^{\text{пг}} = \mathcal{E}_{\text{а}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{г}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{л}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{аг}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{ал}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{га}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{гл}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{ла}}^{\text{пг}} + \mathcal{E}_{\text{лг}}^{\text{пг}}.$$

Движение металла в техносфере описывается следующими зависимостями:

$$\mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}} = \mathcal{E}_{\text{сп}}^{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{тм}}^{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{в}}^{\text{т}},$$

$$\mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{т}} = \mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{сп}} + \mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{тм}},$$

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}} = (\mathcal{E}_{\text{сп}}^{\text{т}} - \mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{сп}}) + (\mathcal{E}_{\text{тм}}^{\text{т}} - \mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{тм}}) + \mathcal{E}_{\text{в}}^{\text{т}},$$

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{сп}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{тм}} + \mathcal{E}_{\text{в}}^{\text{т}},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{т}}$  – поток элемента с природными ресурсами, вовлекаемыми в сферу производства;

$\mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{т}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{сп}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{вр}}^{\text{тм}}$  – потоки элемента с вторичными ресурсами, соответственно, суммарный, из сферы потребления, из техногенных месторождений;

- $\mathcal{E}_{\text{сп}}^T$  – поток элемента с продуктами производства в сферу потребления;
- $\mathcal{E}_{\text{тм}}^T$  – поток элемента с отходами производства и потребления, формирующими техногенные месторождения.

Принципиальная схема взаимодействия циклов миграции элементов и веществ в биосфере и техносфере приведена на рис. 2.1. Большое количество исследовательских материалов позволяет выполнить количественную компиляционную оценку технобиогеохимических потоков некоторых элементов – металлов.

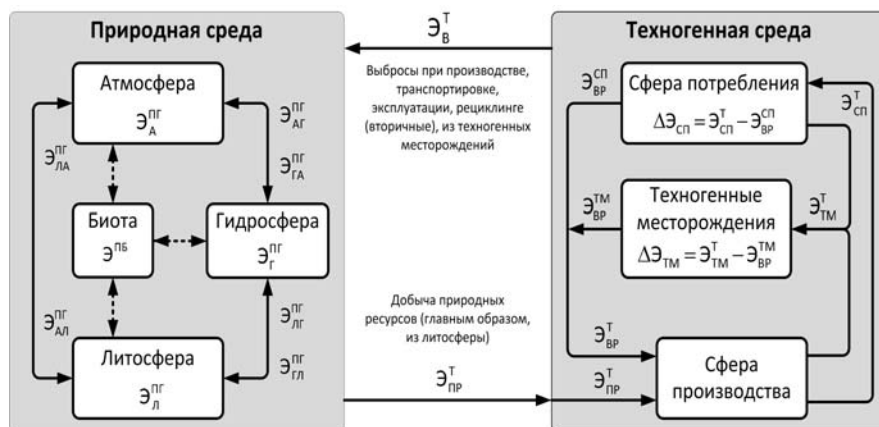


Рис. 2.1. Взаимодействие циклов миграции элементов и веществ в биосфере и техносфере

## 2.3. Глобальный элементопоток железа

Масса железа в земной коре оценивается в 755 трлн т [177]. В результате вулканической деятельности в литосферу ежегодно поступает около 3 млрд т железа в виде магматических расплавов, причем почти 90 % приходится на подводные вулканы. Значительное количество железа содержится в железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Мирового океана. Химический состав океанских конкреций крайне разнообразен: в них в тех или иных количествах присутствуют практически все элементы периодической системы. В табл. 2.1 приведены средние содержания главных рудных элементов в морских ЖМК и в глубоководных пелагических осадках [178, 179].

Таблица 2.1

**Средний химический состав железомарганцевых конкреций Мирового океана**

Элемент	Диапазон содержания, % масс.	Среднее содержание, %				
		Океаны			Моря	Глубоководные осадки
		Тихий	Индийский	Атлантический		
Mn	0,04...50,3	21,600	15,25	13,250	5,300	0,300
Fe	0,3...50,0	10,400	14,20	17,000	19,100	3,800
Ni	0,08...2,48	0,900	0,430	0,320	0,015	0,010
Cu	0,003...1,9	0,600	0,250	0,130	0,003	0,024
Co	0,001...2,53	0,260	0,210	0,270	0,010	0,006
Zn	0,01...9,0	0,110	0,149	0,123	0,010	0,013
Pb	0,01...7,5	0,074	0,100	0,140	0,003	0,004
Mo	0,0007...0,22	0,040	0,030	0,037	0,010	0,001

Проблема генезиса ЖМК сопряжена с оценкой скорости их роста [180]. Согласно результатам датирования конкреций традиционными радиометрическими методами скорость их роста оценивается миллиметрами за миллион лет, т.е. намного ниже скоростей отложения осадков. По другим данным, в частности по возрасту органических остатков и по изотопному составу гелия, конкреции растут в сотни и тысячи раз быстрее и могут, как предполагают, оказаться моложе подстилающих осадков [181].

Окраинные районы океанов являются «фабрикой», поставляющей Mn и Fe в океан. В морские и океанические воды металлы попадают в том числе и при подводных вулканических процессах как в виде примеси в породообразующих и акцессорных минералах, так и из флюидов. Во флюидах подводных гидротермальных систем (курильщики) содержание металлов в 10–50 раз выше, чем в океанической воде. В ламинарной части гидротермального факела происходит образование свежего гидроксида железа, который является сильнейшим сорбентом [182]. Он, как и другие сорбенты, захватывает металлы. Осаждение гидроксида железа приводит к обогащению осадков этими металлами.

Транспортировка вещества с континентов в океанические бассейны осуществляется в виде механического переноса ( $18,4 \cdot 10^{15}$  г/год) и переноса в растворенном виде ( $4,3 \cdot 10^{15}$  г/год). Большая часть вещества переносится реками: 87 % от механического переноса и 91 % от

переноса в растворенном виде [183]. Исходя из содержания металла в верхней континентальной коре, можно оценить его общий снос за год в бассейны накопления.

В настоящее время скорость химической эрозии на различных континентах различается в 3–4, а механической – примерно в 25 раз, что определяется тектонической активностью и климатом региона. От этого зависит количество и характер вещества, сносимого в разные части Мирового океана. На длительность нахождения элемента в природных водах существенно влияет величина электростатического действия энергии связи элемент – кислород. Путем геохимических сопоставлений доказано, что основная часть (62...88 %) Fe, Mn, Pb, Zn поступает в глубоководные осадки из гидротермальных источников, в то время как основная часть других металлов (54...94 %) Ba, Ni, Co, Zr, La, Sm – из океанской воды [182, 183].

В связи со сложностью количественной оценки движения железа с мантийными флюидами и при формировании океанических конкреций эти процессы в глобальном элементопотоке железа не учитывались.

Содержание железа в почвах колеблется от 2 до 550 мг/кг [184]. Среднее значение концентрации железа в органическом веществе педосферы составляет 200...300 мкг/г сухого вещества. В целом масса железа в педосфере оценивается в 31,436 млрд т [185]. В зонах металлургических комбинатов (производительностью свыше 5 млн т стали в год) в твердых выбросах содержится от 22 000 до 31 000 мг железа на 1 кг пыли. Поэтому в прилегающие к комбинатам почвы ежегодно поступает до 31...42 мг железа на 1 кг сухого вещества [186, 187].

Железо, растворенное в природных и техногенных водах, представлено соединениями, находящимися в ионной форме, в виде гидроксокомплекса и комплексов с растворенными неорганическими и органическими веществами природных вод. Содержание железа в поверхностных водах суши составляет десятые доли миллиграмма, вблизи болот – единицы миллиграммов. Наибольшие концентрации железа (до нескольких десятков и сотен миллиграммов в 1 дм<sup>3</sup>) наблюдаются в подземных водах с низкими значениями pH.

Интенсивность миграции железа в подземных водах зоны гипергенеза [132, 188]:

- содержание в водах –  $5,47 \cdot 10^{-4}$  г/л;
- содержание катионов железа ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) в речных водах – 0,04 мг/кг.

Главными источниками соединений железа в поверхностных водах являются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением. Значительные количества железа поступают с подземным стоком и со сточными водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и с сельскохозяйственными стоками (табл. 2.2).

По данным [189] содержание железа в речных водах и озерной воде составляет  $\sim 10^{-4} \%$ , в морской воде  $\sim 2 \cdot 10^{-7} \%$ , в подземных водах  $\sim 10^{-5} \%$ .

Таблица 2.2

Содержание железа в источниках воды [132, 188, 189]

Источник воды	Объем, км <sup>3</sup>	Масса воды, т	Содержание железа	
			% масс.	т
Океаны, моря, и заливы	$1,338 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2,74 \cdot 10^9$
Грунтовые воды	$2,34 \cdot 10^7$	$2,34 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^9$
Реки	$2,12 \cdot 10^3$	$2,12 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^6$
Озера	$7,5 \cdot 10^5$	$7,50 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^8$

Таким образом, суммарное количество железа в гидросфере составляет  $5,83 \cdot 10^9$  т. Годовой речной сток оценивается [178] в  $991 \cdot 10^6$  т железа в год, из которого  $963 \cdot 10^6$  т составляют взвешенные формы, а  $28 \cdot 10^6$  – растворенные.

Естественными источниками выбросов железа в атмосферу являются вулканическая деятельность, выветривание горных пород, выдувание почвы, дым от лесных и степных пожаров, метеоритная пыль. Принято считать, что средняя концентрация естественной пыли в атмосфере в настоящее время не подвержена значительным колебаниям [190, 191]. В табл. 2.3 представлено количество аэрозолей, поступающих от различных источников [190], и содержание в них железа.

подавляющая часть пыли аэрозолей быстро оседает с крупными частицами, и над континентом в атмосфере постоянно находится около 1 % этого количества [191]. Таким образом, количество железа, постоянно находящегося в атмосфере, составляет  $13,38 + 3,56 = 16,94 \%$ , или 0,17 млн т (табл. 2.4).

Таблица 2.3

**Количество аэрозолей и содержание в них железа [190, 191]**

Источник образования аэрозолей	Количество аэрозолей, млн т/год	Среднее содержание железа в аэрозолях, %
Почвенная пыль	200...300	0,025
Вулканы	70...80	4,65
Лесные пожары	70...75	0,02
Сжигание топлива	24...30	4,65
Металлургия	12...15	60
Сельское хозяйство	4...5	0,02
<b>Всего</b>	<b>730...1145</b>	<b>69,4</b>

Таблица 2.4

**Мировое поступление железа в атмосферу, млн т/год**

Источник поступления	Масса железа млн т/год	%
<i>Природные источники</i>		
Выветривание почв	0,06	1,76
Вулканическая пыль	3,48	97,83
Лесные пожары	0,02	0,41
<b>Всего</b>	<b>3,56</b>	<b>100</b>
<i>Антропогенные источники</i>		
Сжигание топлива	1,25	13,5
Черная металлургия	8,13	86,4
Другие отрасли индустрии и сельского хозяйства	4,00	0,01
<b>Всего</b>	<b>13,38</b>	<b>100</b>

**Поведение железа в биосфере.** Железо присутствует в организмах всех животных и в растениях (в среднем около 0,02 %); оно необходимо главным образом для кислородного обмена и окислительных процессов. Железо активно вовлекается в биологический круговорот, так как входит в состав многих ферментов. Характерные содержания железа в организмах животных и в растениях представлены в табл. 2.5 [184, 189, 192]. Таким образом, суммарное количество железа, постоянно находящегося в биосфере, составляет 487,5 млн т. В биоте суши находится 485,89 млн т железа, а 1,613 млн т – в океане.

Таблица 2.5

**Характерные содержания железа в организмах животных и в растениях**

Объекты биосферы	Масса, т	Пределы содержания железа, % масс.	Используемое в расчетах значение, % масс.	Масса железа, т
Морские животные	$28,1 \cdot 10^9$	$10 \cdot 10^{-4} \dots 90 \cdot 10^{-4}$	$50 \cdot 10^{-4}$	$1,405 \cdot 10^6$
Морские растения	$1,89 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^{-4} \dots 200 \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$	$0,208 \cdot 10^6$
Животные суши	$1,94 \cdot 10^{10}$	0,02	0,02	$3,89 \cdot 10^6$
Растения суши	$2,41 \cdot 10^{12}$	0,02	0,02	$482,0 \cdot 10^6$

**Железо, мигрирующее в ходе биологических процессов.** Поскольку масса растений суши составляет  $\sim 98$  % от общей массы биоты, то в расчетах учитываем только движение железа в процессах жизнедеятельности растений. Захват железа растительностью оценивается количеством  $516 \text{ кг/км}^2$  в течение года [189, 190]. Общая площадь земельного фонда всей планеты составляет  $134 \text{ млн км}^2$  [193], а площадь суши, на которой осуществляется вовлечение железа в биологический круговорот –  $75$  % от общей площади суши или  $100,5 \text{ млн км}^2$ . В этом случае количество железа в биологическом круговороте составит:  $100,5 \cdot 10^6 \cdot 0,516 = 51,9 \cdot 10^6 \text{ т}$  железа в год, что подтверждается данными источника [178], согласно которым, вовлечение железа в биологический круговорот достигает  $34 \cdot 10^6 \text{ т/год}$ .

Схема элементопотока железа в природной среде, приведенная на рис. 2.2, не учитывает движение железа с магматическими флюидами и рассолами, поступающими из недр земли, и в результате тектонической деятельности. Этот элементопоток можно назвать своеобразным «мгновенным» природным элементопотоком, так как масштабы годового переноса железа учтенными природными средами представляют собой малую величину по сравнению с длительностью большого геохимического цикла миграции элементов.

Наиболее значимые параметры движения железа в природной среде приведены ниже:

	млн т/год	%
Извержения магмы . . . . .	3000,0	74,1
Эоловый перенос . . . . .	3,6	0,1
Биологический круговорот . . . . .	51,9	1,3
Речной сток . . . . .	991,0	24,5
Итого . . . . .	4046,5	100,00



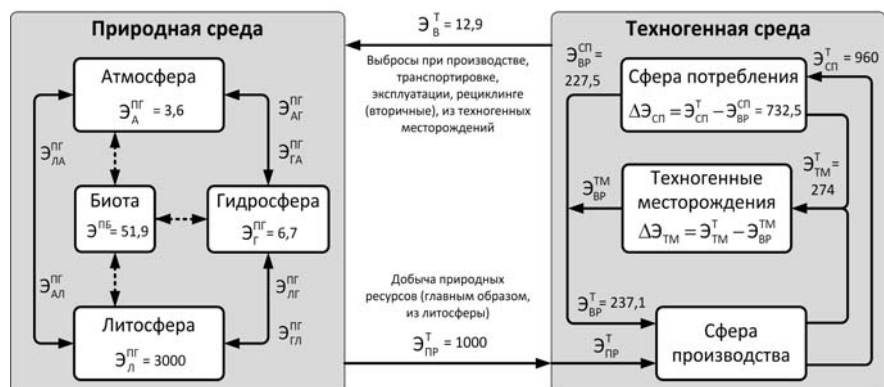


Рисунок 2.2. Основные направления элементо потока железа в природной и техногенной среде

**Движение железа в техносфере.** Учитывалось только движение железа, связанное с процессами и изделиями черной металлургии. По оценкам [158] на его долю приходится свыше 95 % всего железа, мигрирующего в техносфере. Расчеты производились для периода 2004–2005 гг. для возможности сравнения с параметрами элементо потоков марганца, хрома, ванадия и галлия, которые определены в последующих разделах. Были использованы следующие источники [103, 194–215]. Результаты расчетов приведены ниже. На основе полученных данных можно построить «глобальный» элементо поток железа в природной и техногенной среде (см. рис. 2.2).

Движение железа с материалами производственного (в том числе отложенного) рециклинга характеризуется следующими данными:

	тыс. т	%
Материалы, поступающие в агломерационное и доменное производство	10 631	5,14
Шлам и шлак из отвалов (материалы отложенного рециклинга)	9589	4,63
Вторичные материалы из прокатного производства (обрезь, брак и пр.)	186 666	90,23
Итого	206 886	100

Макробаланс производства железа приведен ниже, тыс. т/год:

#### Статьи баланса

##### *Приход*

Поступает с железной рудой . . . . .	990 915
Поступает с ферросплавами . . . . .	10 519
Поступает из металлофонда . . . . .	227 469
Поступает из шлаковых отвалов и шламонакопителей . . . . .	9589
Итого . . . . .	1 238 492

##### *Расход*

Поступает в сферу потребления . . . . .	960 056
в том числе: готовая продукция . . . . .	945 402
попутная продукция. . . . .	14 654
Поступает в техногенные месторождения. . . . .	274 013
в том числе: хвостохранилища . . . . .	246 435
шламонакопители и шлаковые отвалы. . . . .	27 578
Выбросы в атмосферу и гидросферу . . . . .	12 872

## 2.4. Глобальный элементопоток хрома

Хром в малых количествах распространен в окружающей среде повсеместно. Он может быть обнаружен в любых материалах в концентрациях, варьирующих от 0,1 мкг/м<sup>3</sup> в воздухе до 4 г/кг в почвах. Средняя концентрация хрома в 863 пробах почв США составила 53 мг/кг [169–172, 216–218].

Среднее содержание хрома в земной коре по оценкам различных исследователей характеризуется следующими данными:

Распространенность, % масс.:

Ф. Клак и Г. Вашингтон . . . . .	0,033
А.П. Виноградов . . . . .	0,0083
С.Р. Тэйлор . . . . .	0,01
А.А. Беус (без осадочной оболочки) . . . . .	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Атомная распространенность

по А.Е. Ферсману, % . . . . .	$9 \cdot 10^{-3}$
-------------------------------	-------------------

Содержание хрома в почвах приведено ниже, % масс.:

Кислые почвы:

богатые кальцием . . . . .	$2,2 \cdot 10^{-4}$
бедные кальцием . . . . .	$4,1 \cdot 10^{-4}$

Почвы:

по А.П. Виноградову . . . . .	$2 \cdot 10^{-2}$
по данным ЕРА. . . . .	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1,5 \cdot 10^{-2}$

Больше всего хрома содержится в ультрамефических и серпентиновых породах. Именно к ним приурочены залежи хромитовых руд, имеющие промышленное значение. Обычно содержание оксида хрома (III) в хромитовых рудах колеблется от 35 до 50 % масс. Среди природных хромосодержащих минералов (всего около 30) только хромшпинелиды важны в промышленном отношении и служат единственным источником получения металлического хрома и его химических соединений. При эрозии горных пород образуются комплексы хрома, в которых он содержится исключительно в трехвалентном состоянии. Шестивалентный хром в окружающей среде практически полностью является результатом хозяйственной деятельности человека [218–224].

Основными потребителями хромосодержащего сырья являются металлургическая и химическая отрасли промышленности; хромитовые руды применяются также при производстве огнеупоров. Систематические данные о потреблении хромосодержащей продукции публикуются только в США (издание *Minerals Yearbook*, выпускаемое Геологической службой США); по другим странам имеются лишь отрывочные сведения [225, 226].

По данным Международной ассоциации производителей хрома (ICDA) распределение хрома по отраслям промышленности составляет:

- 85 % – металлургическая промышленность;
- 8 % – химическая промышленность;
- 7 % используется для производства огнеупорных материалов

(включая литейные пески).

Почти вся хромитовая руда, используемая в металлургии, предназначена для выпуска различных сортов феррохрома и не более 2...3 % – для производства хромосодержащих лигатур. До 90 % феррохрома используется при выплавке нержавеющей стали. Главными потребителями феррохрома являются страны–производители нержавеющей стали – Япония, США, Германия, Франция и Италия, на долю которых приходится до двух третей мирового потребления сплава [227, 228].

Большое количество хрома в бытовых отходах обусловлено коррозией нержавеющей стали и наличием в жилых домах устройств для измельчения мусора. Сточные воды предприятий, использующих хром, содержат его от 40 (кожевенная промышленность) до 50 000 мг/л (хромирование). В ходе первичной очистки стоков удаляется до 30 % хрома, при вторичной очистке с использованием капельных биофильтров – до 40 %. В очи-

щенных стоках содержание хрома достигает 200 мкг/л. Этот уровень значительно выше естественной концентрации хрома в поверхностных водах и представляет собой существенный источник загрязнения. Источники сточных вод содержат до 9000 мг хрома/кг. Удаление необработанного осадка сточных вод на свалки является потенциальным источником загрязнения хромом почвы и подземных вод. Однако при щелочных значениях pH гидроксиды хрома нерастворимы и их выщелачивание даже очень кислой водой является минимальным [219–224, 228].

Больше всего хрома попадает в гидросферу с бытовыми сточными водами и в процессе металлургического производства. В поверхностные воды соединения трех- и шестивалентного хрома попадают в результате выщелачивания из горных пород (хромит, крокоит, уваровит и др.), из почв, в процессе разложения организмов и растений. Значительные количества могут поступать в водоемы со сточными водами гальванических цехов, красильных цехов текстильных предприятий, кожевенных заводов и предприятий химической промышленности.

Как видно из приведенных в табл. 2.6 данных, больше всего хрома попадает в гидросферу с бытовыми сточными водами и в процессе металлургического производства. Ежегодный речной сток хрома по данным [189] составляет 2,5 млн т, а по данным [216] – 1,7 млн т. В дальнейших расчетах величина годового речного стока хрома принята равной 2,0 млн т.

Таблица 2.6

**Мировое поступление хрома в гидросферу  
из техногенных источников, тыс. т/год**

Источник поступления	Пределы	Среднее	% к итогу
Бытовые сточные воды	14,1...78	46,00	32,21
Электростанции	4,8...18	5,70	3,99
Производство цветных металлов	3...20	12,00	8,40
Добыча и обогащение хромитов	0...0,7		
Производственные процессы, всего:	17,51...83,71	51,00	35,71
– металлургия (включая металлообработку)	15...58		
– химическая промышленность	2,5...24		
– целлюлозно-бумажная промышленность	0,01...1,5		
– нефтехимия	0...0,21		
Канализационные стоки	5,8...32	19,00	13,31
Атмосферные осадки	2,2...16	9,10	6,37
<b>Итого</b>	<b>45...239</b>	<b>142,80</b>	<b>100,0</b>

Наиболее значимыми природными источниками поступления хрома в атмосферу являются выветривание почв и вулканическая пыль; наибольшие количества хрома из техногенных источников поступает в атмосферу при производстве энергии и в результате металлургических процессов.

Согласно [216] ежегодное поступление хрома в атмосферу из антропогенных источников составляет 94 тыс. т. Это значение не сильно отличается от верхнего предела поступления в атмосферу антропогенного хрома, приведенного в табл. 2.7 – 53 тыс. т. Аналогично, поступление хрома в атмосферу из природных источников по данным [216] составляет 58 тыс. т в год против 83 (см. табл. 2.7) и в дальнейших расчетах принимается равной 70 тыс. т в год.

Таблица 2.7

**Мировое поступление хрома в атмосферу, тыс. т/год**

Источник поступления	Пределы	Среднее	% к итогу
<i>Природные источники</i>			
Выветривание почв	3,6...50	27,00	62,40
Аэрозоль морской соли	0,03...1,4	0,07	0,16
Вулканическая пыль	0,81...29	15,00	34,67
Лесные пожары	0...0,18	0,09	0,21
Источники органического происхождения, всего:	0,1...2,22	1,11	2,57
– континентальная пыль	0,1...2,0	1,00	
– континентальные испарения	0...0,10	0,05	
– океанические	0...0,12	0,06	
<b>И т о г о</b>	<b>4,5...83</b>	<b>43,27</b>	<b>100,0</b>
<i>Антропогенные источники</i>			
Производство энергии	3,365...22	12,70	40,27
Производство чугуна и стали	2,84...28,4	17,00	53,90
Сжигание мусора	0,248...1,43	0,84	2,66
Производство цемента	0,89...1,78	1,00	3,17
<b>И т о г о</b>	<b>6...53</b>	<b>31,54</b>	<b>100,0</b>

На поверхность земли большая часть хрома поступает в процессе использования хромосодержащей продукции. Одним из наиболее значимых источников поступления хрома в почвы являются фосфатные удобрения с содержанием хрома от 30 до 3000 мг/кг. Значительные

количества хрома содержатся в золотшламонакопителях тепловых электростанций, работающих на угле. Объем ежегодного поступления хрома на поверхность земли приведен в табл. 2.8

Существует полный цикл движения хрома – от горных пород и почв к растениям и животным, а затем обратно в почву. Часть хрома уходит на второй путь, приводящий к отложению на океанском дне. Эта часть представлена хромом из горных пород и почвы, переносимым водой (в концентрациях порядка нескольких микрограммов на литр), а также хромом из экскрементов животных, небольшая часть которого может попадать в воду. Еще один цикл включает хром, попавший в воздух в результате выбросов из природных источников. Часть находящегося в воздухе хрома завершает цикл при оседании на землю, но весьма значительная часть откладывается на дне океанов. Глобальная естественная «мобилизация» хрома в результате эрозии составляет около  $3,6 \cdot 10^7$  кг/год [219].

Таблица 2.8

**Мировое поступление хрома на поверхность земли, тыс. т/год**

Источник поступления	Пределы	Среднее	% к итогу
Отходы сельского хозяйства и животноводства	14,5...150	82,0	9,13
Отходы лесозаготовки и деревообработки	2,2...18	10,0	1,11
Твердые бытовые отходы	6,6...33	20,0	2,23
Шлам канализаций и т.п.	1,5...11,48	6,5	0,72
Твердые отходы металлургического производства	0,65...2,4	1,5	0,17
Зола от сжигания углей	149...446	298,0	33,18
Использованная продукция <sup>1</sup>	305...610	458,0	51,00
Атмосферные осадки	5,1...38	22,0	2,45
<b>И т о г о</b>	<b>484...1309</b>	<b>898,0</b>	<b>100,0</b>

<sup>1</sup> «Использованная продукция» – материалы, попадающие в почву в процессе их эксплуатации или применения (химикаты, красители или удобрения, потери от коррозии). По данным источника [246] эта статья составляет от 5 до 10 % от уровня мировой добычи хрома.

Значительное количество хрома (оцениваемое в  $6,7 \cdot 10^6$  кг в год) уносится с потоками воды и попадает в моря. Конечным его местоприемником является океанский осадок [229]. По некоторым оценкам [230] время пребывания в океане составляет 10 000 лет. Среднее содержа-

ние хрома в породах океанического дна примерно в 3,5 раза выше, чем в породах суши. По-видимому, это связано с накоплением нерастворимого гидроксида (или других соединений) хрома в осадочных породах океанического дна. Содержание хрома в породах океанического дна (по Н. Turekian, К. Wedepohl) приведено ниже, % масс.:

Породы:

ультраосновные .....	$1,6 \cdot 10^{-1}$
основные .....	$1,7 \cdot 10^{-2}$

Глубоководные осадки:

карбонаты .....	$1,1 \cdot 10^{-4}$
глины .....	$9 \cdot 10^{-3}$

Среднее содержание хрома в живом веществе –  $7 \cdot 10^{-5}$  % масс. Он относится к группе элементов слабого и очень слабого биологического захвата. Биологический круговорот хрома оценивается величиной 470 тыс. т в год. Из них 310 тыс. т приходится на биоту суши, а 160 млн т – на биоту океана. Кроме того, 12,4 млн т хрома входит в состав органического вещества почв, а 4,5 млн т содержится в континентальной растительности.

При построении элементопотока хрома в техносфере были использованы источники [231–236]. Степень извлечения хрома при обогащении зависит от типа и качества подвергаемых обогащению руд. Поскольку большая часть руд, добываемых в мире (ЮАР и Казахстан), относится к классу высококачественных, извлечение хрома из них можно принять на уровне 85 % отн.

Исходя из данных о производстве хромовой руды различными странами мира, а также содержании хрома в рудах можно рассчитать средний уровень производства товарной хромитовой руды и средневзвешенное содержание хрома в ней. В дальнейших расчетах примем, что количество товарной хромитовой руды равно 13 282,71 тыс. т, а содержание хрома в ней составляет 26,13 % масс. Извлечение хрома в готовые продукты по отраслям промышленности приведено ниже, % масс. [258]:

Обогащение .....	84...92
Химическая промышленность .....	81...90
Металлургия .....	80...95
Производство огнеупоров .....	70...72

Концентрата хромитовых руд производится в мире  $19 \cdot 0,724 = 13,8$  млн т в год, при этом образуется –  $19 \cdot 0,276 = 5,2$  млн т в год хвостов. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в концентрате составляет 55,4 %, следовательно в концентрате  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 13,8 \cdot 0,554 = 7,6$  млн т, а хрома =  $7,6 \cdot 104/152 = 5,2$  млн т в год. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в хвостах составляет 19,9 %, следовательно в хвостах  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 5,2 \cdot 0,199 = 1,03$  млн т, а хрома  $1,03 \cdot 104/152 = 0,7$  млн т.

Таблица 2.9

**Основные параметры обогащения хромитовых руд, %**

Продукты	Выход	Содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3$	Извлечение $\text{Cr}_2\text{O}_3$
Концентрат:			
тяжелосредних сепараторов	31,3	54,8	37,6
отсадки	12,4	53,3	14,5
отсадки	15,6	57,0	19,5
винтовых сепараторов	4,2	57,0	5,3
столов	8,9	57,0	11,1
Суммарный концентрат	72,4	55,4	88,0
Отвальные хвосты	27,6	19,9	12,0

До 90...95 % товарных хромовых руд металлургических сортов перерабатывается на феррохром, в котором массовая доля хрома составляет 52...70 %. До 90 % феррохрома (до 95 % высокоуглеродистого феррохрома) используется при выплавке нержавеющей стали. Извлечение хрома при производстве ферросплавов составляет 85...95 % (95 % – при дополнительном извлечении хрома из шлаков). Примем, что 80 % феррохрома идет на выплавку нержавеющей стали. В 2005 г. мировое производство высокоуглеродистого феррохрома составило 5,88 млн т, а производство низкоуглеродистого феррохрома – 0,57 млн т. Соответственно на производство нержавеющей стали было израсходовано  $(5,88 + 0,57) \cdot 0,8 = 5,2$  млн т. Среднее содержание хрома в феррохроме 65 %. Соответственно хрома в феррохроме примерно  $5,2 \cdot 0,65 = 3,4$  млн т.

При расчете шихты принимают, что извлечение хрома составляет 76...92 %, примем, что в среднем извлечение хрома составляет 85 %, соответственно 15 % хрома теряется со шлаком и пылью. Примем, что в шлаке 5 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а Cr – 3 %.



В пыли содержится 18...21 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Примем, что в пыли содержится 19 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а Cr – 13 %. Таким образом суммарное содержание хрома в пыли и шлаке составит 16 % Cr. Если феррохрома было произведено 3,4 млн т, то шлака и пыли при этом образовалось  $3,4 \cdot 15 : 85 = 0,6$  млн т и хрома в них соответственно  $0,6 \cdot 0,16 = 0,01$  млн т.

От 85 до 95 % хромистых ферросплавов в США используется в сталелитейной промышленности, в том числе от 72 до 78 % – для производства нержавеющей и жаропрочной стали со средним содержанием хрома 18 % масс. и сталей, в которых хром входит в состав композиции легирующих элементов в количестве примерно 2,2 % масс. Для производства сталей первой группы расходуется примерно 75 % феррохрома, потребляемого черной металлургией, а для производства сталей второй группы, соответственно, 25 %. В основном, подобное распределение характерно для всех стран-производителей этих сталей.

**Использование хромитовых руд в огнеупорном производстве.** Процесс производства огнеупорных кирпичей включает в себя дробление хромитовой руды, ее измельчение и грохочение. Выбросы хрома характерны для операций обработки, дробления, измельчения, грохочения, плавления, литья. Поскольку размер частиц и оптимальное соотношение частиц разного размера очень важны при производстве огнеупоров, обогащение руды для нужд огнеупорной промышленности проходит в две стадии. Степень извлечения на каждой из них составляет около 85 %. Таким образом, степень извлечения хрома в огнеупорной промышленности составляет примерно 70 % [231].

**Производство химических соединений хрома.** Доля химической промышленности в мировом потреблении товарной хромовой руды оценивается в 7...13 %. Эта отрасль потребляет хромовые руды главным образом для производства хромовой кислоты с последующей ее переработкой в дихроматы натрия, реже калия (так называемые хромпики). Первой стадией производства широчайшей гаммы химических соединений хрома является получение бихромата натрия. Затраты хромитовой руды на производство 1 т бихромата, содержащей 67,1 % масс.  $\text{CrO}_3$ , составляют 1,2...1,3 т. При этом образуется 2...2,2 т шлама. Потери хрома на первой стадии химического производства составляют от 10 до 20 % от его количества, поступившего с рудой. Степень извлечения хрома повышается при использовании в шихте для спекания оборотных отходов, образующихся на последующих стадиях производства бихромата. Поскольку использование оборотных от-

ходов является общепринятой практикой, степень извлечения хрома при производстве бихромата можно принять равной 13 %.

Бихромат натрия служит исходным сырьем для получения чистого оксида хрома (III), хроматов различных металлов и других соединений, а также при электролитическом хромировании. В настоящее время не существуют системы сбора и утилизации хромосодержащей продукции, а в некоторых случаях низкое содержание хрома в продукции делает невозможным создание такой системы. Поэтому практически весь хром, используемый в химической промышленности и переходящий затем в готовую продукцию, после окончания срока службы этой продукции безвозвратно рассеивается в окружающей среде.

Основные виды хромистых химикалий: антисептики древесины (42 %), полировальные и притирочные пасты для обработки поверхностей металлических деталей и предупреждения коррозии (14 %), стойкие к свету краски (13 %), дубители для кож (9 %), катализаторы для неорганического и органического синтеза, магнитных пленок для аудио- и видеоаппаратуры и т.п.

Статистические данные по производству химических соединений хрома не публикуются, и о его уровне можно судить по установленным мощностям, которые используются стабильно на уровне 320...330 тыс. т (в пересчете на хром) в год.

***Хром в отходах производства и потребления.*** Установлено, что ежедневно на фабрики по переработке отходов в Нью-Йорке поступает 676 кг хрома из следующих источников: шламы гальванизации – 43 %, бытовой мусор – 28% промышленные отходы и стоки с улиц – по 9 %.

Результаты расчетов природного и техногенного элементопотока хрома приведены на рис. 2.3 и 2.4.

## **2.5. Глобальный элементопоток марганца**

Фактов причинения вреда окружающей среде присутствием в ней марганца на настоящий момент не установлено. Тем не менее марганец и его химические соединения входят в список веществ, о выбросах которых в окружающую среду необходимо уведомлять соответствующие органы экологического мониторинга (в США это Агентство по защите окружающей среды – EPA). Марганец является одним из жизненно важных элементов для людей, животных и расте-

ний. Основные параметры природной миграции марганца в биосфере приведены в табл. 2.9 и 2.10 [230, 233–235].

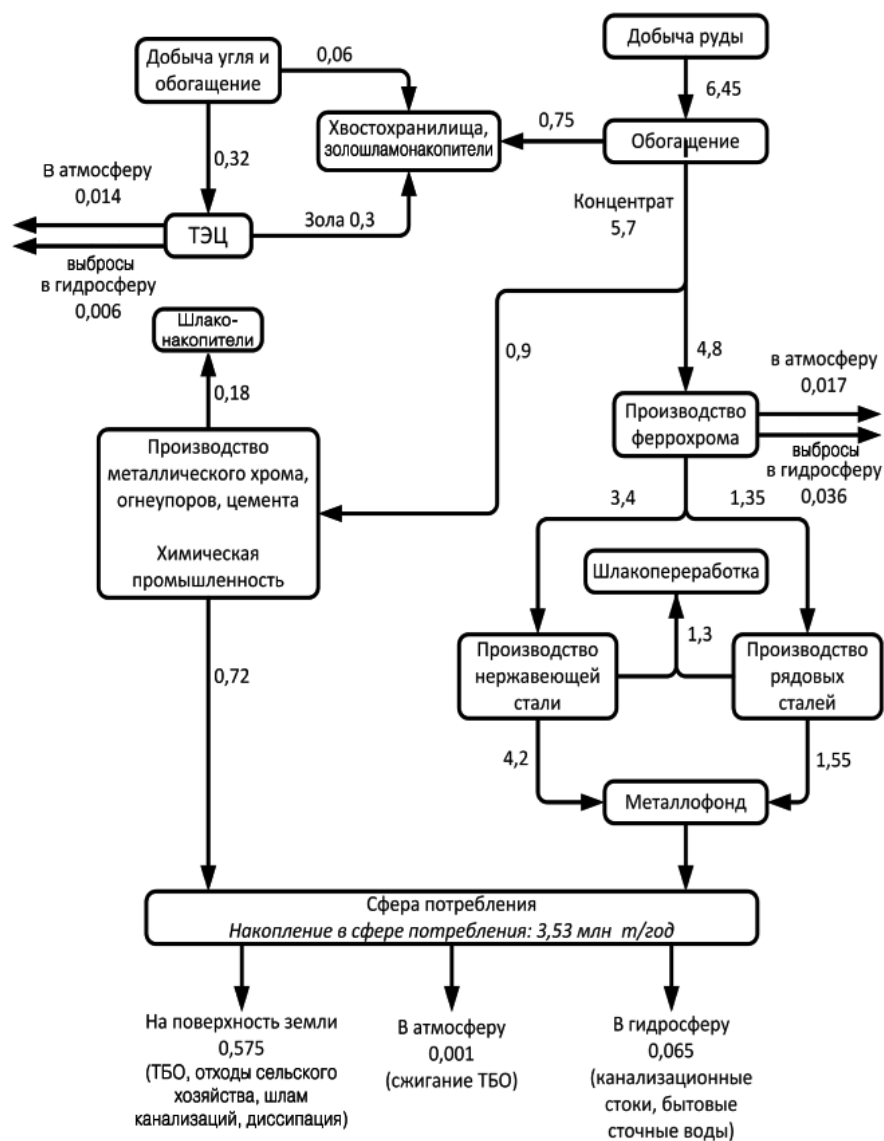


Рис. 2.3. Движение хрома в техносфере, млн т/год

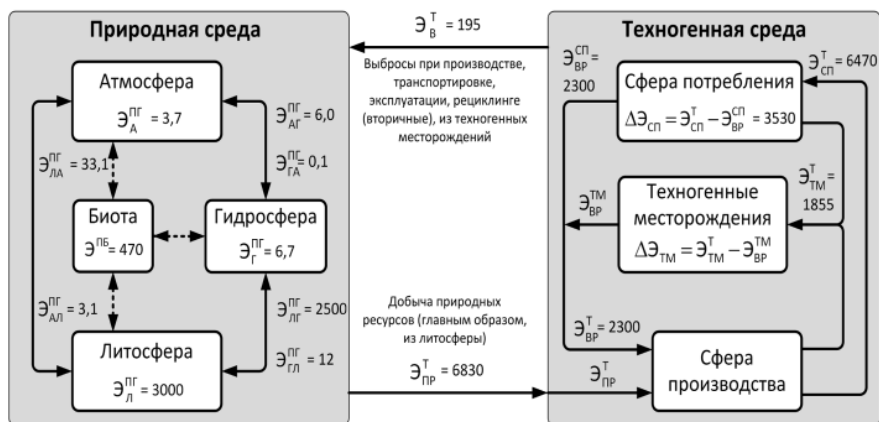


Рис. 2.4. Основные направления элементо потока хрома в природной и техногенной среде

Таблица 2.9

### Основные параметры природной миграции марганца в биосфере, тыс. т

Процесс	Диапазон	Среднее
Выветривание частиц почвы	42...430	226
Выбросы вулканической пыли	—	120
Осаждение пыли на поверхность континентов	—	148
Эоловый вынос в океан	4...80	42
Выбросы подводных вулканов	8...60	34
Растворение в гидросфере (образование морской соли)	0,2...1,9	1
Осаждение на дно океанов	—	145

Таблица 2.10

### Основные параметры биологической миграции марганца, тыс. т

Сфера	Диапазон	Среднее
Растения и бактерии	5...95	50,0
Животный мир	0,1...3,0	1,5
Морские и океанские растения и животные	0,2...3,0	1,5
Итого биологический круговорот	5,3...101	53,0

В мировом потреблении металлов в последние десятилетия марганец делит с цинком четвертое-пятое места после железа, алюминия и меди. Главным потребителем марганцевых руд является черная металлургия, в которой используется свыше 90 % товарного марганца. Кроме того, марганец широко используется в цветной металлургии, электротехнической и химической промышленности, в медицине и сельском хозяйстве (табл. 2.11).

Таблица 2.11

**Области применения марганца и его соединений**

Вещество	Область применения
Металлический марганец	Сплавы на основе цветных металлов
Диоксид марганца	Производство химических источников тока, стекла, глазури; окрашивание кирпича и кафеля; получение концентрата диоксида урана
Перманганат калия	Очистка питьевой воды, обработка сточных вод, деодоризация выбросов красильных и рыбозаготовительных фабрик; окислитель
Фосфат марганца	Защита стальной оболочки контейнеров с нефтью и воском; покрытие для движущихся деталей
Феррит марганца	Производство телевизионных монтажных плат
Циклопентадиенилтрикарбонил марганца	Изготовление экологически чистой антидетонационной присадки к моторному топливу
Оксид и сульфат марганца	Удобрения
Сульфат марганца	Пищевые добавки к корму домашних животных

Содержание марганца в стальной продукции общего назначения колеблется от 0,25 до 0,8 %. Некоторые сорта стали с повышенным (до 1,8 %) содержанием марганца, обладающие особой прочностью и устойчивостью к истиранию, используются для изготовления деталей, подвергающихся высоким нагрузкам: карданных и коленчатых валов, поршней, шестерен, дисков, осей, арматурных конструкций. Вследствие значительной степени использования марганца в черной металлургии между потреблением этого металла и производством стали долгое время существовала ярко выраженная корреляция.

Техногенные выбросы марганца в значительной степени локализованы в районах, занимаемых горно-обогатительными предприятиями. По данным USGS «Mineral Commodity Summaries» около 19 млн т

марганца в год приходит в движение вследствие работы горнорудной промышленности. Это примерно вдвое превышает нынешний годовой объем производства марганцевой руды (выход продукта из руды может варьироваться от 50 % до 60 %). В результате добычи свыше 1 млрд т железной руды (если принять выход продукта за 75 % и содержание марганца в 0,1 %) в круговорот дополнительно вовлекается около 1 млн т марганца ежегодно. Около 700...800 тыс. т в год марганца потребляется в цветной металлургии, электротехнической, химической, керамической промышленности, производстве стекла и сельском хозяйстве. Мировое производство электролитического металлического марганца составляет 100 тыс. т/год [231, 232, 237, 238].

Таблица 2.12

**Макробаланс марганца, потребленного в США в XX в. (1901–2000 г.)**

Статья баланса	Количество металлического марганца, млн т	% от общего потребления
Общее потребление, итого	89,7	100
Перешло в шлаки, шламы и пыли металлургической промышленности (черной, цветной, ферросплавной)	57,7	64,3
Диссипация в ОС в процессе эксплуатации металлических изделий (коррозия, истирание и т.п.)	9,2	10,3
Диссипация в ОС продукции химической промышленности, сельского хозяйства, аккумуляторных батарей, и т.п.	8,6	9,6
Накоплено в виде запаса национальной обороны и текущих запасов потребителей и производителей	2,5	2,8
Накоплено в действующем металлофонде страны	11,7	13,0

Расчеты параметров движения марганца в техносфере выполнены с использованием источников [197–203, 230–232, 237–240] (табл. 2.12); их результаты приведены на рис. 2.5 – 2.7 и в табл. 2.13 и 2.14.

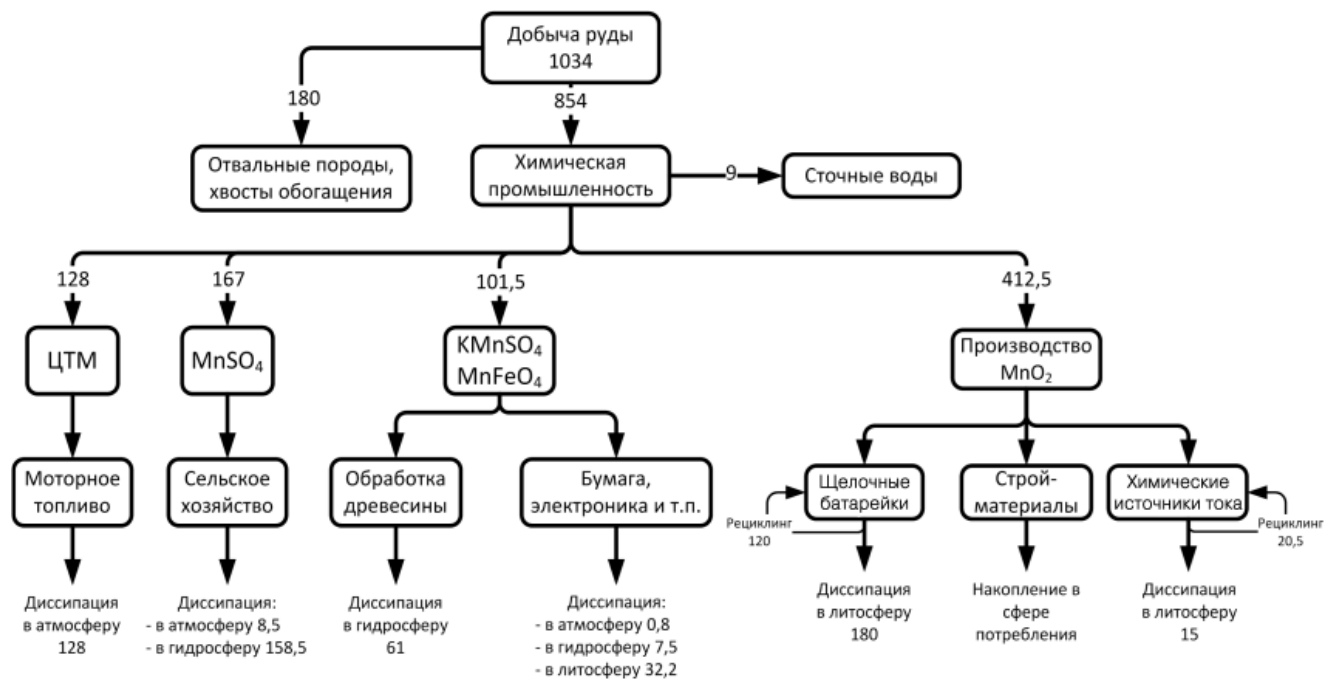


Рис. 2.5. Движение марганца в техносфере (кроме металлургии), тыс. т/год

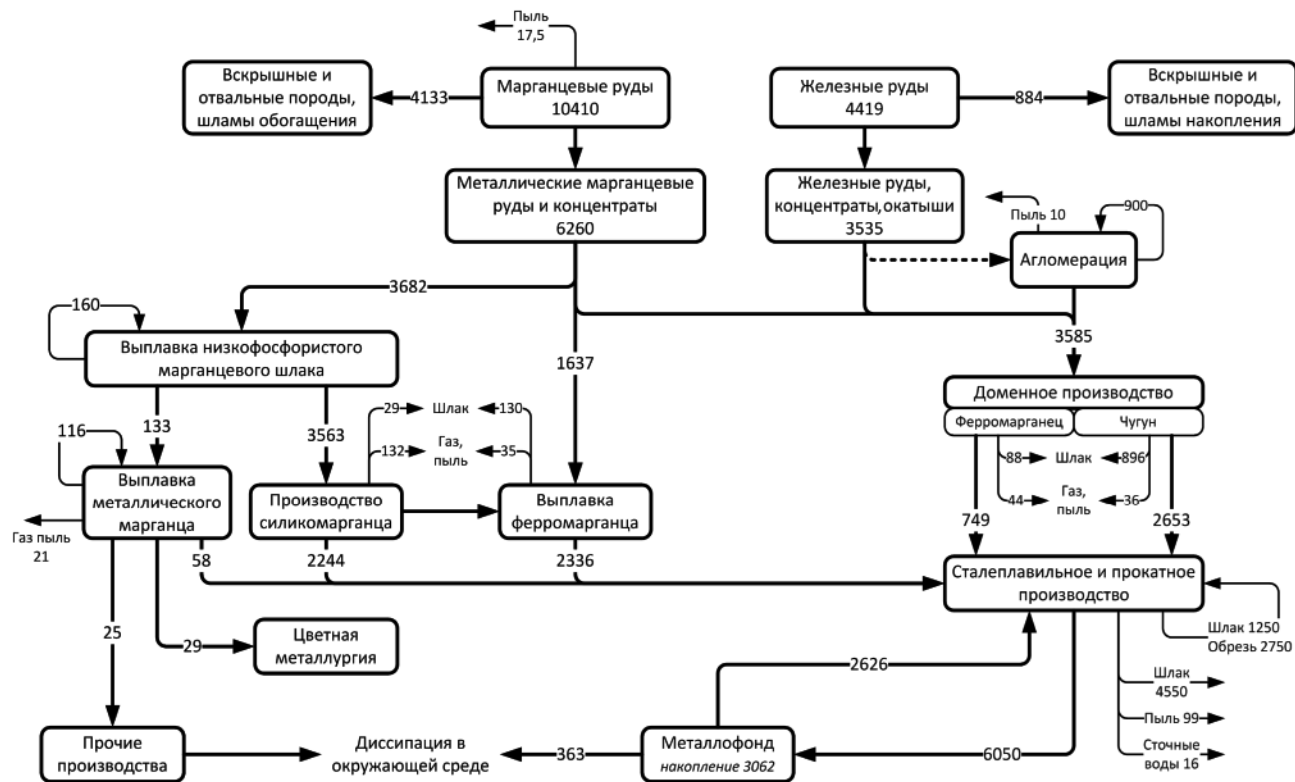


Рис. 2.6. Движение марганца в технологическом цикле черной металлургии, тыс. т/год



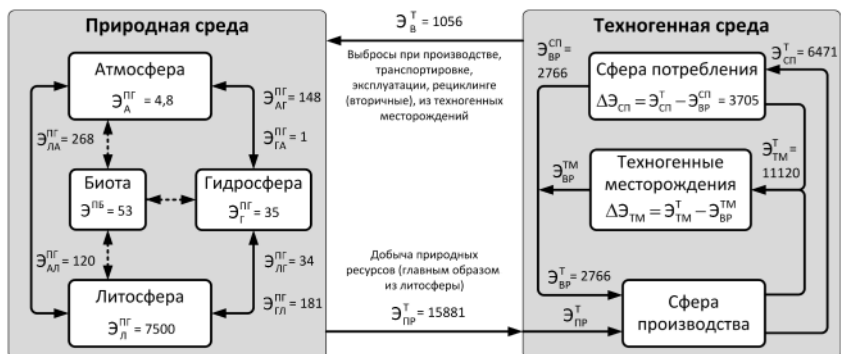


Рис. 2.7. Основные направления элементопотока марганца в природной и техногенной среде (млн т/год)

Таблица 2.13

Основные параметры движения марганца в техносфере, тыс. т

Процесс	Диапазон оценочных значений	Среднее
1. Выбросы в атмосферу	1,6...19,0	10,8
1.1. Сжигание угля	0,4...2,4	1,4
1.2. Сжигание нефти	0,4...0,8	0,6
1.3. Пыление и выветривание при добыче и обогащении:		
угля	0,4...0,8	0,6
руд цветных металлов	0,8...4,2	2,5
руд черных металлов	1,0...1,3	14,7
1.4. Переработка и сжигание ТБО	0,3...1,3	0,8
1.5. Неуловленная пыль металлургического производства	Нет св.	18,0
Итого выбросы в атмосферу		48,8
2. Выбросы на поверхность земли:		
2.1. Шлаки и шламы черной металлургии и металлообработки		4425
2.2. Шлаки и шламы цветной металлургии	12,0...25,0	18,0
2.3. Истирание в процессе эксплуатации металлических изделий (0,5% от объема металлофонда, 10 млрд т)		25
2.4. Коррозия металлических изделий (0,6 % от металлофонда)		30
Поступает из металлофонда с ломом		1500
Накапливается в металлофонде		5400
2.5. Отходы сельского хозяйства и животноводства	65...252	158,5
2.6. Отходы лесной промышленности	18...104	61,0

Окончание табл. 2.13

Процесс	Диапазон оценочных значений	Среднее
2.7. Размещение ТБО на полигонах и свалках	7...42	24,5
2.8. Осадки сточных вод канализационных систем	4,4...11	7,7
2.9. Зола от сжигания углей и нефтепродуктов	498...1655	1076
2.10. Атмосферные осадки	7,4...46	26,5
И т о г о выбросы на поверхность земли		1354,2
3. Выбросы в гидросферу		
3.1. Сточные воды:		
металлургии	12...20	16
химической промышленности	3...15	9
сельского хозяйства	2...15	8,5
2.2. Муниципальные сточные воды	5...10	7,5
2.3. Атмосферные осадки	9,6...35	22,3
И т о г о выбросы в гидросферу	—	63,3

Таблица 2.14

## Баланс марганца в техносфере, тыс. т

Статья баланса	Количество марганца	Массовая доля, % от прихода
Приход в техносферу, всего	17 714	100
В том числе:		
марганцевые руды	11 444	64,6
железные руды	4 419	24,9
угли и нефть	1 851	10,5
Расход		
1. Накопление в сфере потребления, в том числе в металлофонде	3 309 3 091	— 18,7
2. Накопление в горнодобывающих комплексах (вскрышные и отвальные породы, шламы)	5 923	33,4
3. Накопление в техногенных месторождениях в местах производства продукции и энергии (шламы, шлаки, ЗШО ТЭС)	6 868	38,8
4. Накопление в виде ТБО на свалках и полигонах	227	1,3
5. Выбросы:		
в атмосферу	1 387 711	7,8 4,0
в гидросферу	252	1,4
диссипация из металлофонда и техногенных месторождений	424	2,4

Статья баланса	Количество марганца	Массовая доля, % от прихода
Рециклинг, в с е г о	7 941	44,9
В том числе:		
производственный	5 176	29,3
глобальный	2 765	15,6

## 2.6. Элементопоток ванадия в техносфере

Ванадий занимает семнадцатое место в перечне наиболее распространенных химических элементов. Его содержание в земной коре оценивается 0,019 % масс., а концентрация в воде морей и океанов составляет  $1,5 \cdot 10^{-6}$  г/л. [241, 244]. Распределение ванадия между осадочными и гранитными слоями литосферы, растительностью континентов, педосферой и гидросферой представлены ниже [243, 245], млн т :

Литосфера:

    осадочные породы . . . . . 171

    гранитный слой . . . . . 623

Гидросфера . . . . . 2004

Педосфера . . . . . 9,3

Растительность . . . . . 3,75

В природе происходит постоянное перераспределение ванадия. В глобальные миграционные потоки ванадия вовлечено свыше 3 млн т металла [243–246]. Основным направлением миграции ванадия в природной среде является вынос в мировой океан, в котором накоплено свыше 2 млрд т металла. Ванадий относится к рассеянным элементам и в литосфере встречается в основном в комплексных полиметаллических рудах. Местом концентрации ванадия являются титано-магнетитовые и ильменит-магнетитовые руды, основные запасы которых сосредоточены в ЮАР, России, Китае и США. В повышенных концентрациях ванадий также встречается в бокситах и в ряде других комплексных руд: уран-ванадиевых, свинцово-цинковых. Глобальные миграционные потоки ванадия характеризуются следующими данными, тыс. т/год:

Биологический круговорот:

    на суше . . . . . 260

    в океанах . . . . . 330

Эоловый вынос с континента . . . . . 250

Речной сток:

    в растворах . . . . . 40

    в составе взвесей . . . . . 2300

Общие мировые промышленные запасы ванадия в рудах (в пересчете на пентаоксид ванадия) составляют около 28 млн т, а прогнозные оцениваются в 100 млн т [246–249]. Большие запасы ванадия сосредоточены в осадочных месторождениях: битуминозных сланцах, сырой нефти и нефтеносных песках, фосфатных породах и т.п. При их переработке ванадий накапливается в различных отходах перерабатывающих производств, шлаках, шламах, золах, которые складываются в непосредственной близости от перерабатывающих предприятий и представляют собой техногенные месторождения. К ванадиевым ресурсам техногенного происхождения относятся: золы и шлаки тепловых электростанций (ЗШО ТЭС), отработанные катализаторы сернокислотного производства, шламы титанового и глиноземного производств, попутные продукты и вторичные материалы ванадиевого и феррованадиевого производств [243, 249, 250].

Богатым источником ванадия является нефть. При крекинге нефти ванадий переходит в тяжелые фракции, где его концентрация возрастает в десятки раз. Тяжелые фракции нефтеперегонки впоследствии сжигают на ТЭС, при чем органическая часть сгорает, а неорганическая часть оседает на поверхностях котлоагрегатов и газовых трактов ТЭС. При этом содержание ванадия в ЗШО ТЭС возрастает до 20...40 % масс.

На многих глиноземных заводах предусмотрено выделение соединений ванадия из алюминатных растворов в виде «ванадиевого шлама». Количество ванадия, переходящего в глиноземном производстве в ванадиевый шлам, оценивается в 1500...1600 т/год [248].

Металлургию ванадия подразделяют на три основных способа:

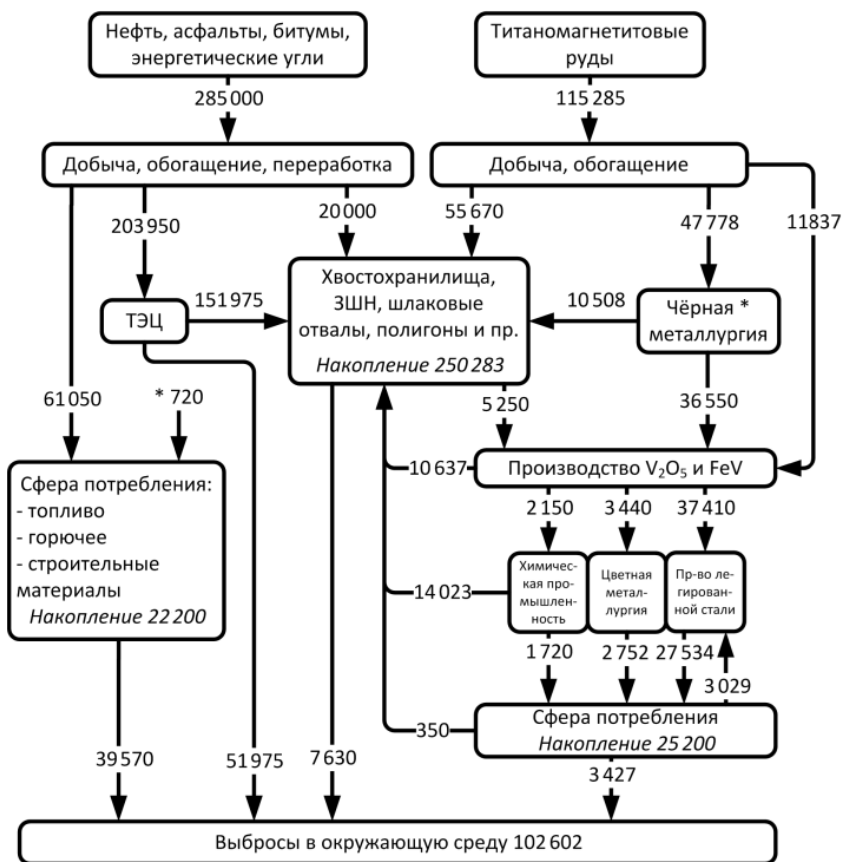
- пирометаллургический – ванадий извлекают из ванадийсодержащего шлака, получаемого в качестве попутного продукта при производстве стали деванадацией ванадиевого чугуна, выплавляемого из титано-магнетитовых и ильменит-магнетитовых руд;
- гидрометаллургический – при котором ванадий извлекают химическим выщелачиванием из обожженных (с необходимыми добавками) титано-магнетитовых и ильменит-магнетитовых концентратов;
- из техногенных материалов – ванадий экстрагируют из вторичных материалов техногенного происхождения с использованием различных гидрохимических технологий.

Развитие технологий извлечения ванадия из вторичных материалов в настоящее время обусловлено в основном отсутствием в некоторых странах необходимой рудной базы ванадийсодержащего титаномагнетитового сырья, наличием большого количества отходов других производств, богатых по содержанию ванадия (от 1,5 до 50 % масс.), а также жестким экологическим законодательством, предусматривающим высокие платежи за загрязнение окружающей среды.

При определении параметров элементопотока ванадия в техногенной среде были приняты следующие исходные данные и сделаны допущения [243, 246, 249–258]:

- расчет выполнен на металлический ванадий, годовое производство которого в мире принято равным 43 000 т;
- не учитывались потери при транспортировке материалов;
- структура источников сырья: ванадийсодержащий шлак (68 %), первичная руда (23,4 %), техногенные (8,6 %);
- использование ванадия: для легирования стали в черной металлургии (87 %), в цветной металлургии (8 %), в химической промышленности (5 %);
- потери ванадия при производстве пентаоксида по гидрометаллургической технологии – 15 %;
- потери ванадия при обогащении по гидрометаллургической схеме – 48 %;
- переход ванадия в шлак в ходе конвертерной плавки составляет 90 %;
- годовая добыча нефти составляет 3,3 млрд т при среднем содержании ванадия 50 г/т;
- при переработке нефти 90 % ванадия остается в мазуте;
- 70 % мазута используется для сжигания на ТЭС;
- при сжигании мазута на ТЭС улавливание ванадийсодержащей пыли составляет 50 %;
- потери ванадия при производстве ферросплавов составляют 8 %;
- при легировании стали феррованадием, металлом усваивается 80 % ванадия;
- потери ванадия в химической промышленности составляют 20 %;
- потери ванадия при производстве лигатур и при легировании цветных металлов приняты 20 %;
- основная часть отработанных ванадийсодержащих аккумуляторов (ОВК) возвращается на переработку, а оставшаяся аккумулируется в виде отходов в специальных накопителях, остальные виды ванадийсодержащих изделий не утилизируются и содержащийся в них ванадий постепенно распространяется в окружающую среду;
- ванадий, находящийся в металлофонде, частично поступает в окружающую среду в процессе коррозии стальных изделий, а частично снова вовлекается в металлургическое производство в составе металлолома, пропорционально количеству железа, участвующего в этих процессах;
- цветные металлы, содержащие ванадий (в основном титан и его сплавы) и применяющиеся в авиационных и космических отраслях, после использования, как правило, безвозвратно теряются, и ванадий попадает в окружающую среду.

Результаты расчетов параметров элементо потока ванадия в техно-  
генной среде представлены на рис. 2.8 и в табл. 2.15.



\* металлургические шлаки

Рис. 2.8. Движение ванадия в техносфере, тыс. т / год

Таблица 2.15

#### Распределение ванадия в техногенной среде

Процессы	тыс. т/год	% к итогу
1. Извлечение из природной среды	280,285	100,0
2. Диссипация в окружающую среду	118,800	42,4

Процессы	тыс. т/год	% к итогу
В том числе:		
от сжигания	68,475	24,4
выветривания и вымывания:	1,628	0,6
использования химической продукции	0,170	0,1
из металлофонда	3,257	1,2
из техногенной среды (строительство и пр.)	45,270	16,2
3. Накопление в металлофонде и готовой продукции химической промышленности	25,200	9,0
4. Поступление в техногенные месторождения	136,285	48,6
В том числе:		
металлургические отходы	34,065	12,2
отходы химической промышленности	0,380	0,1
отходы энергетики	46,170	16,5
вскрышные породы и хвосты	55,670	19,9
Повторное использование (рециклинг):		
активное (ЗШО для извлечения ванадия)	5,250	—
пассивное (в составе металлолома)	3,029	—

## 2.7. Движение галлия в техногенной среде

Главными промышленными источниками галлия являются бокситовые и нефелиновые руды и в меньшей степени сульфидные и цинковые. За рубежом запасы галлия, связанные с бокситами, оцениваются в 424 тыс. т при среднем содержании галлия приблизительно 50 г/т. Общие ресурсы, по данным Горного Бюро США, составляют 3...4 млн т [231, 259–263].

В России запасы галлия сосредоточены главным образом в нефелиновых породах и рудах – 64,7 %, в бокситах – 32,8 %, и в колчеданно-полиметаллических рудах – 2,5 % [232].

Проблемой извлечения галлия из продуктов передела железных руд в России (и в СССР) до сих пор никто серьезно не занимался, так как считалось, что бокситы и нефелины при содержании в них галлия 25 г/т обеспечивают при минимальных затратах потребности страны в металле.

Основные области применения галлия определились лишь ко второй половине XX в. К ним относятся главным образом полупроводни-

ковая техника, атомная энергетика и производство сплавов различного назначения. Мировое производство галлия и его соединений непрерывно растет, данные за последние годы представлены ниже, т/год:

Год .....	1972	1985	1990	1994	1997	2000	2003	2006
Производство								
первичного галлия . . .	10	36	58	63	70	98	78	81

По данным 2006 г. мировое производство первичного галлия составило 81 т. Такое же количество (81 т галлия) было получено при переработке галлиевого скрапа в результате глобального рециклинга. Основными мировыми производителями первичного галлия являются Китай, Япония, Германия, Франция и Россия. 90 % первичного галлия получают в процессе переработки бокситов и 10 % – из отходов цинкового производства. Япония, Франция, Венгрия, Казахстан, Словакия и Украина являются лидерами по переработке отходов содержащих галлий. США, Япония и Германия обладают запасами галлийсодержащих отходов, которые требуют переработки.

Современная структура техногенного элементопотока галлия приведена на рис. 2.9.

## 2.8. Сопоставительная количественная оценка элементопотоков черных металлов в природной и техногенной среде

**Хром.** Техногенному воздействию ежегодно подвергается почти 7 млн т хрома. В результате техногенного движения хрома ежегодно в составе техногенных месторождений накапливается около 1,4 млн т хрома. В металлофонде аккумулируется примерно 3,45 млн т. Выбросы хрома из техногенных источников в окружающую среду составляют млн т/год: в атмосферу – 0,034, в гидросферу – 0,143, на поверхность земли – 0,575.

**Марганец.** Общее поступление марганца в техносферу в настоящее время составляет немногим более 17,5 млн т. в год. Свыше 70 % марганца подвергнутого техногенному воздействию накапливается в составе техногенных месторождений на территории горнодобывающих и обогащательных комплексов, металлургических и химических предприятий и ТЭС. Накопление марганца в сфере потребления, главным образом, в металлофонде, составляет лишь 18,7 %, т.е. 3,3 млн т. Об-



щие выбросы марганца в атмосферу, гидросферу, в виде ТБО на свалки и полигоны составляет около 1,5 млн т, или 9 %.

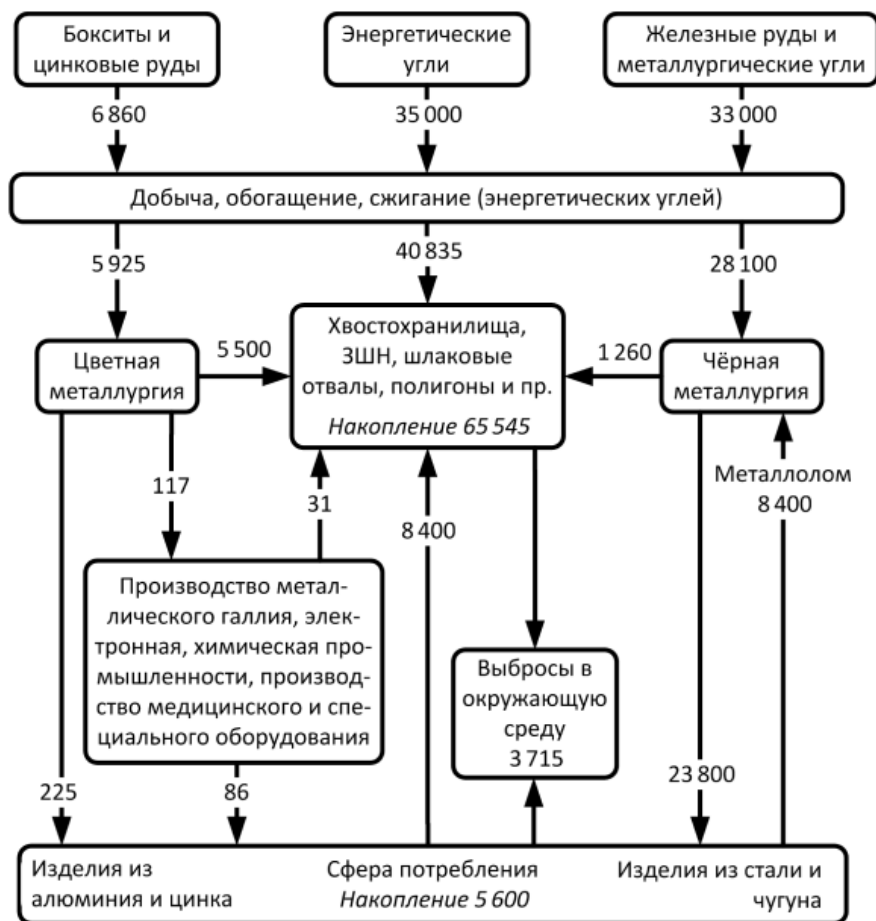


Рис. 2.9 Техногенный элементарный поток галлия (тыс. т в год)

**Ванадий.** Ежегодно из природной среды извлекается свыше 400 тыс. т ванадия, из которых на производство ферросплавов, металлического ванадия и его химических соединений направляется около 120 тыс. т металла. Многостадийность производства ванадия с использованием гидрометаллургического, а особенно пирометаллургического способа сопровождается существенными потерями на каж-

дой стадии, что предопределяет низкий сквозной коэффициент его извлечения. В конечную продукцию переходит всего лишь 47,4 тыс. т. Свыше 250 тыс. т ванадия, попавшего в техногенную среду, накапливается в техногенных месторождениях на территории обогащительных, энергетических, металлургических и химических предприятий.

Полученные результаты подтверждают, что существующая в настоящее время структура потребления природных ресурсов характерна именно для общества массового производства и продукции, и отходов. Обеспечение потребностей современной индустриальной цивилизации в основных ресурсах металлов осуществляется за счет возрастающего расходования природных ресурсов, а не за счет повышения степени использования вторичных ресурсов. Высокий уровень перехода в готовую продукцию железа и хрома объясняется использованием относительно богатых руд. Широкое применение марганца, извлекаемого в составе руд более низкого качества, приводит к тому, что почти 75 % переходит в техногенные месторождения. Редкие металлы ванадий и галлий, являющиеся характерными спутниками железных руд, также как и марганец, в результате техногенной деятельности человека по существу лишь перемещаются из состава природных месторождений в техногенные (табл. 2.15).

*Таблица 2.15*

**Основные параметры техногенной миграции черных металлов, % масс.,  
от извлечения из природной среды**

Основные направления техногенного элементопотока	Железо	Марганец	Хром	Ванадий	Галлий
Накопление в сфере потребления (в основном в металлофонде)	65	19	69	12	7
Накопление в техногенных месторождениях	22	73	19	62	87
Диссипация в окружающую среду	13	8	12	26	6

### **Глава 3. ДВИЖЕНИЕ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА СОВРЕМЕННОМ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

#### **3.1. Современные схемы утилизации текущих и накопленных отходов на отечественных и зарубежных интегрированных предприятиях**

Принятие концепции ЭЧП и Инициативы 3R интенсифицировало разработку новых подходов к управлению движением материалов на предприятиях черной металлургии [16, 17, 39, 104]. В начале XXI в. на предприятиях фирм ThyssenKrupp и Voest Alpine Stahl достигнута наиболее высокая степень производственного рециклинга в черной металлургии стран ЕС. При этом металлургические заводы решали поставленную перед ними задачу с различными концепциями подхода [105–107, 264, 265].

Фирма Thyssen Krupp Stahl AG была первым предприятием черной металлургии в Германии, на котором была внедрена система компьютеризованного сбора данных, позволяющая обеспечить надлежащее обращение с отходами с начала 80-х годов. Удалось уменьшить количество остаточных материалов с 2000...2500 кг/т жидкой стали (в 40-е годы) до уровня менее 600 кг/т к началу 90-х годов. Кроме того, Thyssen Krupp Stahl одной из первых в ЕС внедрила систему контроля ISO 14001 и добровольную часть системы аудита экологического управления (EMAS). Ее целью была оптимизация структуры возврата во внутренние оборотные циклы производственных процессов вторичных железосодержащих материалов в соответствии с их экономической, технической и экологической оценкой [105, 106, 264].

На фирме Thyssen Krupp Stahl AG железосодержащие вторичные материалы образовывались в количестве около 235 кг на 1 т стальной продукции. Около 14 % этих материалов утилизировались за пределами завода [105, 106]. Такая концепция ведения оборотного хозяйства приводила к высоким затратам на ремонт и повышенным издержкам на охрану окружающей среды в связи с получением большого количества остаточных материалов, которые приходилось выводить из процесса в виде отходов. В 2003 г. сооружен промышленный комплекс, включаю-

щий: отдельный тракт для подготовки крупнокусковых шихтовых материалов типа «козлов» из ковшей; фабрику для получения брикетов со смесителями, прессами, участком сушки; специальную установку для подготовки и загрузки шихты, а также шахтную печь OxiCup.

Управление потоками материалов на фирме Thyssen Krupp Stahl AG начинается с приобретения сырьевых материалов и организации работы транспорта [108]. Критическими элементами управления потоками всех материалов является управление движением побочных продуктов и материалов производственного рециклинга, содержащих железо и углерод. К ним относятся:

- пыль из электрофилтра аглофабрики;
- пыль и шламы доменного производства;
- пыль, шлам и шлак кислородно-конвертерного цеха;
- окалина стана горячей прокатки, частицы, образующиеся при огневой зачистке, шлак, образующийся при резке, шлам с прокатной окалиной, загрязненной маслом;
- шлам, содержащий гидрооксид железа, стана холодной прокатки;
- шлам, содержащий гидрооксид железа, агрегата для нанесения покрытия на стальной лист.

Количество всех пылей и шламов, уловленных в установках для отделения пыли и в агрегатах для очистки технологических газов и для обработки воды, составляет приблизительно 70 кг/т жидкой стали. Управление потоками материалов является комплексным мероприятием, в котором обеспечиваются контроль, анализ, оценка потоков материалов и непосредственное управление этими потоками. Основные принципы:

- работа с веществами и отходами должна предусматривать формирование замкнутых циклов;
- концепции работы с отходами должны быть ориентированы на развитие в будущем;
- балансы отходов должны составляться ретроспективно.

Организация потоков вторичных материалов на заводе фирмы Voest Alpine Stahl следовала другому принципу решения. В основу подхода была положена полная утилизация всех вторичных материалов, включая материалы отложенного рециклинга. Значительное место в реализации концепции отводилось сторонним специализированным предприятиям по переработке получаемых продуктов и полуфабрикатов.

При этом предпочтение отдавалось оптимизированным по издержкам отдельным децентрализованным решениям, а не суммарным решениям по утилизации железосодержащих остаточных материалов, как на заводе фирмы Thyssen Krupp Stahl [107, 265].

В результате анализа [103–108, 264, 265] специалисты пришли к выводу, что в будущем управление потоками материалов на металлургическом заводе окажется синтезом (объединением) обеих описанных концепций. Ожидается, что имеющиеся сегодня границы систем будут расширены, сотрудничество с заказчиками будет и далее развиваться и в оборотные циклы металлургических заводов будут включены и другие материалы.

Важно отметить, что все авторы, анализировавшие разработанные системы управления движением вторичных железосодержащих материалов, использовали терминологию потока железа, а не металлургических материалов. Характерно, что и в работе [103] говорится о возможной степени извлечения железа из ресурсов всех видов, включая производственный и глобальный рециклинг железосодержащих материалов. Уровень степени извлечения железа, соответствующий 95 %, независимо от вида используемых ресурсов рассматривается как признак ЭЧП. Аналогичный подход имеет место на предприятиях Японии, где в рамках концепции экомбината сведения о движении железа в металлургическом регионе рассматриваются в качестве неотъемлемой части социальной политики в области металлургии [109].

Закон о стимулировании контроля и ограничения выбросов в окружающую среду специальных химических веществ (Регистр выброса и переноса загрязнителей – PRTR) предусматривает обязательную отчетность начиная с 2001 г. Закон предусматривает создание системы телеизмерений. На заводах в Курэ, Сакаи, Итикава данные экологического контроля через систему телеизмерений пересылаются органам местного самоуправления, служат объектом постоянного мониторинга, так что в случае образования фотохимического смога или другого чрезвычайного экологического происшествия имеется возможность оперативно принять меры. Многие авторы отмечают целесообразность использования в качестве характеристики ЭЧП в черной металлургии движения железа в металлургическом регионе [109–111, 266, 267].

В России разработки в области управления движением вторичных ресурсов в основном связаны с переработкой накопленных предприя-

тиями шламов, шлаков и отходов заводских ТЭС. Подробно описана переработка и использование техногенных отходов на НТМК в работах [268–270] (рис. 3.1).

Основными техногенными отходами комбината (по объему образования) являются металлургические шлаки и железосодержащие отходы (ЖСО), которые на предприятии принято подразделять на три группы: мелкодисперсные, рядовые (нефракционированные) и фракционированные. Мелкодисперсные материалы представлены конвертерными и доменными шламами, пылями колошниковыми и газоочисток мартеновских печей, замасленной окалиной вторичных отстойников прокатных цехов. Для переработки отвальных сталеплавильных шлаков в 1996 г. введен в действие цех переработки техногенных образований (ЦПТО), построенный по технологической разработке фирмы «Эрих Фридрих» (Германия).

В ОАО ММК [271] для переработки текущих конвертерных и отвальных мартеновских шлаков в 1994 г. была пущена в эксплуатацию установка АО «Хеккет Мультисервис». Магнитный продукт переработки сталеплавильных шлаков используется в агломерационном и доменном производстве в количестве 35,6 кг/т агломерата и 2...12 кг/т чугуна. Скрап фракции 50...350 мм применяют в шихте конвертерной плавки (10...15 % массы металлолома). Остальную часть железосодержащих отходов составляют образующиеся в результате переработки металлургического сырья и обработки металлургической продукции на соответствующих переделах шламы, пыль и окалина. При общем образовании мелкодисперсных отходов немногим более 1,2 млн т в год уловленная в агрегатах газоочистки пыль и шламы составляют около 0,66 млн т в год. Основной объем дает доменный цех в виде колошниковой пыли, шламов и аспирационной пыли – всего 0,545 млн т в год. В прокатном производстве образуется 0,268 млн т окалины в год.

В целом в ОАО ММК утилизируется более 1 млн т в год железосодержащих отходов, или 83,96 % от их общего объема. Основная масса вторичного сырья перерабатывается при производстве агломерата. Отработана технология переработки магнитогравитационным способом хвостов обогащения и других отходов, хранящихся с 1951 г. в шламохранилище наливного типа. Запасы этого сырья составляют 11,46 млн т, в том числе 2,2 млн т с содержанием железа 25...30 % и 9,26 млн т с содержанием железа свыше 30 %.

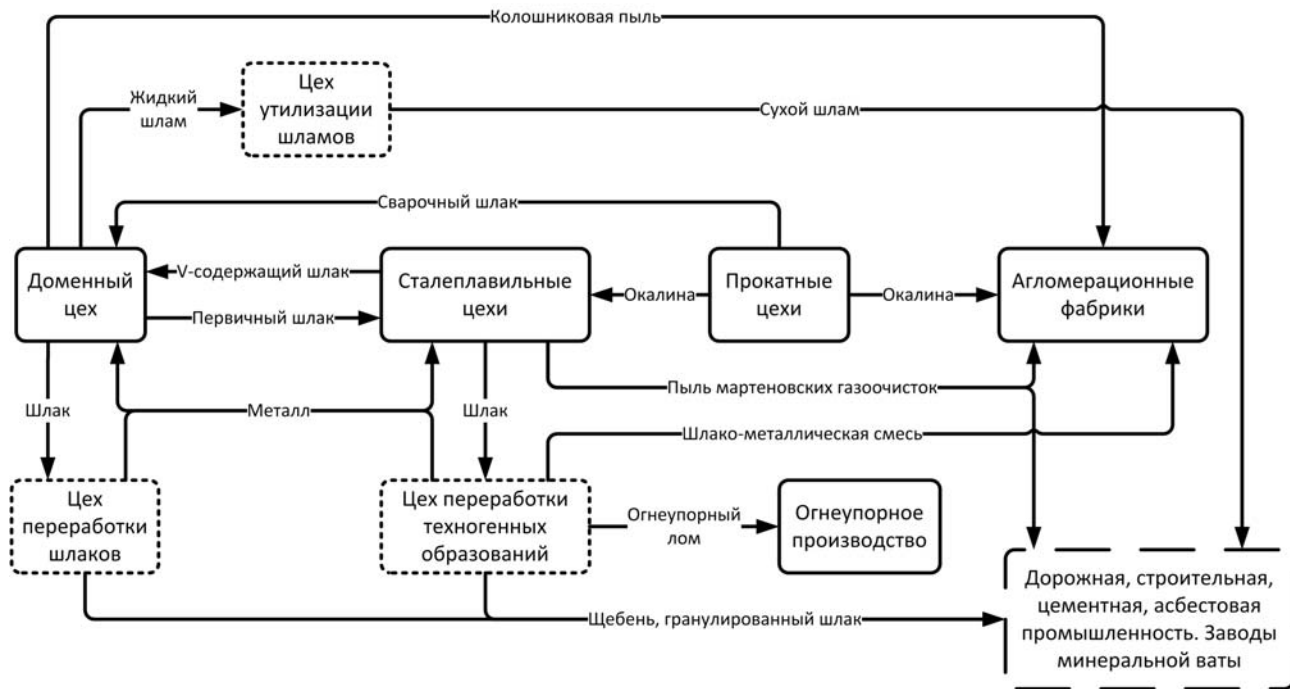


Рис. 3.1. Структура образования и потребления отходов в ОАО НТМК

На ЗСМК [272, 273] большинство отходов утилизируется в составе шихты для производства офлюсованного доменного агломерата в агломерационном цехе аглоизвесткового производства (АИП) (рис. 3.2). Не вовлеченными в переработку остаются шламы доменного и сталеплавленного производств из-за повышенного содержания в них цинка и высокой влажности. Разработан оригинальный комплекс по переработке отвальных шламов доменной газоочистки, которые безуспешно пытались переработать в течение нескольких десятилетий.

Ресурсо-экологические решения по утилизации отходов металлургического производства на НЛМК [274] принципиально отличаются от практики других отечественных предприятий. Признавая предпочтительность системных решений, на Новоліпецком металлургическом комбинате (НЛМК) разработали, внедрили и сертифицировали систему управления окружающей средой в формате стандартов ИСО серии 14000, где в качестве одной из стратегий развития предприятия обозначено развитие процессов переработки техногенных отходов и использования вторичных ресурсов. В начале 2004 г. ОАО НЛМК ввело в эксплуатацию новый комплекс по переработке отходов производства.

Конкретная схема реализации концепции глобального рециклинга отходов на НЛМК представлена на рис. 3.3. Принципиальным моментом концепции является выделение отдельной доменной печи для осуществления функции глобального рециклинга. При этом решается проблема экологически безопасного уничтожения отработанного синтетического трансформаторного масла, замасленной окалины, отработанных моторных масел и других отходов нефтепродуктов.

### **3.2. Макро- и микроэлементы в черной металлургии**

Важным методическим вопросом является принцип подразделения элементов на макро- и микроэлементы. В соответствии с предложенной ранее классификацией [8], к макроэлементам относят элементы, которые «существенным образом влияют на ход процессов добычи, производства, потребления или эксплуатации предмета, определяя технико-экономические показатели упомянутых стадий техногенных преобразований природных ресурсов». В количественном выражении можно принять, что к макроэлементам относятся те, содержание которых в рассматриваемом продукте (или системе) превышает около 0,1% масс. Если содержание элемента составляет менее 0,1% его можно условно отнести к категории микроэлементов.



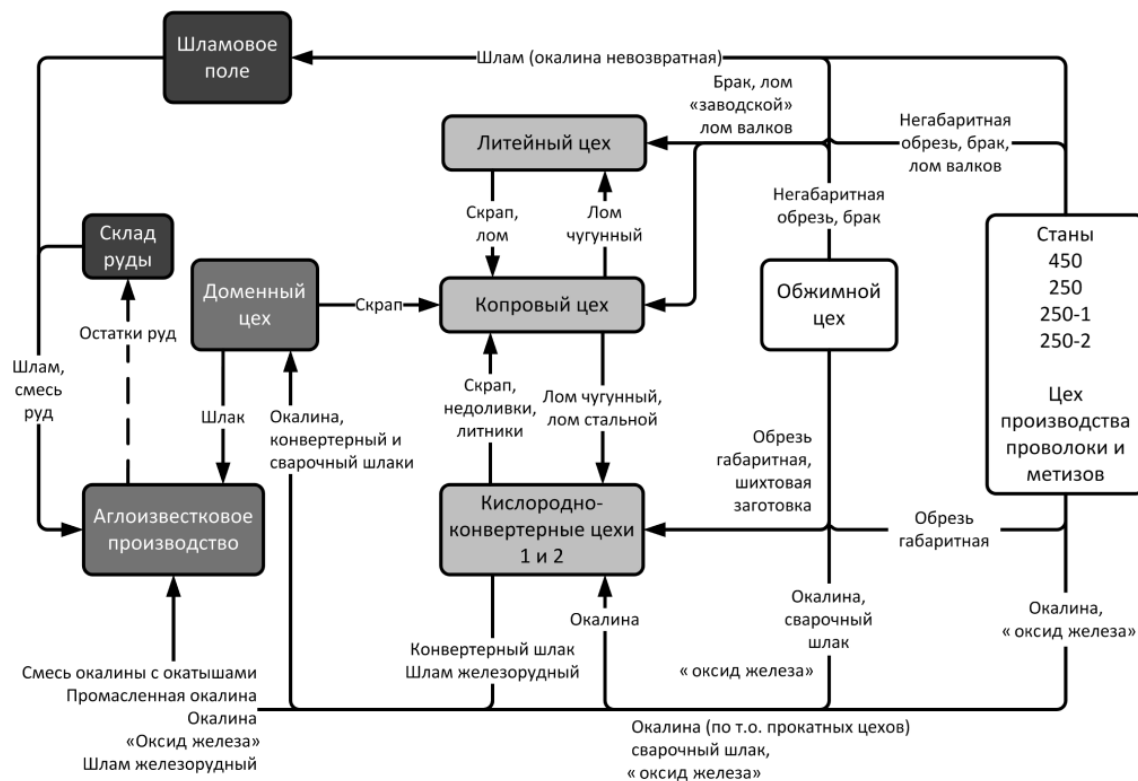


Рис. 3.2. Принципиальная схема движения вторичных (оборотных) материалов в технологическом цикле ОАО ЗСМК

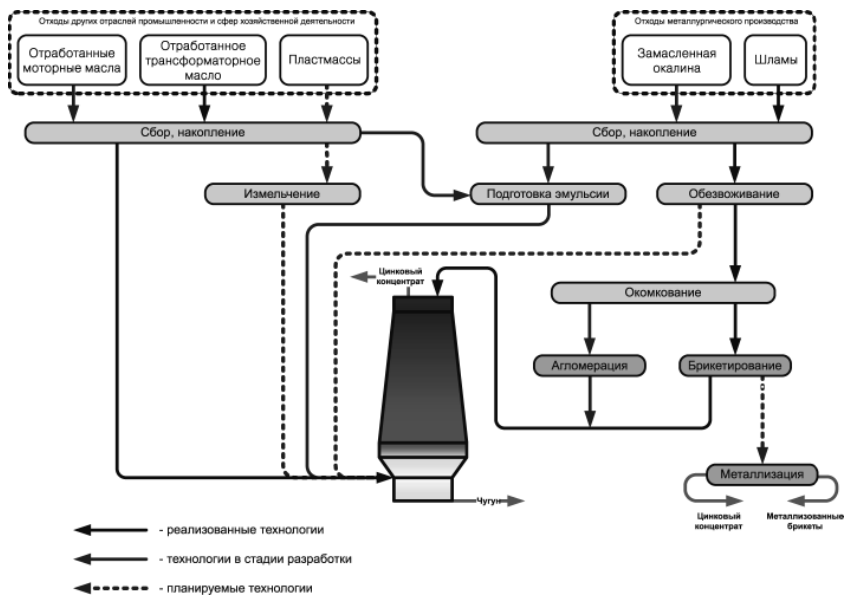


Рис. 3.3. Концепция глобального рециклинга отходов производства на НЛМК

Микроэлементы, как правило, подразделяются на «микропримесные» – существенным образом влияющие на свойства и количественные характеристики продукта, и «следовые», содержание которых настолько незначительно, что их присутствие никак не влияет ни на какие из известных в настоящее время потребительских или токсических характеристик продукта (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Подразделение химических элементов

Среди микропримесей выделяются легирующие, «бродячие» и композитные элементы. Проблема «бродячих» элементов имеет в современной черной металлургии особое значение. Термин «бродячие элементы» пришел из американского сленга, в последние годы в специальной литературе чаще употребляется термин «элементы-ваганты» (или «голиарды»).

В отечественной металлургической литературе наиболее близким по смыслу является термин «циркулирующие элементы». «Бродячие» элементы не только оказывают отрицательное влияние на качество чугуна (как и большинство микропримесных элементов), но и не могут быть легко удалены из него в процессе последующих металлургических переделов. Поэтому «бродячие» элементы постепенно накапливаются в готовом стальном продукте в процессе круговорота «сталь – металлолом – сталь». Наиболее важными «бродячими» элементами в настоящее время считаются: медь, хром, никель (обозначаемые специальной аббревиатурой CCN), олово, молибден.

Применительно к процессам металлургии железа может быть принято следующее подразделение элементов. Элементы основы: железо, углерод, кислород, азот, водород, кальций, кремний, алюминий, магний. Они являются обязательными составляющими любой металлургической системы. К макропримесным элементам обычно относят марганец, серу, цинк, калий и натрий, иногда титан и свинец (в случае их высокого содержания в металлургических материалах). К микропримесам относятся все остальные химические элементы Периодической системы.

Марганец, фосфор и сера представляют собой элементы, которые определяют качественные характеристики готового продукта и поэтому контролируются на всем протяжении технологического цикла и их содержание включается во все виды стандартов или сертификатов на изделия из железа. Калий и натрий играют важнейшую роль в процессах формирования металлургических шлаков, а также совместно с цинком существенным образом влияют на показатели процессов производства первичного металла (главным образом – чугуна) и стойкость огнеупоров доменных печей. В связи с этим химическому анализу на цинк, калий и натрий, как правило, подвергаются все шихтовые материалы, поступающие на металлургическое предприятие (прежде всего коксующиеся угли, железорудные материалы, флюсы).

Отнесение того или иного элемента к одной из упомянутых выше групп зависит от конкретных анализируемых условий. Например, хром чаще всего классифицируется как микропримесный элемент, при этом в случае производства товарного литейного чугуна он обычно рассматривается как легирующий, а при производстве передельного (особенно в случае применения в шихте хромосодержащих металлодобавок) – как «бродячий». Хром, никель, ванадий, фосфор могут играть роль макропримесного элемента при производстве хромоникелевого, ванадиевого или фосфористого чугуна или элемента основы – при выплавке в доменной печи соответствующих ферросплавов.

Микроэлементы содержатся во всех материалах, используемых на предприятиях черной металлургии: в железных и марганцевых рудах, углях всех видов, флюсах, ферросплавах, огнеупорах, металлоломе, материалах, используемых для нанесения покрытий на изделия из железа и др.

В металлургических материалах могут присутствовать в количестве от долей до десятков тысяч ppm (г/т материала) химические элементы всех групп и периодов Периодической системы, за исключением инертных газов и трансураниевых элементов. Вовлекаясь в металлургический передел в составе шихтовых материалов и газов, макро- и микроэлементы могут:

1. Переходить в готовые продукты металлургического производства, как собственно в изделия из железа, так и в «попутные» продукты, например, в металлургические шлаки или материалы, получаемые в процессе коксохимического производства и т.п.

2. Попадать в отходы производства (в основном в золы и шламы тепловых электростанций (ТЭС), а также сталеплавильные шлаки и шламы), которые в настоящее время складываются в золошламонакопители, отвалах, полигонах и других объектах, предназначенных для депонирования техногенных материалов.

3. Накапливаться в металлургических агрегатах в составе гарнисажа, настелей и других специфических образований.

4. Переходить в шламы газоочисток, окалину и другие материалы с формированием контура циркуляции внутри металлургического цикла при утилизации этих материалов в агломерационном, доменном, конвертерном и других процессах.

5. Выноситься в окружающую среду (атмосферу и гидросферу) в виде газов, возгонов, пылей, взвесей, растворов и т.п., не улавливаемых очистными устройствами.

6. Накапливаться в циркуляционных контурах, формирующихся во внутреннем пространстве металлургических агрегатов в результате возгонки элементов при высоких и последующей конденсации при низких температурах.

### **3.3. Методика определения параметров элементопотоков для предприятий черной металлургии. Элементопоток железа**

Разработана Методика определения параметров элементопотоков для предприятий черной металлургии [275]. Она зарегистрирована в качестве Ноу-Хау в депозитарии МИСиС, реализована в виде математического описания «ПОТОК» и применялась для анализа движения железа и марганца на отечественных предприятиях ОАО «Носта», ОАО ЗСМК, ОАО «Косогорский металлургический завод» и заводе ЕКО-Stahl (Германия).

Методика отличается от аналогов:

1) реализацией принципа «непрерывности потока железа», выполнение которого обеспечивает «прозрачность» потока основного элемента на всем протяжении производственного цикла;

2) критериями выбора потоков материалов для анализа движения железа в рамках производственного рециклинга.

Методика включает в себя основную часть, в которой определяют баланс и параметры движения железа в производственном цикле предприятия, и вспомогательную часть. Во вспомогательную часть входят расчеты, с помощью которых определяются параметры потока вторичных материалов (т.е. параметры рециклинга материалов). Главной особенностью методики является анализ движения (потока) основного элемента – железа, а не металлургических материалов. Поток железа строится «непрерывным», что достигается выполнением следующего правила: количество железа, содержащегося во всех материалах, формирующихся «на выходе» из предшествующего передела (цеха или другого подразделения предприятия), равно сумме количеств железа «на входе» в следующий за ним передел и железа во всех видах отходов, попутных и вторичных материалах и выбросах

всех видов, образовавшихся в предшествующем переделе. Таким образом, обеспечивается «прозрачность» потока основного элемента на всем протяжении производственного цикла.

Исходные данные:

- технические отчеты основных цехов предприятия;
- технологические инструкции;
- другая статистическая информация различных официальных источников;
- информация о балансовых плавках, спеканиях и т.п.;
- официальные отчеты геологических, санитарно-гигиенических и прочих служб;
- данные специальной литературы.

Блок-схема расчета приведена на рис. 3.5, а структура взаимосвязей между отдельными элементами математического описания – на рис. 3.6.

Общее количество элементов схемы зависит от структуры конкретного предприятия и составляет, как правило, 20–25 ед. (основных производственных подразделений металлургического комбината), количество потоков материалов достигает 130. Полный перечень металлургических материалов, которые учитывались при проведении расчетов (а также входили в блок-схему математического описания «ПОТОК») приведен в Приложении 1.

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

- составление балансов железа для отдельных цехов (производств);
- построение схем движения железа с материалами производственного рециклинга (потоки  $G_1 \dots G_4$ );
- построение схем движения (потоков) железа для основных групп металлургических переделов (потоки  $X_k, Y_l, Z_m$ );
- построение общей схемы движения железа во всем производственном цикле предприятия;
- составление макробаланса железа для предприятия в целом;
- составление макробалансов легирующих и примесных микроэлементов.

При анализе параметров производственного рециклинга на металлургическом предприятии полного цикла выделяют четыре основных потока материалов:

- 1) отсеvy агломерата, окатышей и кокса, а также колошниковая пыль, поступающие из доменного цеха в агломерационное производство ( $G_1$ );
- 2) окалина и сварочный шлак ( $G_2$ );
- 3) стальной и чугунный лом, включающий: обрезь, брак, «недоливки», литники, лом валков, стружку образующиеся при работе МНЛЗ прокатных, сталеплавильных и литейных цехов ( $G_3$ );
- 4) scrap чугунный и стальной всех видов ( $G_4$ ).

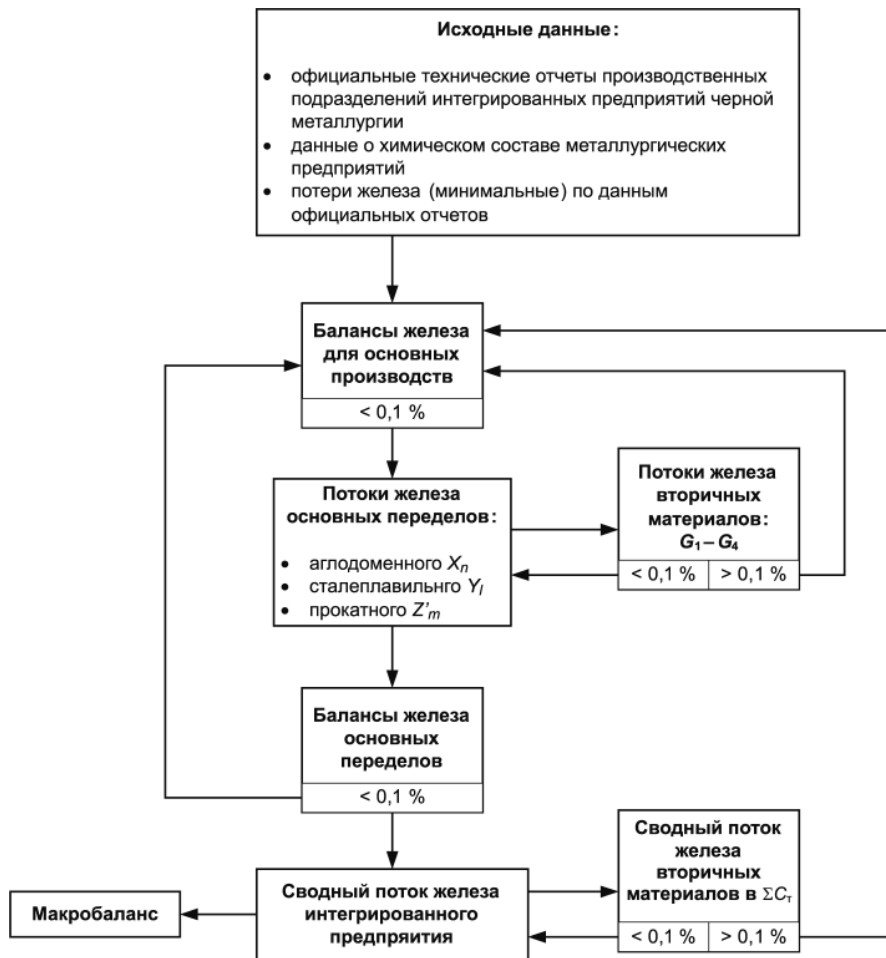


Рис. 3.5. Блок-схема расчета математического описания «ПОТОК»

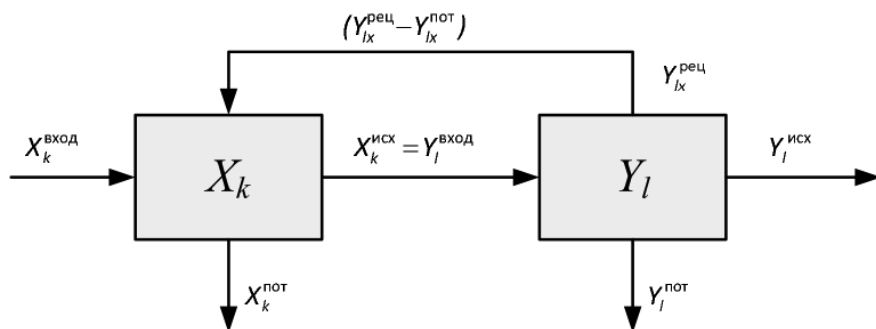


Рис. 3.6. Структура взаимосвязи между отдельными элементами математического описания (потери железа на стадии транспортировки материалов  $X_k - Y_l$  учитывались в составе  $X_k^{\text{пот}}$ )

Условием сведения балансов железа, как для отдельных объектов схемы, так и для основных переделов (аглодоменного, сталеплавно-го, прокатного) в целом является выполнение соотношения (рис. 3.7):

$$\left| \left[ \sum X_k^{\text{вход}} + \sum (Y_l^{\text{рец}} - Y_l^{\text{пот}}) - \sum X_k^{\text{исх}} - \sum X_k^{\text{пот}} \right] \frac{100}{\sum X_k^{\text{исх}}} \right| < \pm 0,1.$$

Таким образом, точность расчетов составляет 1 кг железа на 1 т железа готовой продукции. В итоге балансы железа, макро- и микро-элементов предоставляют исчерпывающую информацию об общей степени их извлечения из всех металлургических материалов, поступивших на предприятие, в готовую продукцию и распространении в составе выбросов всех видов во все природные среды. Кроме того, они служат основой для определения мощности техногенных месторождений, формирующихся в регионах черной металлургии. Наиболее характерные параметры макробалансов железа интегрированных предприятий России, ЕС и Японии при производстве сортового и толстолистного проката приведены в табл. 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1

**Макробаланс железа для производственного цикла ЗСМК**

Статьи баланса	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Поступило в производственный цикл, всего, т	5 359 582	5 487 383	5 531 245	4 906 400



Окончание табл. 3.1

Статьи баланса	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Металлолом «со стороны», % от общего прихода железа	21,5	20,9	20,5	19,0
Отложенный производственный реци- клинг: шламы со «шламового поля», % от общего прихода железа	0	0,8	0,9	1,0
Степень извлечения железа в готовую продукцию, % от прихода железа «со стороны» и шламов	88,8	88,4	89,2	90,4
Железо рециклинга, кг/т железа готовой продукции	175	182	187	189
В том числе:				
обрезь	74	74	73	72
мелкодисперсные материалы	81	86	89	90

Таблица 3.2

**Макробаланс железа для производственного цикла ОАО «Носта»**

Статьи баланса	2004 г.	2002 г.	2001 г.	2003 г.
Поступило в производственный цикл, всего, т	309 078	266 271	236 579	248 108
В том числе металлолом «со стороны»	99 388	87 071	78 781	83 116
% от прихода железа	32,1	32,7	33,3	33,5
Перешло в готовую продукцию, т	264 259	225 798	201 565	244 617
Степень извлечения железа в готовую продукцию, % от общего прихода железа	85,5	84,8	85,2	86,1
Железо рециклинга, всего, т:	99 398	104 112	92 975	95 626
В том числе:				
То же, кг/т железа готовой продукции	376	391	393	385
обрезь	231	235	239	239

Таблица 3.3

**Некоторые параметры макробалансов железа интегрированных предприятий России, ЕС и Японии при производстве сортового и толстолистного проката**

Показатель	Предприятия РФ	Предприятия ЕС и Японии
Степень извлечения железа, % масс.	90...92	92...93
Доля вторичных ресурсов (амортизационного лома) в приходе железа, % масс.	18...22	25...27
Количество железа производственного рециклинга, кг/т железа проката	170...200	130...150

Приведенные данные наглядно демонстрируют, что при близких значениях общей степени извлечения железа в готовую продукцию аналогичного качества отечественные предприятия существенно уступают передовым мировым показателям использования вторичных ресурсов и производственного рециклинга. Анализ характерных макробалансов железа интегрированных предприятий черной металлургии России позволяет сделать следующие выводы:

1. Показатель «степень извлечения железа в готовую продукцию» с позиции принципов «социальной ответственности производителя» концепции 3R не может служить исчерпывающей характеристикой эффективности применяемых технологий, поскольку в отечественных условиях он, как правило, достигается за счет высокой доли использования природных ресурсов и при низком уровне переработки вторичных ресурсов.

2. Увеличение количества перерабатываемых вторичных ресурсов (амортизационного лома) в отечественных условиях обычно сопровождается увеличением количества материалов производственного рециклинга и связанных с их переработкой вторичных выбросов.

3. Для корректной оценки соответствия отечественных предприятий принципам «социальной ответственности производителя» концепции 3R они должны обладать системой учета металлургических материалов, обеспечивающей «прозрачность» движения железа во всем производственном цикле предприятия. В частности, из технических отчетов подразделений предприятий следует исключить позиции «угар», «улет» и т.п., должна быть введена единая унифицированная система учета вторичных материалов, обеспечивающая погрешность балансов железа не более 1 кг/т анализируемого материала (т.е. не более 0,1 %).

4. Разработанные в последние годы концепции развития отечественных интегрированных предприятий черной металлургии не ориентированы на преимущественное использование вторичных ресурсов, т.е. не являются ресурсосберегающими [268–274].

Для оценки соответствия металлургической технологии принципам «социальной ответственности производителя» концепции 3R и требованиям BAT (BREF) предлагается ввести критерий: степень извлечения железа на интегрированном предприятии черной металлургии в Обществе рециклинга –  $\mu_{Fe}$ , % масс.:

$$\mu_{Fe} = (100/Fe_{\Sigma}) \cdot (Fe_{\text{прир}} + Fe_{\text{втор}} \pm Fe_{\text{деп}} - Fe_{\text{выб}} - \varphi \cdot Fe_{\text{пр.рец}}),$$

где  $\mu_{\text{Fe}}$  – степень извлечения железа, % масс. от прихода железа в производственный цикл в составе природных и вторичных ресурсов и материалов, депонированных на территории предприятия (материалов «отложенного» рециклинга);

$\text{Fe}_{\text{прир}}$  – количество железа, поступившего в производственный цикл непосредственно из природной среды, кг/т Fe готовой продукции;

$\text{Fe}_{\text{втор}}$  – количество железа, поступившего в производственный цикл в составе вторичных ресурсов, кг/т Fe готовой продукции;

$\text{Fe}_{\text{деп}}$  – количество железа, поступившего в производственный цикл в составе материалов «отложенного» рециклинга (+) или размещенное на территории предприятия в составе «отложенных» отходов (–), кг/т Fe готовой продукции;

$\text{Fe}_{\text{выб}}$  – количество железа, безвозвратно потерянное в составе выбросов, кг/т Fe готовой продукции;

$\text{Fe}_{\text{пр.рец}}$  – количество железа, циркулирующее в производственном цикле предприятия в рамках производственного рециклинга, кг/т Fe готовой продукции;

$\phi$  – коэффициент безвозвратных потерь железа в составе вторичных выбросов, возникающих в процессах производственного рециклинга, доли ед.;

$\text{Fe}_{\Sigma}$  – общее количество железа, поступившего в производственный цикл в составе природных и вторичных ресурсов (в том числе материалов, депонированных на территории предприятия – материалов «отложенного» рециклинга).

В зависимости от структуры выпускаемой продукции для отечественных условий должны быть научно обоснованы максимально допустимые значения  $\text{Fe}_{\text{прир}}$ ,  $\text{Fe}_{\text{выб}}$ ,  $\text{Fe}_{\text{пр.рец}}$  и минимальный уровень  $\text{Fe}_{\text{втор}}$ . Ключевым параметром является уровень использования вторичных ресурсов амортизационного лома [97, 99, 100, 112, 113, 276–278]. Поэтому грамотный прогноз количества его образования и структуры становится существенным фактором в формирующейся системе государственного регулирования потребления вторичных ресурсов железа. Подобный прогноз, как показывают результаты последних исследований [58, 100, 103, 112, 277, 278], не может опираться на привычные параметры «норма сбора лома» и «средний срок эксплуатации стальных изделий». Он должен строиться исходя из современной методологии исследований, которую активно разрабатывают в передовых индустриально развитых странах.

### 3.4. Элементопоток марганца

Рассчитаны характерные балансы марганца для интегрированных предприятий черной металлургии передовых индустриальных стран и России. При составлении балансов использованы данные источников [198–203, 104–109, 264, 265, 279–281], а также Международного института черной металлургии (IISI), Национального консультативного совета по материаловедению (NMAV) и Бюро технической оценки проектов при Конгрессе США (ОТА). В качестве основных исходных допущений были приняты следующие:

- производительность комбината составляет 5 млн т стального проката в год;
- сырьевая база представлена рудами Курской магнитной аномалии и углями Кузнецкого бассейна;
- расходные коэффициенты сырьевых материалов (железорудных концентратов, окатышей, коксующихся углей, металлолома, флюсов и т. п.), продуктов металлургических переделов и вторичных материалов (оборотного лома, шлаков, шламов и др.) соответствуют условиям работы предприятий европейской части России.

Вариант № 1 соответствует технологической схеме с использованием конвертерного производства и выплавкой рядовых углеродистых сталей, а вариант № 2 – до сих пор применяемой в нашей стране схеме производства марганцовистых сталей в мартеновских печах (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Баланс марганца при производстве проката  
на интегрированных предприятиях черной металлургии, кг/т проката**

Статья баланса	Передовые страны ЕС и США				Россия (2005 г.)	
	1980	1990	2000	2005	ЗСМК № 1	«Носта» № 2
<i>Приход</i>						
Железорудные материалы, флюсы, коксующиеся угли	4,38	4,02	3,22	3,12	3,61	2,89
Марганцевые руды	0,64	0,86	0,43	0,32	1,70	–
Металлолом «со стороны»	1,69	1,89	2,31	2,42	0,71	1,12
Ферросплавы	5,40	4,35	4,17	4,01	4,60	12,27
Приход со стороны, и т о г о	12,11	11,15	10,13	9,87	10,62	16,28

Статья баланса	Передовые страны ЕС и США				Россия (2005 г.)	
	1980	1990	2000	2005	ЗСМК № 1	«Носта» № 2
Конвертерный шлак	1,41	1,91	2,95	3,12	1,85	–
Приход, и т о г о	13,52	13,06	13,08	12,99	12,47	16,28
<i>Расход</i>						
Стальной прокат	6,26	6,01	6,44	6,52	4,35	8,92
Доменный шлак, корольки, шлам, пыль	1,26	1,29	0,95	0,85	1,80	0,90
Сталеплавильные шлаки, корольки, шлам, пыль	5,80	5,60	5,55	5,50	6,05	6,25
Не уловленная пыль	0,20	0,16	0,14	0,12	0,27	0,21
Доля марганца, перешедшего в прокат, % от прихода со стороны	51,7	53,9	63,6	66,1	41,0	54,8
Доля марганца конвертерного шлака, подвергаемого производственному рециклингу, %	24,3	34,1	53,2	56,7	30,6	–
Расход марганца природных ресурсов на производство готовой продукции, кг/кг Мп проката	1,66	1,54	1,21	1,14	2,70	1,70

На передовых зарубежных предприятиях четко прослеживается тенденция существенного увеличения поступления марганца в производственный цикл в рамках глобального (с металлоломом) и производственного (в частности, с конвертерным шлаком) рециклинга. За двадцать пять лет (с 1980 по 2005 г.) это позволило добиться повышения степени перехода марганца в готовую продукцию из материалов, поступающих на предприятие со стороны, почти на 12% (с 51,7 до 63,6 %). Для отечественных предприятий данный показатель до сих пор составляет немногим более 40 % и существенно уступает схеме с использованием мартеновских печей. Расход марганца природных ресурсов (руд, флюсов, углей и ферросплавов) на производство готовой продукции (кг/кг Мп в прокате) на предприятиях ведущих индустриальных стран понизился с 1,66 до 1,14. В России он до сих пор находится на уровне 2,7.

Важно отметить, что низкий уровень использования вторичных материалов заставляет применять в производстве марганцевые руды,

расход которых на предприятиях черной металлургии России почти в четыре раза превосходит передовые зарубежные показатели. При этом не используются возможности повышения прихода марганца с металлоломом и конвертерным шлаком. По объему образования на металлургических заводах конвертерные шлаки занимают второе место после доменных, поэтому до сих пор актуальными остаются проблемы снижения выхода шлака и его максимального использования в собственном производстве и других отраслях индустрии.

Технологический маршрут, который позволил бы минимизировать объем образующегося шлака и связанные с ним затраты и вместе с тем обеспечил бы высокую производительность, зависит от многих факторов. На его выбор оказывают влияние наличие и качество сырья, состав оборудования, маркетинговая стратегия и сортамент продукции, а также экономические факторы, действующие по отдельности и совместно. Например, металлургические предприятия США, как правило, предпочитают не применять предварительную обработку чугуна, так как стремятся к высокой доле лома в завалке конвертеров, когда требуется высокое содержание кремния в жидком чугуне, заливаемом в конвертер.

Основными отраслями индустрии, в которых применяются конвертерные шлаки, являются автомобильная и строительная промышленность. Однако использование конвертерного шлака зависит от конкретной ситуации на отдельном заводе. Например, в Китае основное внимание уделяется производству цемента. Завод фирмы POSCO в Корее больше внимания уделяет использованию шлака для частичной или полной замены флюса в доменных печах и на агломерационных фабриках.

В Японии активное применение конвертерного шлака началось в 80-х годах XX в., когда около 40 % всего образующегося шлака использовали для подъема грунта. Однако в дальнейшем неуклонно увеличивалось потребление конвертерного шлака в качестве вторичного сырья.

Богатый опыт переработки металлургических шлаков имеют страны Евросоюза. Наиболее показательным отношением к этой проблеме в Германии, где уже в 1949 г. было организовано специальное научно-техническое общество (РЕПЗ) для всестороннего исследования свойств металлургических шлаков с целью их максимального использования в промышленности и сельском хозяйстве. В 1995 г. было принято решение об исключении металлургических шлаков из Европейского каталога отходов и Европейских правил обращения отходов

в Европейском сообществе. В 2000 г. РЕПЗ стал ядром общеевропейской ассоциации шлаков «еврошлак», которая была основана Европейской конференцией по шлакам в Дюссельдорфе.

В настоящее время в странах ЕС конвертерные шлаки применяются в трех основных направлениях: для вторичной переплавки в доменных печах, в качестве оснований дорог и составляющих асфальтобетных покрытий, а также для рекультивации почв. При этом наиболее перспективным признается вариант использования шлака в рамках производственного рециклинга и активно исследуются возможности его вдувания в доменные печи с целью улучшения условий шлакообразования.

### **3.5. Элементопоток галлия**

О повышенном содержании галлия в железных рудах известно давно [282], в СССР в 60 – 80-е годы XX в. проводили специальные геолого-оценочные работы по установлению содержания галлия в железных рудах. Повышенная концентрация галлия характерна для титано-магнетитовых руд Качканарского ГОК, который является главным источником железорудного сырья для ОАО НТМК и ОАО «Чусовской металлургический завод». Исследования титано-магнетитовых руд Качканарского месторождения проводились в 90-х годах специалистами Гиредмета [283].

В работе [283] отмечается, что анализы руд, концентратов и других металлургических материалов на содержание галлия выполнены по специально разработанной методике количественного спектрального анализа с предварительной селективной возгонкой из камерных электродов. Метод отличается очень высокой чувствительностью и точностью: нижний предел определения галлия 0,0001 % (1 г/т, или 1 ppm). Точность определения для содержаний 0,0001...0,001 % составляет 10 % отн., для содержаний от 0,001 % и выше — 7 % отн. Результаты анализов приведены в Приложении 2.

Наиболее высокое содержание галлия (45...52 г/т) характерно для титано-магнетитовых сырьевых материалов Качканарского ГОКа. В чугунах содержание галлия повышается почти в 1,5 раза и достигает 65...80 г/т. Продуктами передела железорудного сырья с высоким содержанием галлия в условиях ОАО НТМК являются пыли сталеплавленного производства и возгоны вакуумной обработки чугуна и стали, содержащие до 200 г/т галлия. Теоретические исследования по

термодинамике и кинетике процесса возгонки галлия, выполненные в гиредмете, свидетельствуют о том, что при вакуумной обработке чугуна галлий переходит в газовую фазу в виде GaS.

Для количественной оценки движения галлия в качестве микропримесного элемента была построена схема его элементопотока в металлургическом цикле ОАО НТМК (рис. 3.8, табл. 3.5).

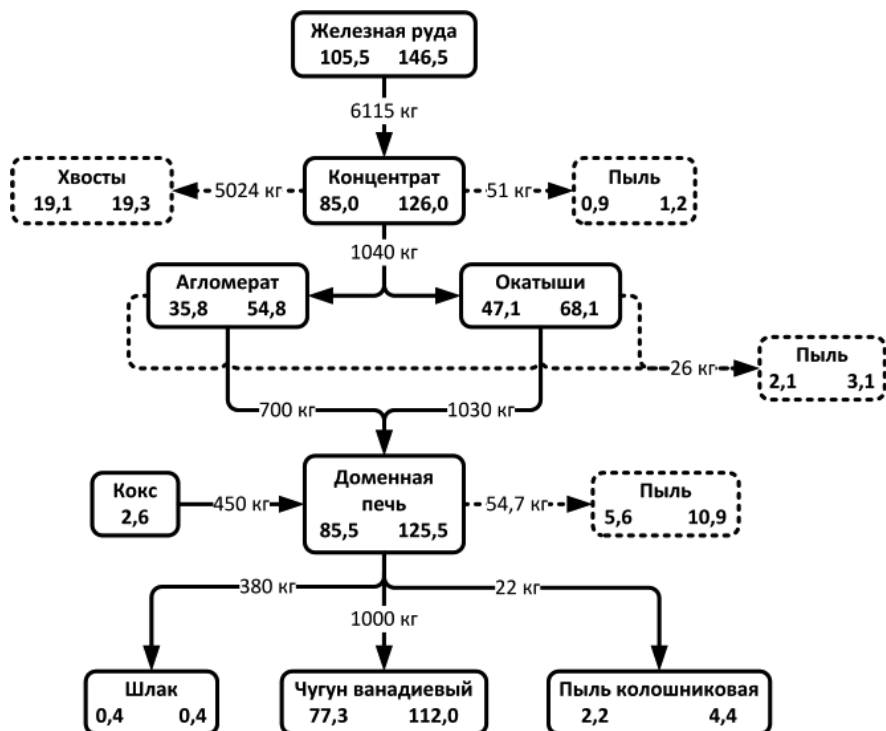


Рис. 3.8. Схема элементопотока галлия при производстве ванадиевого чугуна в ОАО НТМК (г/т чугуна)

Ванадийсодержащие титаномagnetиты Качканарского месторождения, являющегося железорудной базой комбината, содержат 45...52 г галлия /т руды. С ними в производственный цикл предприятия поступает 105,5...146,5 г галлия / т чугуна. В чугун переходит 77,3...112,0 г галлия. Таким образом, сквозной коэффициент извлечения галлия составляет около 75 %.



Таблица 3.5

**Содержание галлия в металлургических материалах, г/т**

Материал	По данным Гиредмета		По данным МИСиС	
	в материале	в пересчете на чугун	в материале	в пересчете на чугун
Железная руда	17,2	105,5	23,9	146,5
Пыль железной руды	17,6	0,9	23,5	1,2
Концентрат	81,7	85,0	121,1	126,0
Пыль концентрата	3,8	19,1	3,8	19,3
Хвосты	80,8	2,1	119,2	3,1
Агломерат	51,1	35,8	78,3	54,8
Окатыши	45,7	47,1	66,1	68,1
Кокс	5,8	2,6	5,8	2,6
Пыль колошниковая	100,0	2,2	200,0	4,4
Шлак	1,1	0,4	1,1	0,4
Пыль доменных печей	102,4	5,6	199,3	10,9
Чугун	–	77,3	–	112,0

Большая часть потерь галлия (около 15 % от его прихода с рудой) происходит в процессе обогащения руды. Прочие потери (с пылью и доменным шлаком) незначительны. Баланс галлия для условий НТМК представлен в табл. 3.6. С колошниковой пылью циркулирует 2,2 г/т чугуна (Гиредмет), 4,4 г/т чугуна (МИСиС).

Таблица 3.6

**Баланс галлия, г/т чугуна**

Поступает в производство			Получается в процессе производства		
	По данным Гиредмета	По данным МИСиС		По данным Гиредмета	По данным МИСиС
Железная руда	105,5	146,5	Пыль	25,7	31,4
Кокс	2,6	2,6	Хвосты	2,1	3,1
			Шлак	1,1	1,1
			Чугун	77,3	112,0
<b>Итого</b>	<b>108,1</b>	<b>149,1</b>	<b>Итого</b>	<b>108,1</b>	<b>149,1</b>

### **3.6. Баланс углерода и методология оценки энергоэффективности производства черных металлов и выбросов CO<sub>2</sub>**

Проблема энергосбережения в развитии современной цивилизации имеет две важнейшие особенности: с одной стороны, принятая мировым сообществом концепция «устойчивого развития» требует динамичного роста производства энергии; с другой стороны, именно энергетические агрегаты и установки по-прежнему являются основными источниками выбросов всех видов. В связи с этим главными приоритетами в развитии производства и потребления энергии в рамках ресурсоэкологической концепции являются:

- снижение последствий производства, передачи и потребления энергии для окружающей среды;
- оптимизация структуры потребления природных энергоресурсов;
- увеличение доли потребления вторичных энергоресурсов (ВЭР);
- снижение энергоемкости оборудования за счет совершенствования технологии производства.

Черная металлургия является одной из наиболее энергопотребляющих отраслей промышленности. При этом ей присущи характерные особенности:

1. Основу топливного баланса металлургических предприятий составляют коксующиеся угли – дефицитное высококачественное сырье, весьма специфичное по химическому составу.

2. Используемое в металлургических процессах топливо, как правило, выполняет множественные функции: оно не только является источником энергии, но также играет роль восстановителя и «поставщика» элементов-микропримесей.

3. В черной металлургии, как ни в какой другой отрасли индустрии, высока доля ВЭР, представленных газами – наиболее технологичным видом энергоресурсов.

Наглядно вышеупомянутые обстоятельства и вытекающие из них проблемы подхода к оценке эффективности затрат энергии представлены в табл. 3.6.

Вплоть до настоящего времени энергоэффективность производства металлов часто оценивается показателем энергоемкости вырабатываемой продукции, выраженной в единицах условного топлива (1 т.у.т. = 7000 ККал). При этом затраты всех видов энергии в виде

топлива, электрической и тепловой энергии на всех стадиях производства суммируются и из полученной величины вычитается энергия, произведенная энергетическим хозяйством предприятия в виде электроэнергии, пара, горячей воды, сжатого воздуха и т.п. Вычисленный таким образом параметр имеет следующие недостатки: во-первых, он никаким образом не связан с последствиями функционирования предприятия для окружающей среды и, во-вторых, не дает информации об уровне использования вторичных энергоресурсов, а лишь показывает абсолютную величину энергии, вырабатываемой при их утилизации.

Таблица 3.6

**Методические проблемы оценки эффективности  
энергосбережения в черной металлургии**

Особенности энергопотребления в черной металлургии	Факторы, требующие учета и специальной методической проработки	Проблемы отраслевого уровня	Проблемы регионального и глобального масштаба
Высокая энергоемкость металлургических агрегатов	Балансы углерода, водорода и электроэнергии	Уменьшение энергоемкости Оптимизация использования различных видов топлив	Распределение электроэнергии
Специфичность основного источника энергии (кокса)	Микропримесный состав коксующихся углей	Комплексная переработка металлургических углей	Развитие производства попутной продукции
Множественность функций металлургических топлив	Металлургические свойства топлива. Взаимозависимости между показателями потребления энергии, восстановительных процессов и интенсивность плавки	Минимизация расхода топлива без потери устойчивости процесса	Снижение выбросов «парниковых газов»
Высокая доля ВЭР	Параметры энергетической ценности и технологичности ВЭР. Эффективность газоочистных сооружений	Увеличение доли ВЭР в тепловом и энергетическом балансах предприятий	Уменьшение золошлаковых отходов с последующей ликвидацией ЗШН

Предлагаемая методика оценки энергоэффективности производства металла базируется на составлении балансов основных энергетических элементов: углерода и водорода, а также электроэнергии. Центральное место при этом занимает баланс углерода, который составляется для всего производственного цикла получения металла от добычи сырья и источников энергии до обращения с производственными и отложенными отходами [8, 137–142]. Анализ энергоэффективности работы предприятий черной металлургии на основе балансов углерода позволяет:

- сопоставить долю различных видов энергии, используемых при производстве чугуна и стали,
- получить информацию о наиболее масштабных и токсичных выбросах в окружающую среду, например золошлаковых отходов (ЗШО) и шламов различных процессов на поверхность Земли, оксида и диоксида углерода и углеводородов – в атмосферу.

Баланс углерода строится в размерности «кг углерода / кг (т) железа в конечной продукции предприятия» для каждого конкретного металлургического завода, что позволяет, во-первых, сравнивать показатели производств с различной структурой, а, во-вторых, получать сквозные, сводные балансы, учитывающие транспортные затраты (и выбросы) на перевозку сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и передачу электроэнергии.

Учитывая, что наиболее достоверной информацией являются данные по содержанию углерода в твердых металлургических материалах, в расходной части балансов эта информация учитывается непосредственно, данные о выбросах СО контролируются расчетами на основе известных технологических параметров, а выбросы СО<sub>2</sub> определяются по разности приходной и рассчитанной вышеупомянутым способом расходной частей баланса.

В разделе «Приход углерода» указываются удельные расходы углеродсодержащих материалов и газов, поступающих на предприятие, а также содержание в них углерода. Приход углерода в виде электроэнергии «со стороны» для условий России рассчитывается исходя из следующих условий:

- расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии составляет 385 г, или 286 г углерода/ кВт·ч;
- потери при передаче электроэнергии составляют 42 % отн.

В разделе «Расход углерода» рассчитываются выбросы углерода в виде  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , а также выбросы углерода в твердом виде, в том числе выход углерода с готовой продукцией, а затем – по разнице с приходом углерода – определяется выброс углерода в виде  $\text{CO}_2$ .

При расчете выбросов углерода в виде шламов и ЗШО принимается, что при сжигании газов улавливается от 1,2 до 3,8 г сажистого углерода, а при сжигании энергетического угля и «промпродукта» улавливается от 40 до 60 г сажистого углерода на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии.

Примеры балансов углерода для отдельных предприятий России и Германии приведены Приложении 3. Усредненный баланс углерода для интегрированного предприятия черной металлургии для условий европейской части России представлен в табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Баланс углерода при производстве стального проката  
в условиях европейской части России с учетом транспортировки  
сырых и шихтовых материалов от мест их добычи и производства  
к металлургическим комбинатам**

Статьи баланса	Расход углерода	
	кг/т железа	% масс.
Приход		
1. Угольный концентрат для коксования	828	51,45
2. Природный газ	149	9,25
3. Мазут топочный	2	0,10
4. Энергоресурсы для сжигания на собственных ТЭЦ в пересчете на углерод «условного топлива»	123	7,65
5. Электроэнергия из внешних сетей в пересчете на углерод «условного топлива» *	377	23,40
6. Взрывчатые вещества	1	0,05
7. Горючесмазочные материалы, масла, спирты и т.п.	7	0,45
8. Дизельное топливо, керосин и т.п. для осуществления транспортных перевозок	31	1,95
9. Железорудные материалы, ферросплавы, металлолом	5	0,30
10. Флюсы	87	5,40
И т о г о приход	1610	
Расход		
1. Готовая продукция	2	0,10

Статьи баланса	Расход углерода	
	кг/т железа	% масс.
2. Попутная продукция КХП	34	2,10
3. Шламы и ЗШО от сжигания и углерепереработки.	46	2,85
4. Пыль, шламы, золы, спель и прочие твердые материалы, не утилизируемые в рамках производственного рециклинга**	27	1,65
5. Выбросы в атмосферу в виде СО	113	7,00
6. Выбросы в атмосферу в виде СО <sub>2</sub>	1388	86,30
В том числе:		
при сжигании для производства электрической и тепловой энергии	—	54,3
при агломерации	—	6,3
при переработке флюсов	—	3,5
при сжигании доменного и коксового газов	—	15,7
потери газов (в том числе технологические)	—	6,5

\* Свыше 60 % электроэнергии, используемой при производстве черного металла в центральной части РФ, производится на АЭС (в основном Курской и Воронежской).

\*\* Около 60 кг углерода/т железа циркулирует в производственном цикле в рамках рециклинга.

**Целесообразность применения различных видов топлив в конкретных металлургических производствах.** Применение топлива на металлургических предприятиях России имеет еще один важнейший аспект: распределение топливных ресурсов между предприятиями разной мощности и разного профиля. В настоящее время это происходит на основе приоритетности технологических характеристик топлива (т.е. удобства его использования при прочих равных условиях). Именно этим можно объяснить повышенную долю газообразного топлива на крупных металлургических предприятиях и, соответственно, высокую долю низкокалорийных твердых видов топлива на предприятия мини- и микро- металлургического профиля. Между тем мировая практика показывает [284–286], что при приоритете эффективности использования энергии все должно быть наоборот. Таким образом, оценка энергоэффективности металлургических технологий с точки зрения затрат условного топлива не отражает реального существа вещей. Предлагаемый переход на использование баланса углеро-

да является методически более обоснованным, поскольку позволяет оценить в совокупности собственно энергоэффективность производства, последствия для окружающей природной среды и возможности производственного рециклинга ВЭР, которые на крупных предприятиях намного больше, чем на малых.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложен новый показатель, оценивающий энергоэффективность металлургического производства и представляющий собой приведенный расход углерода, затрачиваемого на производство железа в единице металлопродукции. Применение этого показателя дает возможность кроме оценки энергоэффективности определять последствия производства металла с точки зрения воздействия на окружающую природную среду, а также уровень использования ВЭР в рамках производственного рециклинга.

2. Выявлена необходимость в разработке показателя (группы показателей), оценивающего возможность комплексной переработки металлургических углей.

3. Суммарный расход углерода на производство 1 т железа в виде проката (от момента извлечения сырья из недр до выхода проката с территории предприятия, включая добычу источников энергии, производство и передачу энергии и транспортировку сырых материалов) на предприятии полного цикла для условий европейской части России составляет от 1300 до 1700 кг. Суммарный расход углерода на производство 1 т железа в виде концентрата на ГОК центра России составляет 220...270 кг.

4. От 4 до 7 % углерода теряется в виде шламов, выбросов пыли и т.п., что ранее в балансах т.у.т. не учитывалось.

5. Выбросы диоксида углерода – основного парникового газа – для металлургических предприятий полного и неполного циклов составляют от 80 до 87 % от общего расхода углерода, а для ГОКов – 95...98 %.

В передовых индустриальных странах в последнем десятилетии вопросы сбережения и оценки эффективности использования энергии, как правило, рассматриваются во взаимосвязи с выбросами  $\text{CO}_2$ . Необходимость разработки методологических аспектов анализа энергоэффективности черной металлургии в рамках концепции ЭЧП впервые подробно обсуждалась на конференции металлургов в Торонто в 2001 г. [284–286].

Была отмечена необходимость разработки методик трех видов.

1. Определение затрат энергии и выбросов  $\text{CO}_2$  «от технологического процесса». В работах [285–290] для этого предлагается использовать «баланс углерода» – «простой, на подобие бухгалтерского, учет всех затрат углерода на производство на интегрированном сталеплавильном заводе, а также на выработку энергии и получение сырьевых материалов» [286]. После составления баланса углерода его общее количество переводится в  $\text{CO}_2$  и относится на счет производства технически необработанной (жидкой) стали. Такой способ анализа предполагает, что отходящие газы основных металлургических агрегатов сжигаются на последующих этапах технологического потока либо в нагревательных печах, либо на электростанции.

2. Анализ жизненного цикла материала – стали или чугуна. Было предложено «дополнительно учитывать затраты энергии и выбросы при добыче и транспортировке сырьевых материалов, а также выбросы при выработке и транспортировке электроэнергии» [284–290].

3. Анализ жизненного цикла изделия черной металлургии. Отмечалось [286–290], что он выполняется для потребительских товаров, что дает результаты трудно сопоставимые с приведенными выше методиками, так как затраты энергии и выбросы относятся на единицу использования товаров, а не на материалы, из которых они изготавливаются.

На конференции были подробно рассмотрены материалы, подготовленные несколькими группами исследователей IISI [287–290]. Основное внимание исследователей фокусировалось на проведении анализа возможностей экономии энергии и снижении выбросов  $\text{CO}_2$ . Был выполнен детальный обзор возможных усовершенствований металлургических технологий на каждом этапе процесса производства стального проката. Предложено рассматривать перспективы новых технологий с позиций анализа экологических сценариев. Подробно анализировались два гипотетических сталеплавильных предприятия: завод с применением технологии «Экотех» (Ecotech) для выполнения краткосрочных прогнозов и «Олтех» (Alltech) для выполнения среднесрочных прогнозов. Впоследствии концепция экологических сценариев для анализа тенденций развития металлургии в направлении сбережения энергии и снижения выбросов получила активное развитие [113, 276, 291–294].



Значительное внимание было уделено методической проблеме учета в балансе выбросов  $\text{CO}_2$  и их уменьшения вследствие применения доменного шлака в цементной промышленности [286, 295].

Доменный шлак является главным вторичным материалом для цементной промышленности, он замещает сырьевые материалы с высокими выбросами диоксида углерода (известняк). При этом из технологической цепи производства цемента исключаются энергоемкие высокотемпературные вращающиеся обжиговые печи. Поэтому, если рассматривать металлургический завод как совместное производство стали и шлака, то выбросы парникового газа должны распределяться между этими двумя продуктами. На примере получения доменного шлака был проведен анализ, который показал, что на 1 т проданного в цементную отрасль промышленности шлака приходится сокращение выбросов  $\text{CO}_2$  по данным разных источников примерно на 940...1250 кг [286, 295, 296]

Важная в методическом плане работа была опубликована в 2001 г. [297]. Она посвящена комплексному изучению выбросов  $\text{CO}_2$  при производстве стали с использованием технологической цепи доменная печь – конвертер, с учетом предварительных операций начиная с получения сырья. Согласно ранее опубликованным данным [286–290, 295, 296] выбросы  $\text{CO}_2$  в границах данной технологической цепи составляют от 1800 до 2100 кг на 1 т стали. Для проверки этих данных была проведена комплексная оценка выбросов  $\text{CO}_2$ , исходя из существующих материальных потоков, с учетом побочных продуктов, а также утилизации отходящего тепла. При расчете выбросов  $\text{CO}_2$  «использовали только производственные показатели современных агрегатов, отличающихся низкими удельными расходами кокса и восстановителей». Рассматривались заводы с полным циклом, имеющие коксохимическое производство и агломерационную фабрику. Для расчетов были приняты следующие краевые условия:

- использованы эксплуатационные данные современных установок, которые характеризуются низким удельным расходом кокса и восстановителей;

- рассматриваются только металлургические предприятия с коксохимическим производством и агломерационной фабрикой;

- тяжелый мазут рассматривается как непосредственно используемый отход нефтехимической отрасли и оценивается только с материальной точки зрения;

– вдуваемая угольная пыль является веществом, которое необходимо добыть, подвергнуть обогащению и только путем измельчения она станет пригодной для использования в доменной печи;

– оценка выбросов  $\text{CO}_2$  при получении мелкой руды, кусковой руды и в производстве окатышей основана на данных поставщиков металлургического оборудования [98, 299];

– для оценки выбросов  $\text{CO}_2$  при операциях транспортировки рассматривалась доставка из портов Бразилии в порты Северного моря и последующая перевозка речным транспортом на расстояние около 2100 км;

– поставка лома осуществляется грузовыми автомобилями из района, представляющего собой окружность радиусом 100 км;

– транспортировка известняка осуществляется железнодорожным транспортом из пункта, находящегося на расстоянии 200 км; при его добыче принимался такой же выброс  $\text{CO}_2$ , как при добыче руды;

– обожженная известь вносит в баланс  $\text{CO}_2$  нагрузку, равную примерно 1000 кг  $\text{CO}_2$  на 1 т;

– в балансе учитывались «возможные доходы» (имеются в виду факторы, снижающие отягощение окружающей среды диоксидом углерода);

– «возможным доходом» являются, например, доменный и конвертерный газы, реализуемые стороннему потребителю, точнее, только их составляющая  $\text{CO}$ , имеющая энергетическую ценность, а также гранулированный шлак, заменяющий соответствующее количество клинкера в производстве цемента, и кусковой шлак, реализуемый в дорожном строительстве и служащий адекватной заменой природному щебню;

– при производстве электроэнергии в Германии принята норма выбросов  $\text{CO}_2$ , равная 0,6 кг на 1 кВт·ч, применяемая также и к части энергии, вырабатываемой на АЭС;

– избыточные газы, выделяющиеся в ходе описываемых процессов (применяемые, например, в печах прокатных станков), оценивались с материальной точки зрения по количеству заменяемой ими энергии.

При комплексном рассмотрении были получены следующие результаты:

– для коксохимических производств выбросы  $\text{CO}_2$  составляют от 4120 до 4178 кг на 1 т кокса;

– при производстве агломерата выброс  $\text{CO}_2$  получается в пределах 314...377 кг на 1 т агломерата;

– при выплавке чугуна эффективный выброс  $\text{CO}_2$ , в котором учитываются «возможные доходы» (косвенное уменьшение выбросов от использования гранулированного шлака и сжигания колошниковых газов), колеблется в пределах 1593...1651 кг на 1 т переплавленного чугуна;

– вклад лома в баланс  $\text{CO}_2$  исходя из его транспортировки и разделки оценивается в 18,7 кг на 1 т стали;

– получение конвертерного газа является «возможным доходом», что в сумме для технологической цепи доменная печь – конвертер дает для принятых производственных условий значения суммарных выбросов  $\text{CO}_2$  в интервале 1455...1510 кг на 1 т стали.

Таким образом, при рассмотрении возможных доходов от использования побочных продуктов и утилизации отходящего тепла нетто выбросы  $\text{CO}_2$  в технологической цепи доменная печь – конвертер в среднем составляют 1480 кг/т стали.

Баланс углерода и расчет выбросов  $\text{CO}_2$  для интегрированного предприятия черной металлургии Германии с учетом «возможных доходов» от производства электроэнергии «на сторону» и реализации доменного шлака строительной промышленности представлен ниже, кг/т железа проката:

#### *Приход*

Железорудные материалы с учетом транспортировки . . . . .	14,78
Металлолом с учетом транспортировки и подготовки . . . . .	18,75
Флюсы с учетом транспортировки . . . . .	5,20
Кокс с учетом транспортировки углей . . . . .	341,46
Ферросплавы . . . . .	0,05
Природный газ . . . . .	84,42
Восстановительные добавки к доменному дутью . . . . .	69,60
Дизельное топливо . . . . .	0,85
Смазочные материалы . . . . .	4,92
Известняк . . . . .	20,33
В с е г о приход углерода . . . . .	560,36

#### *Расход*

ЗПП . . . . .	4,92
Обжиг известняка . . . . .	9,15
Агломерационный газ . . . . .	70,79
Доменный газ . . . . .	328,86
Конвертерный газ . . . . .	39,51
Прокат . . . . .	0,31

#### *Возможные доходы*

Электроэнергия от сжигания металлургических газов . . . . .	70,49
Доменный шлак в строительство . . . . .	85,23
Выбросы углерода в виде $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$ и углеводородов (по разности) . . . . .	399,41

В расчетах учитывались затраты углерода (в виде энергии, топлива и материалов) на добычу, транспортировку, подготовку к металлургическому переделу, собственно металлургическое производство с его инфраструктурой, а также «возможные доходы» от использования металлургических продуктов – газов и шлака. Результаты расчетов (выбросы  $\text{CO}_2$  составляют около  $1465 \text{ м}^3$ ) хорошо коррелируют с данными работы [297]. Особо следует отметить, что методический подход, заключающийся в комплексной оценке затрат энергии и выбросов в окружающую среду на основе расчета параметров элементопотока углерода, может быть использован и при анализе этапов эксплуатации и рециклинга (или депонирования) любого продукта черной металлургии. Это в полной мере соответствует принципам «интегрированной политики экопродукта», реализуемой ЕС в настоящее время. Кроме того, именно построение элементопотока углерода вместо составления его балансов в наибольшей степени отвечает принципам анализа ЖЦИ на основе анализа экологических сценариев. На конференции «Stahl 2003» комитеты «Коксохимическое производство», «Доменное производство», «Сталеплавильное производство» и «Основы металлургии» Института стали Общества немецких специалистов по черной металлургии (VDEh) совместно представили доклады, основная тема которых «Материальный и энергетический КПД». В результате методики комплексной оценки энергоэффективности технологий и производств черной металлургии и выбросов  $\text{CO}_2$ , основанные на составлении баланса углерода получили всеобщее признание [103, 295].

Методология анализа баланса (а по сути – элементопотока) углерода положена в основу программ « $\text{CO}_2$  Breakthrough Program» – прорыв в сокращении выбросов  $\text{CO}_2$  и Ulcos (Ultra low  $\text{CO}_2$  steelmaking – производство стали со сверхнизким объемом выбросов  $\text{CO}_2$ ), которые осуществляет международный институт черной металлургии [294, 295]. Методики оценки энергоэффективности и выбросов  $\text{CO}_2$ , основанные на составлении балансов углерода, получили развитие и в России [300–302]. В работе [301] для оценки воздействия вредных выбросов металлургического производства на окружающую среду применена методология последовательности воздействия (Impact Pathway Methodology).

Исходя из сказанного выше для оценки соответствия металлургической технологии принципам «социальной ответственности про-

изготовителя» концепции 3R и требованиям BAT (BREF) предлагается ввести критерий «приведенный расход углерода на единицу металлопродукции»  $C_{\text{BAT}}$ , ед.:

$$C_{\text{BAT}} = \frac{C_{\text{в}}^{\text{г}} + C_{\text{в}}^{\text{ТВ}} - C_{\text{э.э}} - C_{\text{п.п}}}{C'_{\text{BAT}} - C_{\text{прод}}},$$

- где  $C_{\text{в}}^{\text{г}}$  – выбросы углерода в составе газов, кг/т проката;  
 $C_{\text{в}}^{\text{ТВ}}$  – выбросы углерода в составе твердых отходов, кг/т проката;  
 $C_{\text{э.э}}$  – предотвращенные выбросы углерода за счет использования ВЭР, кг/т проката;  
 $C_{\text{п.п}}$  – предотвращенные выбросы углерода за счет использования попутной продукции, кг/ т проката;  
 $C_{\text{прод}}$  – углерод в составе готовой продукции, кг/т проката;  
 $C'_{\text{BAT}}$  – наилучший (минимальный) достигнутый расход углерода на единицу анализируемой металлопродукции, кг/т проката.

### **3.7. Оценка возможности энергосбережения при очистке металлургических газов от пыли**

В последние годы активно подвергаются переоценке ресурсо-экологические представления об эффективности и целесообразности мероприятий, связанных с охраной окружающей природной среды. Последствия функционирования крупных промышленных предприятий рассматриваются с точки зрения возможности энергосбережения и рециклинга материалов. Важнейшее место при этом занимают вопросы формирования выбросов в окружающую среду и необходимости их подавления. В частности, в работе [303] для оценки экономичности процессов пылеочистки предложено ввести коэффициент использования затраченной энергии, являющийся отношением суммы полезных энергий, затраченных на непосредственное улавливание пыли, к общим затратам различных видов энергии на процесс пылеулавливания.

Анализ эффективности очистки металлургических газов от пыли (на примере колошникового газа), основанный на методологии баланса углерода, выполнен в работах [143, 144]. Оценивалась эффективность «тонкой» очистки от пыли, поскольку именно она потребляет основное количество электроэнергии (свыше 30 %) и именно мельчайшие пылевые фракции поступают в ЗШН, занимая определенную территорию. Колошниковая пыль выбросом не является, потому что полностью ути-

лизируется в агломерационном производстве. В проведенных расчетах использовалась следующая исходная информация (по данным газового цеха и ТЭЦ интегрированного предприятия – ОАО ММК):

- количество очищенного колошникового газа доменного цеха;
- количество уловленной пыли;
- количество электроэнергии, израсходованной на транспортировку пыли в шламонакопитель;
- количество природного газа, затраченного на выработку электроэнергии.

Энергетические затраты на очистку  $1000 \text{ м}^3$  доменного газа от 3 кг пыли составили около 72 кВт·ч.

Оценим выбросы пыли, имеющие место при добыче, переработке, транспортировке и сжигании различных энергоносителей (табл. 3.7). В расчетах приняты следующие расходные коэффициенты: на 1 т кокса, используемого в доменном производстве, образуется  $550...600 \text{ м}^3$  коксового газа и примерно  $4000 \text{ м}^3$  доменного газа.

Таблица 3.7

**Выбросы в атмосферу при производстве электроэнергии, кг/т или кг/1000  $\text{м}^3$**

Энергоноситель	Добыча и переработка	Транспортировка	Сжигание	Сумма
Уголь	1,3	3,2	32,6	37,1
Нефтепродукты	10,0	0,2	7,6	17,8
Природный газ	1,5	0,05	0,7	2,25
Коксовый газ	3,6	8,8	0,25	12,65
Доменный газ	0,45	1,1	1,5	3,05

С точки зрения энергетики коксовый и доменный газы не являются побочными продуктами производства, соответственно кокса и чугуна. Поэтому при определении последствий их использования учитывались выбросы пыли и токсичных газов на предыдущих стадиях их получения, т.е. добычи коксующихся углей, их транспортировки, коксования, доменной плавки и т.п. Вообще же проблема учета выбросов в производствах с несколькими видами готовой продукции требует применения специальных методов.

Исходя из коэффициента расхода условного топлива – 385 г/(кВт·ч) (286 г С/кВт·ч) следует, что аналогичные коэффициенты для других энергоносителей составят:

- энергетический уголь  $\sim 0,5$  кг/(кВт·ч);
- нефтепродукты –  $0,28...0,36$  кг/(кВт·ч);
- природный газ –  $\sim 0,35$  м<sup>3</sup>/(кВт·ч);
- коксовый газ –  $0,6...0,8$  м<sup>3</sup>/(кВт·ч);
- доменный газ –  $2,5...3,5$  м<sup>3</sup>/(кВт·ч).

Отметим, что и в черной металлургии ЕС анализ выбросов производится исходя из коэффициента затрат углерода на производство 1 кВт·ч электроэнергии. Обоснованию подобного подхода посвящены работы [286–290]. В них определены затраты углерода, характерные для различных схем производства электроэнергии. Например:

- среднемировая схема: около 50 % электроэнергии – из углеродсодержащих источников – 127 г С/ кВт·ч;
- французская схема (до закрытия АЭС в начале века): около 10 % электроэнергии – из углеродсодержащих источников – 16 г С/ кВт·ч.

Определим выбросы, которые будут иметь место при тонкой очистке доменного газа в случае использования различных энергоносителей для производства потребляемой электроэнергии без учета ее транспортировки (табл. 3.8). При этом примем, что прочие (кроме пыли) выбросы ТЭЦ, работающей на энергетическом угле, для условий России составляют:

- $6,5...7,5$  кг шламов/кг пыли;
- $6,0...6,5$  кг SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> и углеводородов на 1 кг пыли;
- $15,0...18,0$  кг CO<sub>2</sub>/кг пыли.

Таблица 3.8

**Выбросы в атмосферу при производстве электроэнергии,  
расходуемой на очистку доменного газа (кг/1000 м<sup>3</sup> доменного газа)  
в условиях России**

Энергоноситель	Расход для производства 72 кВт·ч	Выбросы, связанные с использованием энергоносителя для улавливания 3 кг доменной пыли, кг		
		общие	пыль	CO <sub>2</sub>
Уголь	36 кг	53,6	1,34	16,1
Нефтепродукты	20 кг	14,4	0,36	4,3
Природный газ	25 м <sup>3</sup>	2,4	0,06	0,7
Коксовый газ	50 м <sup>3</sup>	25,2	0,63	7,6
Доменный газ	210 м <sup>3</sup>	25,6	0,64	7,7

Для оценки соответствия металлургической технологии принципам «социальной ответственности производителя» концепции 3R и требованиям БАТ (BREF) предлагается ввести критерий – приведенный расход электроэнергии на единицу улавливаемой пыли  $E_i$  (кВт·ч/ г пыли):

$$E_i = \frac{V_{\text{м.а}}^i}{\delta_3 V_3^i} \frac{1}{M},$$

где  $E_i$  – затраты электроэнергии на единицу улавливаемой пыли, кВт·ч/кг пыли;

$V_{\text{м.а}}^i$  – выбросы (суммарные или конкретных компонентов – CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и др.) из анализируемого металлургического агрегата, кг (м<sup>3</sup>)/1000 м<sup>3</sup> газа;

$V_3^i$  – выбросы (суммарные или конкретных компонентов – CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и др.) при производстве электроэнергии, кг (м<sup>3</sup>)/(кВт·ч);

$\delta_3$  – коэффициент, учитывающий передачу электроэнергии, доли ед.,  
 $M$  – количество улавливаемой пыли, кг/1000 м<sup>3</sup> газа.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что тонкая очистка промышленных газов от пыли не имеет перспектив в будущем даже в случае возможности организации на предприятиях эффективного рециклинга вторичных энергетических ресурсов. Снижение выбросов такого рода должно основываться не на очистке газов, а на подавлении выбросов технологическими приемами.



## **Глава 4. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ**

### **4.1. Методология комплексных исследований поведения микроэлементов в сложных металлургических системах на примере доменной плавки**

Для построения элементопотока необходимо знать, как конкретный элемент ведет себя в каждом металлургическом переделе. Статистической информации для такого анализа ввиду высокой сложности металлургических систем недостаточно. Методология исследования поведения микроэлементов в металлургических системах базируется на комплексном термодинамическом и балансовом способах их анализа [8, 304–308].

Микроэлементы содержатся во всех шихтовых материалах и дутьевых добавках, применяемых в доменной плавке. Они могут входить в состав материалов природного происхождения и материалов, подвергнутых техногенным преобразованиям [309–312]. Современная доменная плавка практически полностью проходит на шихте из предварительно термически обработанных материалов, т.е. по существу на материалах техногенного происхождения, заново прошедших стадию минералообразования. При производстве агломерата – основного компонента железорудной части доменной шихты – в рамках производственного рециклинга широко используются мелкодисперсные материалы, обогащенные примесными микроэлементами [313–316].

Особую специфику имеют микропримеси, входящие в состав кокса и каменных углей. Они присутствуют в упомянутых материалах в двух основных формах. Микроэлементы могут находиться непосредственно в кристаллической структуре, формируемой атомами углерода; в этом случае принято говорить, что они входят в состав «органической» части массы угля или кокса. Атомы примесных микроэлементов при этом называются также «гетероатомами» углеродной кристаллической решетки. Кроме того, микроэлементы могут находиться в частицах, попавших в угольные пласты в процессе их формирования, или в частицах пород, вмещающих угольные пласты, оставшихся в угольном концентрате после обогащения и перешедших впоследствии в металлургиче-

ский кокс. О таких микроэлементах принято говорить как о входящих в «минеральную» часть угля или кокса. Поведение микропримесей «органической» и «минеральной» частей кокса и угля в доменной плавке, как правило, имеет существенные отличия [317–320].

Доменный процесс представляет собой сложный объект исследований, поскольку формирующаяся в доменной печи металлургическая система включает все виды сред – газовую, жидкую и твердую – и характеризуется сложными закономерностями массообменных процессов в противоточной системе в широком интервале температур (от 50 до 2500 °С) и давлений до 0,5 МПа. В последние годы характер доменного процесса существенно изменился:

- повысилась интенсивность процессов в горне печи (особенно в печах большого объема), что привело к снижению времени контакта чугуна и шлака;
- возросла роль процессов, протекающих непосредственно на поверхности коксовой насадки, в том числе в «тонких пленках» металлических и оксидных расплавов;
- особое значение приобрели процессы в окислительной зоне печи, в связи с постоянным увеличением доли и разнообразия применяемых топливных добавок [321–324].

По мнению многих специалистов [325–331], в ближайшие десятилетия неизбежен переход на широкое использование в доменной плавке комплексных руд, пылеугольного топлива, мазута и плотных углей. Именно дополнительное топливное сырье (особенно низкосортные угли и мазуты) отличается повышенным содержанием примесных микроэлементов, таких как свинец, никель, ванадий, титан, медь, молибден.

Важными особенностями рудной и топливной базы предприятий черной металлургии России в настоящее время являются:

- выраженный акцент на широкое использование материалов из собственных отвалов и накопителей (мощность которых по некоторым оценкам превышает 100 млн т), что позволит в течение ближайших 30–50 лет работать с долей «собственного», часто загрязненного примесями железа до 10 % от общего количества, поступающего на комбинат полного цикла;
- ориентация предприятий Южного Урала и Западной Сибири, в связи с высокими затратами на транспортировку железорудных мате-

риалов, на разработку запасов собственных месторождений сложного генезиса с высоким содержанием микропримесей [332–335];

- высокий расход в доменном производстве кокса, при производстве которого часто используются концентраты коксующихся углей с повышенным содержанием микропримесей.

По сути производимые в настоящее время в России чугуны являются «микролегированными» (Приложение 4) и содержат от 20 до 28 примесных элементов общим количеством от 0,55 до 1,6 кг/т чугуна. Тем не менее представления о поведении в доменной плавке примесных микроэлементов по-прежнему базируются на данных 30–40-летней давности.

При разработке новой методики анализа поведения микропримесей в доменной плавке исходили из следующих соображений. Поскольку относительные количества микропримесей незначительны, их поведение главным образом зависит от способа и места их попадания в реакционное пространство металлургического агрегата. Если элемент распределен равномерно и достаточное время находится в реакционной зоне, то должно устанавливаться его равновесное распределение между всеми фазами. Однако примеси попадают в доменную печь компактно в отдельных составляющих сырьевых материалов. Например, многие редкие и цветные металлы концентрируются в органической части кокса, галогены входят в состав железорудных минералов и дутьевых добавок. При таком комплексном попадании в печь примеси «чувствуют» только локальное реакционное окружение, которое зависит от той составляющей, в которой они находятся.

Попадающие в доменную печь микроэлементы распределяются между жидкими продуктами плавки (чугуном и шлаком), доменным газом и пылью (колошниковой пылью и шламом). Кроме того, они переходят в состав некоторых особых образований, формирующихся в печи в процессе ее эксплуатации: гарнисажа, настыйей, отложений на загрузочных устройствах, выделений некоторых металлов (например, свинца, титана, лантаноидов) на футеровке горна и лещади и т.п. Микроэлементы могут формировать также контуры циркуляции во внутреннем пространстве печи в результате возгонки при высоких и последующей конденсации на поверхности твердых шихтовых материалов при низких температурах. Микроэлементы, попадающие в

шламы газоочистных сооружений, могут накапливаться в цикле «доменная печь → шлам → агломерация → доменная печь».

Разработанная методика для изучения поведения микропримесей в доменной плавке включает экспериментальную, исследовательскую и расчетную теоретическую части. Экспериментальная часть базируется на сведении баланса по каждому исследуемому элементу, а теоретическая – на термодинамических расчетах равновесия для сложных химических систем. В результате сопоставления экспериментальных данных и результатов моделирования выполняется оценка распределения элемента между чугуном, шлаком и газовой фазой доменного процесса.

Для исследования поведения микроэлементов в условиях доменной плавки были использованы следующие методики и выполнены эксперименты:

- отбор проб металлургических материалов доменного производства;
- выполнение тонкий химический анализ металлургических материалов;
- изготовление, обжиг и восстановление содержащих микроэлементы железорудных окатышей и брикетов;
- выплавка чугуна, содержащего микроэлементы;
- изготовление шлифов;
- исследование минералогической структуры шлифов материалов, содержащих микроэлементы.
- термодинамическое моделирование поведения микроэлементов в сложных металлургических системах, характерных для доменного процесса.

Исследования по физическому моделированию поведения микроэлементов в металлургических системах были выполнены в лабораториях МИСиС, Института металлургии им. Байкова, Гиредмета.

Исследования поведения микроэлементов в доменном процессе проводились на базе металлургических предприятий: ОАО «Северсталь», АК «Тулачермет», ОАО НЛМК, ОАО НТМК, ОАО «Косогорский металлургический завод», ЕКО-Stahl (Германия), «Кардемир» (Турция), «Хадисолб» (Египет).

Отбор проб шихтовых материалов: железорудных концентратов, агломерата, известняка, окатышей, кокса, чугуна, шлака, шламов и пылей был осуществлен в соответствии с действующими на время проведения исследований стандартами: ГОСТ 16598–80, ГОСТ 15054–80, ГОСТ 23083–78, ГОСТ 7565–81 и ГОСТ 2789–73.

Полный химический состав металлургических материалов определялся в лабораториях кафедры сертификации и аналитического контроля МИСиС и масс-спектрометрии и хроматографии Гиредмета (MS&GC Lab. GIREDMET Testing Analytical Center).

Использовались следующие аналитические методы анализа:

- ищковая масс-спектрометрия (ИМС): на масс-спектрометре с двойной фокусировкой JMS-01-BM2 (JEOL, Япония) с регистрацией спектров на фотопластинах Ilford-Q и применением микроденситометра MDM6 (Joyce LoebI, Великобритания) и миниЭВМ NOVA 4 (США);

- рентгено-флуоресцентная энерго-дисперсионная спектрометрия (РФЭС) с применением PHILIPS PW9500;

- атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) с применением Jobin Yvon JY38;

- атомно-абсорбционная спектрофотометрия (ААС) по оригинальной методике MS&GC Lab.;

- специальные количественные методы определения содержания отдельных химических элементов в конкретных твердых материалах.

По каждому из исследованных материалов было параллельно проанализировано по четыре усредненных пробы. Результаты анализов, отличавшиеся от среднего значения по всем четырем испытаниям более чем на 10 % отн., в дальнейшем не учитывались. При расчете содержаний микропримесей использовалось математическое обеспечение, разработанное в MS и GS (случайная погрешность результатов анализа характеризуется величиной относительного стандартного отклонения 0,15...0,30 % масс. Для последующего количественного определения содержания в пробах обнаруженных микропримесей применялись специальные физико-химические методы анализа. Тонкий количественный химический анализ выполнен в лаборатории химического анализа кафедры СиАК МИСиС. Искользованные в работе методы тонкого химического анализа отвечают передовым мировым технологиям исследований и гарантируют необходимую точность выполнения измерений [308].

Результаты выполненных исследований приведены в Приложении 4 «Содержание элементов-микропримесей в металлургических материалах».

**Методика лабораторных исследований.** Получение чугуна, содержащего микроэлементы (галлий, мышьяк, свинец), проводилось

в вакуумно-индукционных печах ТК-30-1750. 1Ф и LEYBOLD-HERAUSES (Германия).

Нагрев печи ТК-30-1750. 1Ф производился в две стадии: с 20 до 100 °С в течение 1 ч, со 100 до 1500 °С в течение 3,5 ч, выдержка при температуре 1500 °С осуществлялась в течение 1 ч. В графитовый тигель помещали гранулы (массой до 3 г), содержащие микроэлементы (как правило, в виде металлов), и обернутые фольгой из  $Al_2O_3$  (массой до 2 г). Затем опускали тигель в печь и выдерживали 15...18 мин при температуре 1500 °С, до расплавления содержимого тигля, затем производили помешивание расплава. После этого вынимали тигель из печи и охлаждали на воздухе при комнатной температуре. Извлекали чугун, содержащий микроэлементы из тигля.

Вакуумно-индукционная печь фирмы LEYBOLD-HERAUSES (Германия) имела следующие основные параметры: длина – 3780 мм, ширина – 1790 мм, высота – 3620 мм, при объеме рабочей камеры 0,8 м<sup>3</sup>. Диапазон изменения температуры: 0...1800 °С. Расход электроэнергии: 600...800 кВт·ч/т. Рабочий частотный диапазон 0...10 кГц. Максимальная сила тока – 11 кА. Продолжительность плавки при массе шихты 15 кг составила 30 мин. Печь была оборудована дозатором, позволявшим многократно подгружать в печь шихту и специальные добавки, и двумя насосами: форнасосом производительностью 460 л/мин и диффузионным насосом производительностью 380 л/мин.

Для высокотемпературной обработки чугуна использовалась вакуумно-индукционная печь мощностью 10 кВт. Внутренний объем печи – 30 л, диаметр тиглей 20 мм. Кусочки чугуна помещались в тигель, который подвергали нагреву до температуры не менее 1850 °С. Затем включали вакуумные насосы для достижения вакуума глубиной 10 Па. Под вакуумом расплавленный чугун выдерживался не менее 30 мин. Затем печь выключали, и расплав охлаждался до комнатной температуры вместе с печью.

***Изготовление, обжиг, восстановление и оптические исследования металлургических материалов, содержащих микроэлементы.*** Получение металлургических материалов, содержащих микроэлементы, осуществлялось в лаборатории кафедры ЭРЧМ (РТП) МИСиС двумя методами: брикетированием с помощью холодного прессования и изготовлением окатышей. Прессование осуществлялось ручным гидравлическим прессом в стальной пресс-форме. Давление составляло

около 0,25 МПа. Полученные брикеты выдерживали сбрасывание с высоты 1,5 м на стальную плиту; при этом наблюдалось образование лишь незначительных поверхностных сколов. Окатыши изготавливались вручную. Полученную шихту тщательно перемешали, добавляя воду, а затем изготавливали сырые окатыши. Полученные сырые окатыши высушивали в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 15 мин.

Для проведения опытов по обжигу и восстановлению окатышей и брикетов, содержащих микроэлементы, использовались лабораторные печи. В качестве восстановительного реагента применялся водород. Работа по изучению шлифов исследуемых материалов проводилась на микроскопах марки МИН-9.

***Термодинамические расчеты с использованием пакета программ «Ивтантермо».*** Анализ технологических режимов металлургических процессов в настоящее время в значительной степени сдерживается отсутствием данных об условиях формирования жидких продуктов и газовой фазы процесса. В специальной литературе, в частности, отсутствует описание методик расчета поведения в металлургических процессах многих примесных элементов в различных температурных и окислительно-восстановительных условиях. В связи с этим актуален анализ поведения элементов и их соединений с точки зрения термодинамики. При этом характер получаемых выводов принципиален: если синтез некоторого химического соединения при заданных расчетных условиях невозможен исходя из законов термодинамики, то это означает безусловный «запрет» на его образование в реальных условиях. В то же время термодинамическая возможность того или иного процесса еще не означает возможность его обязательной реализации: процесс, «разрешенный» законами термодинамики, может быть невозможен по кинетическим причинам из-за ничтожно малых скоростей протекания. Поэтому получаемые в результате термодинамического расчета концентрации веществ рассматриваются как максимально возможные значения.

Таким образом, с учетом кинетических ограничений безусловный характер имеют лишь выводы о термодинамической невозможности тех или иных процессов. Именно это и представляет наиболее важную задачу экологической экспертизы любого технологического процесса по предполагаемым вредным выбросам. Применительно к

анализу формирования вредных выбросов определяющее значение имеют как раз «запретительные» выводы термодинамического моделирования, поскольку результатом подобного теоретического анализа является нахождение условий, когда вредные вещества образуются в минимальном количестве или не образуются вовсе.

Результаты термодинамических расчетов [305], выполненных с использованием автоматизированного комплекса «Ивтантермо» для соединений серы и азота, показали хорошую сходимость с фактически материалом, содержащим данные по выбросам в атмосферу для различных технологий и производств. По мнению авторов, «термодинамический способ расчета является единственно возможным, например, для прогнозирования химического состава столь сложной многокомпонентной системы, как доменный процесс». При этом кинетические ограничения, влияющие на результаты анализа, могут быть частично сняты разумным выбором исходного состава и условий протекания реакций, а также ограничением числа входящих в систему элементов и химических соединений, базирующимся на основе опытных данных о составе чугуна, шлаков, выбросов и газовой фазы процесса. Исследования показали, что для изучения поведения любых микроэлементов в доменной печи целесообразна следующая общая схема расчетов: постепенный переход от изучения простых систем к расчету более сложных.

Исходя из изложенного выше, для термодинамического моделирования поведения микропримесей в условиях доменного процесса использовался автоматизированный комплекс «Ивтантермо» для Windows [306]. В состав комплекса входят:

- база данных, которая на сегодняшний день содержит сведения о свойствах около 2600 веществ, образованных из 96 химических элементов;
- автономные программы, реализующие следующие функции: работа с базой данных, расчет состава и параметров равновесного состояния многокомпонентных гетерогенных термодинамических систем.

Комплекс «Ивтантермо» осуществляет расчет количества молей и мольных долей компонентов многоэлементной и многофазной системы в равновесном состоянии при заданных параметрах: температуре, давлении и элементном составе. Расчет в системе «Ивтантермо» может производиться для 400 одновременно сосуществующих веществ. Ре-



зультаты могут быть представлены в виде графических диаграмм, на которых даны концентрации имеющихся в равновесии веществ в зависимости от температуры, давления или концентрации любого исходного компонента системы. Алгоритм расчета основан на минимизации энергии Гиббса ( $G$ ) системы. Метод сводится к определению конечного вещественного состава, отвечающего минимуму энергии Гиббса:

$$G = \sum G_i n_i,$$

где  $G_i$  – энергия Гиббса  $i$ -го компонента системы ( $i = 1, 2, \dots, k$ );  
 $n_i$  – число молей  $i$ -го компонента.

Если в системе присутствует  $m$  видов атомов (химических элементов), то для каждого вида количество грамм-атомов в одном моле газовой атмосферы определяется по уравнению

$$q_i = \sum_{j=1}^k X_i n_{ij},$$

где  $n_{ij}$  – количество атомов  $j$ -го элемента ( $j = 1, \dots, k$ ) в  $i$ -м газовом веществе.

Фактически уравнение выражает закон сохранения вещества для каждого вида атомов. Учтем еще одно условие, сокращающее число неизвестных в данной модели. Оно заключается в законе Дальтона:

$$p = \sum p_i = \sum p x_i.$$

Данное уравнение эквивалентно условию  $\sum x_i = 1$ . Если найти минимум энергии Гиббса при описанных условиях, это позволит определить искомые концентрации веществ в равновесной газовой смеси –  $x_i$ . Для практического осуществления решения используют метод неопределенных коэффициентов Лагранжа. Составляется вспомогательная функция Лагранжа  $L$ :

$$L = G + \sum_{j=1}^m \lambda_j (-q_j + \sum_{i=1}^k X_i n_{ij}) + \lambda_x \left( -1 + \sum_i X_i \right),$$

где  $\lambda_j$  и  $\lambda_x$  – неопределенные коэффициенты.

Минимум функции  $L$  совпадает с минимумом  $G$ . Для его нахождения  $L$  дифференцируется по всем неизвестным –  $x_i$ ,  $\lambda_j$  и  $\lambda_x$  и результаты приравниваются к нулю.

Для проведения термодинамических расчетов задаются исходные параметры: химические составы исследуемых веществ с концентрациями элементов, присутствующих в их составе, и температурный интервал с интересующим шагом. Исследовался интервал температур от 100 до 2500 °С.

Для получения сведений о процессах, протекающих в доменной печи в конкретных условиях, рассматривались различные температурные зоны, границы которых определялись в зависимости от поставленной задачи исследования. «Низкотемпературная» зона соответствовала верхней части доменной печи с максимальной температурой 1300 °С, «промежуточная» зона – условиям нижней части печи с температурами от 1300 до 1600 °С. «Высокотемпературная» зона, или зона «фурменного очага», имела температуры от 1600 до 2500 °С.

В пределах температурных зон равновесные составы рассчитывались в зависимости от соотношения «кислород – углерод» (О/С), которое варьировалось в пределах от 0,1 до 10. Для получения развернутой картины происходящих процессов расчеты проводили с постепенным усложнением системы, последовательно добавляя к первоначально упрощенным вариантам дополнительные элементы и вещества. Так, исходная система для расчета распределения стронция по фазам первоначально включала следующие элементы: Fe, Ca, O, C, Si, Sr. Затем постепенно она была усложнена за счет учета S, H, A и т.д. При этом учитывалась возможность образования растворов в расплавах металла и шлака. Давление в исследуемых системах варьировалось от 0,25 (на колошнике печи) до 0,5 МПа (в фурменной зоне).

## **4.2. Принципиальная схема поведения микроэлементов в доменной плавке**

На основании данных о химическом составе металлургических материалов и показателях работы доменных печей исследуемых предприятий были построены характерные балансы микроэлементов доменной плавки. Для оценки возможности конденсации примесных элементов из газовой фазы на поверхность выносимых из печи частиц

пыли, введены коэффициенты концентрации элементов в колошниковой пыли ( $KK_{к.п.}$ ) и доменном шламе ( $KK_{д.ш.}$ ):

$$KK_{к.п.} = \mathcal{E}_{к.п.} / \mathcal{E}_{ш.} ;$$

$$KK_{д.ш.} = \mathcal{E}_{д.ш.} / \mathcal{E}_{ш.} ,$$

где  $\mathcal{E}_{ш.}$  – содержание элемента в шихте с учетом всех компонентов, включая кокс;

$\mathcal{E}_{к.п.}$  – содержание элемента в колошниковой пыли, %;

$\mathcal{E}_{д.ш.}$  – содержание элемента в доменном шламе, %.

Были выполнены расчеты показателей  $KK_{к.п.}$  и  $KK_{д.ш.}$  для элементов основы, макро- и микропримесных элементов. Результаты расчетов показали, что  $KK_{к.п.}$  для всех групп элементов изменяется в пределах от 0,5 до 1,5 ед. Из этого можно сделать вывод о том, что конденсация возгон элементов на поверхности относительно крупных частиц колошниковой пыли не оказывает существенного влияния на изменение их состава. Вместе с тем для некоторых макро- и микропримесных элементов (табл. 4.1) было отмечено существенное увеличение значений коэффициента  $KK_{д.ш.}$  – до 3,0...5,0, а в отдельных случаях до 50...60 ед. Принимая во внимание данные о последних исследованиях образования мелких фракций пыли в доменной печи, в этом случае можно говорить о развитии процессов адсорбции элементов из газовой фазы [308–312]. Таким образом, коэффициент  $KK_{д.ш.}$  можно использовать в качестве индикатора перехода микроэлемента в газовую фазу доменного процесса.

Как указывалось выше, поведение микроэлементов в доменном процессе зависит от того, в каком виде (соединении, окружении) они попадают в агрегат. Рассмотрим два основных способа поступления микроэлементов в доменную печь.

Первый способ (поток): приход в минеральных соединениях, которые составляют основу железосодержащих компонентов шихты, а также присутствуют в коксе –  $I_A$ ;

Второй способ (поток): приход в составе органических соединений, присутствующих только в коксе; при этом рассматриваемый элемент находится в структуре органических молекул (металлорганика) –  $I_B$ . Для определения количества микроэлемента в органической части кокса (ОЧК) использовались данные исследований [317, 319, 320].

Введем размерность потоков в граммах элемента на тонну чугуна. Тогда общий приход элемента составит:

$$I = I_A + I_B.$$

Обозначим  $\rho = I_A/I$  – минеральную часть прихода элемента и  $\eta = I_B/I$  – органическую часть прихода.

С учетом того что каждый микроэлемент в доменном процессе распределяется в три основные среды (жидкий чугун; жидкий шлак; газовую фазу), введем обозначения коэффициентов распределения (перехода) элемента в эти среды:

$\gamma_1$  – доля перехода в чугун;

$\gamma_2$  – доля перехода в шлак;

$\gamma_3$  – доля перехода в газ.

Переход в каждую среду происходит из обоих потоков ( $I_A$  и  $I_B$ ) и может осуществляться различными путями (по различным каналам). Под путями (каналами) подразумеваются различные механизмы переходов, которых в каждом конкретном случае может быть несколько (больше или меньше в зависимости от свойств элемента и его соединений и характеристик среды, в которую он переходит).

Пусть  $\lambda_i$  – производительность  $i$ -го канала (механизма перехода), которая показывает, какую долю прихода элемента из минеральной или органической части переводит данный канал в одну из трех металлургических сред. Величина  $\lambda_i$  зависит от изменения энергии Гиббса  $\Delta G$  при  $i$ -м переходе:

$$\lambda_i = a_i e^{\frac{\Delta G}{RT}},$$

где  $a_i$  – коэффициент, учитывающий структурные, геометрические и прочие факторы, характеризующие процесс перехода.

Тогда полный коэффициент перехода данного элемента в каждую из трех металлургических сред складывается из двух слагаемых;

$$\gamma_{1,2,3} = \rho \sum \lambda_k + \eta \sum \lambda_l.$$

Первое слагаемое представляет собой суммарную долю элемента при переходе из минеральной части его общего потока, второе – суммарную долю перехода из органической части; индексы  $k$  и  $l$  обозначают каналы перехода из минеральной и органической частей соответственно.

Для расчета (оценки) производительности каналов необходим набор физико-химических критериев, описывающих конкретные этапы взаимодействия элемента с компонентами доменного процесса. В качестве основных критериев были выбраны химическое сродство элемента к «активным компонентам» металлургической системы: кислороду, водороду, сере, хлору, а также растворимость в железе. Для каждого активного компонента был определен набор характеристик:

- наличие химических соединений с данным компонентом;
- области температурной и химической устойчивостей химических соединений;
- доли элемента, связанные в каждом из возможных соединений при заданных условиях;
- летучесть соединений (давление насыщенных паров).

Анализ перечисленных характеристик позволяет найти эффективные значения изменения энергии Гиббса  $\Delta G_i$  для процессов перехода исследуемого микроэлемента, поступающего в доменную печь двумя различными способами в каждую из трех металлургических сред. Для оценки коэффициентов  $a_i$  в каждом конкретном случае использовались параметры:

- общий приход элемента в доменную печь;
- растворимость элемента в металле и оксидном (шлак) расплаве,
- возможность формирования самостоятельной фазы (свинец, лантаноиды) и контуров циркуляции (литий, рубидий) и некоторые другие факторы.

В табл. 4.1, 4.2 – 4.5 и Приложении 5 «Балансы микроэлементов доменной плавки» приведены основные данные, позволяющие подразделить микропримесные элементы доменной плавки в соответствии с их распределением между основными фазами процесса.

Можно выделить четыре группы микроэлементов. В трех группах представлены элементы, попадающие в доменную печь как в составе минеральной составляющей, так и в органической части кокса. Элементы первой группы в целом ведут себя аналогично шлакообразующим (алюминию, кальцию, магнию) и практически полностью переходят в оксидный расплав. Однако при этом для стронция отмечается значительная возгонка и накопление в шламе, а для лантаноидов и бериллия – невязка баланса. Данные по литию и рубидию практически соответствуют их «химическим» аналогам – натрию и калию.

Таблица 4.1

**Подразделение микропримесные элементы доменной плавки  
в соответствии с их распределением между основными фазами процесса**

Группа	Микроэлементы	Характерные параметры				
		Присутс- ствие в ОЧК	Переход в чугун	Переход в шлак	$KK_{д.ш}$ более 3,0 ед.	Наличие невязки баланса
Первая	Барий, цирконий	+	—	+	—	—
	Литий, рубидий	+	—	+	—	+
	Бериллий, иттрий, лантаноиды, скандий	+	—	+	—	+
	Стронций	+	—	+	+	—
Вторая	Бор, хром	+	+	+	—	—
	Ванадий, мышьяк, фосфор	+	+	+	+	—
Третья	Кобальт, медь	+	+	—	—	—
	Галлий, никель	+	+	—	+	—
Четвертая	Молибден	—	+	—	—	—
	Олово, сурьма	—	+	—	+	—
	Свинец	—	+	—	+	+

Элементы второй группы распределяются между металлическим и шлаковым расплавом (в целом аналогично марганцу или кремнию), но для ванадия, мышьяка и фосфора имеет место значимый ( $KK_{д.ш} \sim 3,5$  ед.) переход в газовую фазу процесса. Элементы третьей группы практически полностью переходят в чугун. При этом для никеля и галлия отмечается также переход в газовую фазу ( $KK_{д.ш} \sim 3,5$  ед.).

Для элементов четвертой группы характерен приход в доменную печь только в составе минеральной составляющей шихты, они распределяются между чугуном и газовой фазой процесса. При этом для олова и свинца отмечаются самые высокие значения  $KK_{д.ш}$  — от 50 до 60 ед., а для свинца еще имеет место невязка баланса на уровне 20...25 % отн.

Проиллюстрируем использование предложенной расчетной схемы описанием определения коэффициентов перехода микроэлементов в газовую фазу (в возгоны). Выберем элементы, отличающиеся друг

от друга химическими свойствами и проявляющие различные типы поведения в доменном процессе (относящиеся к различным группам табл. 4.1). В табл. 4.2 приведены некоторые исходные данные и результаты расчетов. Значения  $\eta$  и  $\phi$  (доля элемента, перешедшего в шлак от его общего прихода в печь) являются усреднением заводских данных, полученных на четырех металлургических предприятиях: ОАО «Северсталь», ОАО «Тулачермет» и ОАО НЛМК (Россия), ЕКО-Stahl (Германия).

Таблица 4.2

**Параметры перехода микроэлементов  
в газовую фазу доменного процесса, % масс.**

Показатель	Барий	Цирконий	Стронций	Фосфор	Медь	Галлий	Никель	Олово
$\eta$	23	7	10,2	20	13	8,5	4,7	0
$\phi$	1,2	1,2	4,2	4,2	<3,1	3,0	3,6	33,6
$\gamma_3$	3	~0,5	6,7	~ 15	> 1,4	~2,6	4,2	~50

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что разработанная методика достаточно точно количественно описывает распределение микроэлементов между основными фазами доменного процесса. Ниже приводится краткое описание поведения в доменной плавке некоторых элементов только на базе анализа балансовых и термодинамических расчетов, а далее – подробное описание поведения галлия, стронция, мышьяка, свинца и фосфора, полученное по итогам физического моделирования и анализа опубликованных результатов специальных исследований других авторов.

**Барий** практически не восстанавливается до металла в доменной печи и мало растворим в железе, что сокращает до минимума возможности его перехода в газ из минеральной части (табл. 4.3). Его возгонка из органической части возможна либо в виде летучих оксидов, либо в соединениях с хлором. Поскольку приход бария в доменную печь намного превышает приход хлора, то переход его в газовую фазу в составе соединений с хлором незначителен. Учет этого и некоторых других критериев позволяет для бария получить долю перехода в газ  $\gamma_3\text{Ba} = 3 \%$ .

Таблица 4.3

**Характерные балансы бария  
при выплавке перedельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	110	130	250	400
с коксом	90	270	250	110
в том числе с ОЧК	45	135	125	55
<b>И т о г о приход</b>	<b>200</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>510</b>
Переходит в ходе домен-				
ной плавки:				
в чугун	Нет	Нет	Нет	Нет
в шлак	195	390	480	500
в колошниковую пыль	3	6	10	5
в доменный шлак	2	4	10	5

**Цирконий** (табл. 4.4) имеет очень стойкие оксиды, которые совершенно не могут восстанавливаться в доменном процессе. Сам цирконий и его соединения почти не газифицируются независимо от того, находятся ли они в минеральной или в органической части. Очень незначительная газификация оксида  $ZrO_2$  возможна лишь в окислительной среде при температуре не ниже 2200 °С, т.е. в фурменной зоне. При этом максимальное количество циркония в газе может составить около  $\gamma_3Zr \approx 0,5 \%$ .

Таблица 4.4

**Характерные балансы циркония  
при выплавке перedельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	95	15	50	75
с коксом	30	30	120	6
в том числе с ОЧК	5	5	20	1
<b>И т о г о приход</b>	<b>125</b>	<b>45</b>	<b>170</b>	<b>81</b>
Переходит в ходе до-				
менной плавки:				
в чугун	Нет	Нет	Нет	Нет
в шлак	122	43	165	80
в колошниковую пыль	2	1	3	0,5
в доменный шлак	1	1	2	0,5

**Стронций**, так же как барий, почти не восстанавливается до металла, устойчивые соли стронция и другие его соединения из рудной



части шихты легко переходят в шлак. Возгоняться из минеральной части может только гидроксид при температурах выше 1000 °С. Кроме того, в газ могут переходить атомы стронция из органической части кокса. Общая доля стронция в газе составляет  $\gamma_3\text{Sr} = 6,7 \%$ .

**Галлий** при температурах 950...1100 °С газифицируется в виде оксида или сульфида из органической части кокса. Термодинамический анализ показывает, что в летучие соединения может переходить до 30 % галлия из органической части ( $\gamma_3\text{Ga} \approx 2,6 \%$ ). Кроме того, небольшое количество галлия может попасть в газ из минеральной части в виде хлорида; это количество зависит от состава шихты и содержания в ней хлора и серы. Остальной галлий при восстановлении в твердом состоянии растворяется в железе и переходит в чугун.

**Медь** должна переходить в газовую фазу из органической части кокса в виде летучих сульфидов и гидридов (табл. 4.5). Кроме того, в газ может переходить часть меди из минеральной части шихты также в соединениях с серой. Эта часть может сильно варьироваться в зависимости от состава шихты. Остальная часть меди при температурах выше 1300 °С восстанавливается и, имея хорошую растворимость в железе, может переходить в чугун. Общее содержание меди в газовой фазе должно быть не менее  $\gamma_3\text{Cu} > 1,4 \%$ . Возможно, что низкое содержание меди в шламе объясняется формированием в доменной печи контура циркуляции сульфидов меди (например, аналогично сульфидам свинца). В итоге, основная часть газообразного сульфида меди поглощается шлаковой фазой процесса, и практически вся медь переходит в чугун.

Таблица 4.5

**Характерные балансы меди  
при выплавке передельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	EKO-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	5	25	40	60
с коксом	10	20	5	5
в том числе с ОЧК	4	8	2	2
<b>Итого приход</b>	<b>15</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>65</b>
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	15	45	45	65
в шлак	Нет	Нет	Нет	Нет
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлам	< 1	< 1	< 1	< 1

**Никель** (табл. 4.6) легко восстанавливается в условиях доменного процесса и, кроме того, почти полностью растворим в железе, что позволяет всей его доле, содержащейся в минеральной части, почти полностью перейти в чугун. Переход никеля в газ опять-таки возможен только из органической части кокса. Этот переход может быть растянут от температуры 1300 °С, когда появляется газообразный гидрид никеля и газифицируются атомы чистого никеля из коксовой органики, до 1600 °С. Суммарная доля никеля, переходящего в газовую фазу, составляет  $\gamma_3\text{Ni} = 4,2\%$ .

Таблица 4.6

**Характерные балансы никеля  
при выплавке перedельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	45	65	50	150
с коксом	20	15	15	20
в том числе с ОЧК	5	3	3	5
<b>Итого приход</b>	<b>65</b>	<b>80</b>	<b>65</b>	<b>170</b>
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	60	75	60	165
в шлак	Нет	Нет	Нет	Нет
в колошниковую пыль	1	1	1	1
в доменный шлак	4	4	4	4
<b>КК<sub>д.ш</sub></b>	<b>~3,5</b>	<b>~3,5</b>	<b>~3,5</b>	<b>~3,5</b>

**Олово** (табл. 4.7), которое практически не присутствует в органической части кокса, вместе с тем легко возгоняется из минеральной части уже при температурах выше 900 °С в виде хлорида, оксида, сульфида и в виде паров металлических атомов. При температуре выше 1200...1300 °С восстановленное олово может растворяться в твердом восстановленном железе, а также захватываться каплями металлического расплава и переходить в чугун. Таким образом, в газ попадает та часть олова, которая успела газифицироваться до этих температур:  $\gamma_3\text{Sn} \approx 50\%$ .

Таблица 4.7

**Характерные балансы олова  
при выплавке перedельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	35	15	15	20
с коксом	Нет	Нет	Нет	Нет

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	EKO-Stahl
Итого приход	35	15	15	20
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	20	10	10	15
в шлак	Нет	Нет	Нет	Нет
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлак	15	5	5	5
КК <sub>д.ш</sub>	40,0	30,0	30,0	50,0

### 4.3. Галлий

В последние годы резко возрос интерес к исследованиям поведения в доменной плавке микроэлементов, попадающих в печи в составе техногенных материалов. Технологии их рециклинга активно внедряются в передовых индустриальных странах в рамках реализации Инициативы 3R. Типичным примером такого микроэлемента является галлий, который широко используется при производстве полупроводниковых интерметаллических соединений, применяющихся в электронике, электротехнике и производстве лазерных фотодиодов. Отметим, что галлий входит и в состав природных сырьевых материалов доменной плавки. Он присутствует практически во всех коксующихся углях и железных рудах [282, 283, 336–340].

Исследования по определению содержания галлия в металлургических материалах отечественных (ОАО «Северсталь», ОАО НЛМК, ОАО «Тулачермет», ОАО НТМК) и зарубежных предприятий (ЕКО-Stahl, Германия) были выполнены в МИСиС и ГНЦ «Гиредмет». Установлено, что в ходе плавки галлий переходит в чугун и концентрируется в доменном шламе. Причем содержание галлия в шламе достигает 200...300 г/т шлама, что в 3–5 раз превосходит его содержание в доменной шихте. Таким образом, поведение в доменной плавке галлия принципиально отличается от его химического аналога – алюминия, который полностью переходит в шлак. Характерные балансы галлия для некоторых исследованных предприятий приведены в табл. 4.8.

**Характерные балансы галлия  
при выплавке передельного чугуна, г/т чугуна**

Статьи баланса	Северсталь	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи: с железорудной частью	140	90	30
с коксом	15	15	10
<b>Итого приход</b>	<b>155</b>	<b>105</b>	<b>40</b>
Переходит в ходе доменной плавки:			
в чугун	150	100	35
в шлак	Нет	Нет	Нет
в доменный шлак	5	5	5

**Исследование железогаллийалюминиевых (ЖГА) брикетов и окатышей.** ЖГА брикеты и окатыши массой от 18 до 24 г, были подвергнуты сначала окислительной (при температуре 1200 °С), а затем восстановительной обработке (при температуре 800 °С) (Приложение 6). Характерной особенностью окисленных образцов является наличие ярко выраженной (видимой даже при небольшом увеличении) зональной структуры, связанной с миграцией галлия. Зональная структура, получаемая в окисленных образцах, представлена на рис. 4.1.

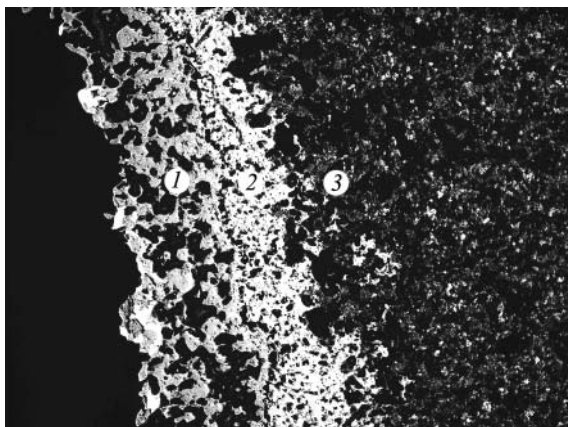


Рис. 4.1. Железогаллийалюминиевый окисленный брикет  
(отраженный свет,  $\times 50$ )

Для исследований были выделены три зоны, обозначенные цифрами (в кружках) 1, 2, 3. Установлено наличие оксидного раствора, включающего  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Причем содержание в растворе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в различных зонах меняется незначительно, а содержание  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  постепенно убывает от места первоначального расположения частицы галлия, который был введен в систему в виде металла. Данные рентгеноспектрального анализа, иллюстрирующие изменение состава ЖГА окисленного брикета, вызванное миграцией галлия, приведены в табл. 4.9. Их анализ позволяет предположить развитие изоморфного взаимного замещения галлия и железа в железогаллийалюминиевом оксидном растворе при практически неизменной массовой доле  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Таблица 4.9

**Изменение состава железогаллийалюминиевого окисленного брикета**

Компонент	Содержание, % масс.		
	1	2	3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25,2	24,7	25,0
$\text{Ga}_2\text{O}_3$	72,7	53,6	20,8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,1	21,7	54,2

Исследования восстановленного ЖГА брикета, микроструктура которого представлена на рис. 4.2, позволили установить характерное изменение состава оксидной фазы (область 1) в направлении восстановленного железа (светлые участки в области 2). Направление замеров обозначено векторами 1 – 2 – 3 – 4 и 5 – 6 – 7 – 8. Результаты приведены в табл. 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10

**Изменение состава оксидной фазы в направлении восстановленного железа**

Номер точки	Содержание компонента в исследуемой системе, % масс.		
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Ga}_2\text{O}_3$
1	29,6	16,9	53,3
2	29,6	36,8	32,9
3	26,2	36,8	36,9
4	25,0	33,7	40,2
5	27,4	15,4	54,4
6	38,5	39,7	21,5
7	32,3	37,7	29,8
8	25,8	32,8	41,7

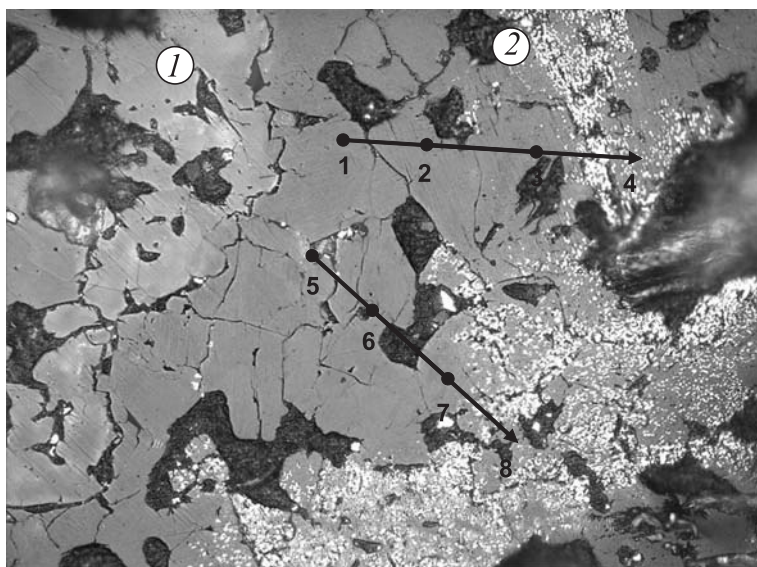


Рис. 4.2. Железогаллийалюминиевый восстановленный брикет.  $\times 500$

Из данных табл. 4.11 следует, что с момента появления металлической фазы начинается активная диффузия галлия в восстановленное железо. Концентрация галлия по отношению к железу в восстановленном образце на расстоянии 40...50 мкм от границы локализации галлия в виде  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  возрастает примерно в два раза.

Таблица 4.11

**Изменение концентрации галлия в системе Ga–Fe по результатам рентгеноспектрального анализа, % масс.**

Образец	Участок замера			
	Участок, обогащенный галлием	Граница раздела $\text{Ga}_2\text{O}-\text{Fe}_2\text{O}_3$	50 мкм от границы	200 мкм от границы
Восстановленный окатыш	39,8	10,4	5,0	3,6
Восстановленный брикет	48,5	9,6	5,8	4,2

Полученные данные позволяют оценить эффективный коэффициент диффузии галлия в оксидной системе в направлении восста-

новленного железа. Для оценки использовали корреляцию между размерами диффузионной зоны (диффузионной длиной  $L_d$ ) и коэффициентом диффузии:

$$L_d = 2 \sqrt{Dt},$$

где  $t$  – время, с;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

В соответствии с данными табл. 4.11 можно принять, что  $L_d = 100$  мкм ( $10^{-4}$  м), время опыта  $t = 30$  мин ( $2 \cdot 10^3$  с). Таким образом,  $D = 10^{-12}$   $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для сравнения рассчитаем коэффициент самодиффузии железа:

$$D = D_0 e^{-\frac{E}{RT}},$$

где  $E = 280$  кДж/моль;  $D_0 = 0,0118$   $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $T = 1200$  °С.

Полученное значение  $D = 10^{-12}$   $\text{м}^2/\text{с}$  позволяет утверждать, что при анализируемых условиях величина эффективного коэффициента диффузии галлия примерно одного порядка с коэффициентом диффузии железа. Таким образом, высокая подвижность галлия в оксидных системах Fe–Ga–Al–O обеспечивает возможность в течение короткого времени формирования структуры, близкой к равновесной.

В структурах ЖГА окисленных и восстановленных брикетов и окатышей обнаружено присутствие металлической фазы, характерный вид которой представлен на рис. 4.3, 4.4. Рентгеноспектральное исследование обнаруженной фазы показало, что она представляет собой железогаллиевый твердый раствор. Содержание компонентов в растворе составило: Ga – около 31 % масс., Fe – около 69 % масс. Из чего следует, что атомное соотношение компонентов составляет:

$$\begin{aligned} \text{Ga} / \text{Fe} &= 31,03:69,08 = (31,03:69,72):(69,08:55,87) = \\ &= 0,445:1,237 = 1:2,78 \approx 1/3, \end{aligned}$$

где 69,72 – атомная масса Ga, % ат.; 55,87 – атомная масса Fe, % ат.

Это позволяет предположить, что исследуемая фаза представлена интерметаллидом, состав которого соответствует формуле  $\text{Fe}_3\text{Ga}$ .

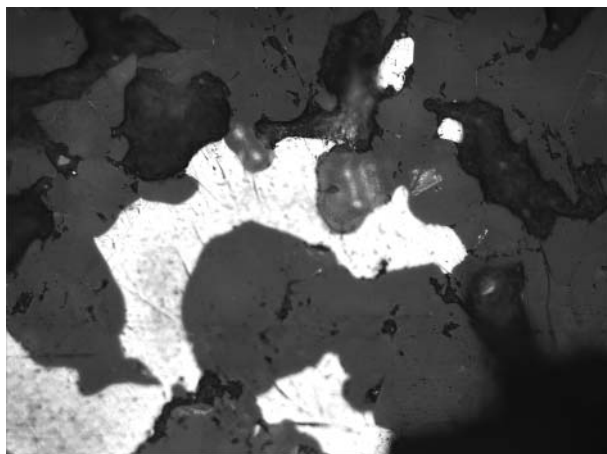


Рис. 4.3. Железогаллийалюминиевый окисленный брикет.  $\times 500$

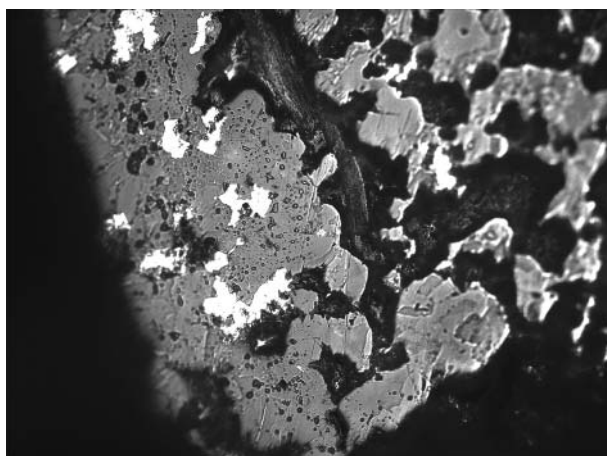


Рис. 4.4. Зерна интерметаллида в структуре железогаллийалюминиевого восстановленного брикета.  $\times 200$

**Экспериментальные исследования распределения галлия между чугуном и доменным шлаком.** Распределение галлия между чугуном и доменным шлаком изучалось на специальной лабораторной установке Фрайбергской Горной академии (Германия). Ее основным



элементом являлась горизонтальная индукционная печь с частотой тока 400 кГц и максимальной мощностью 15 кВт. Были проведены две серии экспериментов, отличающиеся тем, что в первом случае галлий в исследуемую систему вводили в составе чугуна, а во втором – в составе шлака в виде оксида  $Ga_2O_3$ . Кроме того, исследовалось влияние на процесс основности шлака, химический состав которого представлен в табл. 4.12 [341].

Таблица 4.12

**Химический состав шлаков, использованных в опытах  
по изучению распределения галлия, % масс.**

Тип шлака	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Основность (CaO + MgO)/(SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Основной	40,9	36,4	11,4	6,7	1,00
Кислый	46,9	32,7	10,4	6,0	0,81

Чугун, содержащий галлий, получали в результате сплавления предельного чугуна и металлического галлия в графитовом тигле при продувке печи газом, состоящим из 90 % объемн. азота и 10 % объемн. водорода с выдержкой при 1400 °С в течение 10 мин. После охлаждения печи в тигель добавляли шлак и повторяли операцию нагрева до 1400 °С при сохранении режима продувки газом упомянутого состава. Время выдержки составляло 30 мин. Охлаждение печи происходило со скоростью 250 °С/мин.

Содержащий галлий шлак был изготовлен следующим образом. Металлический галлий растворяли в азотной кислоте, после чего к полученному раствору добавляли  $NH_4OH$  и в результате процесса осаждения выделяли конденсат гидроксида галлия  $Ga(OH)_3$ . После фильтрации влажная масса обжигалась при температуре 700 °С в течение 30 мин с получением оксида галлия  $Ga_2O_3$ , который добавляли в доменный шлак. Предельный чугун и содержащий галлий шлак подвергались обработке в вышеописанном режиме. Содержание галлия определяли с помощью масс-спектрометрического анализа. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.13.

Установлено, что независимо от способа ввода в систему чугун – шлак (в составе металлической или оксидной фазы) галлий практически полностью (98...99,5 % масс.) переходит в металл, а изменение основности шлака в интервале 0,8...1,0 (по  $(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$ )

не оказывает существенного влияния на распределение галлия между металлическим и оксидным расплавами.

Таблица 4.13

**Распределение галлия между чугуном и шлаком**

Способ ввода галлия в систему	Тип шлака	Содержание галлия по окончании опыта, г/т	
		в чугуне	в шлаке
В составе чугуна	Основной	0,74...5,59	0,014...0,022
	Кислый	0,88...5,15	0,013...0,020
В составе шлака	Основной	0,58...1,43	0,017...0,022
	Кислый	1,94	0,018

**Исследования чугуна, содержащего галлий.** Для приготовления чугуна содержащего галлий, был использован передельный чугун производства ОАО «Северсталь». К образцам чугуна, масса которых составляла 300 г, добавлялись завернутые в алюминиевую фольгу кусочки металлического галлия массой 6 г. Рентгеноспектральный анализ шлифов показал практически равномерное распределение галлия в объеме металла: соответственно 2,6 % по отношению к железу на краях образца и 2,8 % – в центре. В связи с тем что значительная часть отходов, содержащих галлий, представлена арсенидом галлия, интересным для анализа представляется сплав чугуна с мышьяком и галлием. К мышьяковистому чугуну (As – 11 % масс.) добавляли галлий – 11 % масс., для того чтобы добиться равного состава по галлию и мышьяку. Для структуры сплава характерно присутствие эвтектики, обогащенной галлием и мышьяком и содержащей интерметаллид сложного состава.

Для определения влияния галлия на механические свойства чугуна были проведены опыты по измерению твердости чугуна по Роквеллу (ГОСТ 9013–59) в зависимости от содержания в нем галлия. Образцы для опытов изготавливались следующим образом: в высверленную полость помещался легирующий металл и засыпался чугунной стружкой. Образец помещался в графитовый тигель индукционной печи. В печи создавался вакуум, после чего она заполнялась аргоном до атмосферного давления. После выдержки в течение 5 мин при температуре 1550... 1580 °С металл сливался в графитовую изложницу (охлаждение тигля вместе с печью и металлом приводит к прилипанию металла к тиглю). После охлаждения металл извлекался из изложницы и измерялась твердость образцов; результаты измерений представлены ниже:

Содержание галлия, % масс.	Твердость по Роквеллу
0,01	3...5
0,1	50...52
0,5	40...42
2,0	10...12

Как видно, галлий оказывает существенное влияние на твердость чугуна. По-видимому, оно связано с образованием твердого раствора галлия в железе, который при увеличении содержания галлия образует самостоятельную фазу, в результате чего твердость чугуна падает.

**Термодинамическое моделирование.** При проведении термодинамического анализа учитывали следующие обстоятельства [8, 44, 342, 343]:

- поведение галлия, как это показали описанные выше результаты физического моделирования, определяется степенью восстановления железа, особенно при 800...1200 °С, когда в условиях доменного процесса осуществляется переход  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ;
- для галлия характерна высокая растворимость в железе (полная растворимость в жидком железе и около 20 % массы в твердом). Поэтому, расчеты производили, учитывая присутствие галлия в качестве примеси в растворе на основе железа (в расчетах использована модель идеального раствора  $\text{Fe}-\text{Ga}$ );
- оксид галлия  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  имеет относительно низкую температуру начала восстановления твердым углеродом (1006 °С), что существенно меньше аналогичной характеристики для оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2037 °С);
- несмотря на чрезвычайно низкую температуру плавления (30 °С) галлий относится к малолетучим элементам и его температура кипения достаточно высока (2211 °С);
- помимо основного тугоплавкого оксида  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  с температурой плавления 1725 °С галлий образует оксид  $\text{Ga}_2\text{O}$  с температурой возгонки около 500 °С.

Можно утверждать, что полное восстановление галлия из  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в раствор на основе железа возможно уже при температурах около 800 °С, т.е. восстановление галлия в раствор практически происходит начиная с температуры восстановления самого железа, при этом газообразный оксид  $\text{Ga}_2\text{O}$  не образуется. Термодинамическая предпочтительность восстановления элемента в раствор с железом вполне очевидна, особенно с учетом малой концентрации галлия, поскольку

его химический потенциал в сильно разбавленном растворе значительно ниже, чем в самостоятельной фазе. Это обуславливает большую стабильность состояния галлия как примеси раствора на основе железа и объясняет обнаруженный экспериментально практически полный переход элемента в чугун. Согласно проведенным термодинамическим расчетам при концентрациях галлия около 100 г/т чугуна в интервале температур 800...1800 °С практически весь галлий должен быть связан в растворе железа.

При более высоких температурах в восстановительных условиях (при избытке углерода) становится заметным переход галлия в газовую фазу в виде паров металла. Этот процесс возможен в фурменной зоне доменной печи для гетероатомов галлия органической части кокса. Пары галлия, увлекаемые газовым потоком, частично выносятся в верхние горизонты печи, где неизбежно окисляются  $\text{CO}_2$  в газовой фазе сначала до  $\text{Ga}_2\text{O}$ , а затем до  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Образование  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в виде самостоятельной фазы маловероятно из-за малой концентрации паров галлия в газовой фазе. Поэтому преобладающим механизмом «конденсации» является «абсорбция» оксидов галлия мельчайшими пылевидными частицами твердой фазы, составляющими основу будущего доменного шлама. Этим и объясняется повышенное содержание галлия в доменных шламах.

***Целесообразность извлечения галлия из чугуна.*** В ходе доменной плавки галлий почти полностью переходит в чугун. Его содержание может превышать 100 г/т чугуна. С целью оценки возможности извлечения галлия из чугуна была проведена плавка галлиевого чугуна в индукционно-вакуумной печи VIM-12 (Vacuum Induction Melting). Основные параметры печи приведены ниже:

Мощность, кВт . . . . .	100
Номинальная частота, кГц. . . . .	3
Номинальное напряжение, В. . . . .	400
Рабочий объем тигля (max), л . . . . .	15
Масса плавки (max), кг . . . . .	80
Вакуум (max), Па . . . . .	100 (с расплавом)
Максимальная температура расплава, °С. . . . .	1700

Расплав чугуна легировали галлием, а затем обрабатывали под вакуумом при температуре 1700 °С. Для легирования использовался сплав,

состоящий из 80 % масс. олова и 20 % масс. галлия. В тигель печи было помещено 50 кг чугуна, который был расплавлен под давлением 10 кПа в атмосфере аргона. При достижении температуры 1400 °С в расплав было добавлено 50 г заранее приготовленного сплава Sn–Ga. Это обеспечило концентрацию галлия в чугуне на уровне 100 г/т.

Расплав в течение 5 мин интенсивной плавки был перемешен и усреднен. Затем, в течение 10 мин температура расплава была доведена до 1700 °С. После этого были включены вакуумные насосы. Давление в рабочей камере в течение 3 мин было снижено с 10 кПа до 100 Па. Затем с интервалом в 10 мин были взяты три пробы расплава, химический анализ которых показал последовательное уменьшение содержания галлия, соответственно до 56, 32 и 4 г/т (ppm). Таким образом, установлено, что выдержка расплава чугуна, содержащего галлий, в течение 30 мин при температуре 1700 °С и давлении 100 Па приводит к возгонке более 90 % галлия. Разработанная технология получения галлия защищена патентом РФ [344].

#### 4.4. Стронций

Основные минералы стронция – стронцианит ( $\text{SrCO}_3$ ) и целестин ( $\text{SrSO}_4$ ) – являются породообразующими, они нередко сопутствуют железорудным формациям и, как правило, в значительных количествах (иногда до 1 % масс.), присутствуют в известняках и доломитах. Кроме того, стронций относится к элементам интенсивного биологического поглощения растениями, что предопределяет его присутствие в коксующихся каменных углях, причем свыше двух третей элемента концентрируется в «органической» части углей. Перечисленные обстоятельства определяют присутствие стронция в природных сырых металлургических материалах. Характерные балансы стронция приведены в табл. 4.14. Из приведенных в таблице данных следует, что для всех исследованных доменных печей отмечается повышение концентрации стронция в доменном шламе.

С целью определения характера поведения стронция в доменной плавке были проведены термодинамические расчеты. Их результаты показывают, что в температурном интервале 1300...1800 °С стронций переходит в шлаковую фазу процесса, образуя оксид и сульфид в соотношении примерно 1:2. При более высоких температурах (1800...2200 °С) возможен переход стронция в газовую фазу в виде

паров металлического стронция. С учетом этого можно предложить следующую схему поведения стронция в доменной плавке [345].

Таблица 4.14

**Характерные балансы стронция  
при выплавке перелыного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Предприятие		
	Северсталь	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:			
с железорудной частью	300	300	320
с коксом	50	100	20
в том числе:			
с МЧК	15	35	5
с ОЧК	35	65	15
Итого приход	350	400	340
Переходит в ходе доменной плавки:			
в чугун	нет	нет	нет
в шлак	330	360	330
в колошниковую пыль	10	10	3
в доменный шлам	10	30	7
КК <sub>д.ш</sub>	2,5	2,5	2,5

Стронций вносится в доменную печь в основном в виде оксида (с железорудными материалами и золой кокса) и в составе органической части кокса (до 65 г/т чугуна), а также (незначительно) в виде  $\text{SrCO}_3$  в составе известняка. Стронций органической части кокса, попадающей в фурменную зону печи, переходит в газовую фазу в форме паров металла. В ходе движения газа в верхнюю часть печи пары стронция окисляются с образованием  $\text{SrO}$ . Это подтверждается термодинамическими расчетами, которые показывают, что уже в интервале 1500...1700 °С практически весь «возгон» стронция должен превратиться в  $\text{SrO}$ . Однако из-за очень малой концентрации паров стронция в газовой фазе (молярная доля составляет  $10^{-6}$ ) образование конденсата  $\text{SrO}$  в виде самостоятельной фазы затруднено. Поэтому преобладающим механизмом «конденсации» является «абсорбция» молекул  $\text{SrO}$  частицами твердой фазы. Очевидно, мельчайшие пылевидные частицы, присутствующие в газовом потоке, дают наиболее благоприятные условия для развития этого процесса. Это, в частности, подтверждается приведенными выше данными результатов анализов о повышенном содержании стронция в пылевой фракции доменного шлама. Таким образом, образующийся в фурменной зоне доменной печи возгон

стронция выносятся из печи с мельчайшими пылевидными частицами.

Стронций железорудной части шихты, флюсов, золы кокса и в небольшом количестве (из «коксовой насадки») органической части кокса попадает в доменный шлак, где (подобно своему химическому аналогу – кальцию) в присутствии углерода кокса вступает в реакцию с серой с образованием сульфида  $\text{SrS}$ . Таким образом, стронций распределяется между фазами доменного процесса следующим образом (табл. 4.15).

Таблица 4.15

**Распределение стронция между фазами доменного процесса**

Форма попадания стронция в доменную печь	Распределение между фазами, % масс.		
	Чугун	Шлак	Газ
В виде $\text{SrO}$ или $\text{SrS}$ в минеральной части шихты и кокса	0	100	0
В составе органической части кокса	0	25...35	65...75

Присутствие стронция в доменном шлаке существенно повышает его обессеривающую способность, а также способствует производству чугуна с глобулярной (шаровидной) формой графитовых включений, что особенно важно при получении отливок специального назначения. Проблема поведения стронция в доменной плавке является актуальной для многих металлургических предприятий, которые могут использовать стронцийсодержащие сырьевые материалы и отходы.

Для определения принципиальных особенностей десульфурации чугуна стронцием был подготовлен образец чугуна, обогащенный серой до 0,3 % масс. В качестве исходного металла был взят чугун завода ЕКО-Stahl, содержащий 0,04 % масс. серы. В этот образец после расплавления в индукционной печи был добавлен сульфид железа в количестве, обеспечивающем 0,3 % масс. серы в образце.

Было проведено три серии опытов (табл. 4.16). Во всех сериях предварительно обогащенный серой чугун был расплавлен в индукционной печи. В расплав чугуна при температуре 1550 °С вводилось заданное количество стронция (в виде  $\text{SrCO}_3$ ). После изотермической гомогенизирующей выдержки в течение 0,5 ч отбиралась проба металла для определения концентрации серы, расплав чугуна охлаждался.

Относительный расход стронция  $\eta$  определяется как отношение количества стронция в системе к стехиометрическому количеству стронция, необходимому для перевода всей серы, содержащейся в чу-

гуне, в сульфид стронция SrS. В данном случае (0,3 % масс. серы) необходимое стехиометрическое количество стронция составляет  $0,3 \cdot 87,62 / 32,07 = 0,82$  % масс.

Таблица 4.16

**Результаты опытов по десульфурации чугуна стронцием**

	Содержание Sr в системе, % масс.	Содержание S в чугуне, % масс.	Степень относительной десульфурации $\lambda$	Относительный расход Sr, $\eta$
Исходный образец чугуна	0,00	0,300	0,00	0,00
1	0,11	0,260	0,13	0,13
2	0,95	0,090	0,70	1,15
3	1,80	0,038	0,87	2,18

Коэффициент относительной десульфурации  $\lambda$  представляет собой отношение количества серы, удаляемой из чугуна после введения в систему стронция ( $[S]_{\text{исх}} - [S]_{\text{опыт}}$ ) к исходному содержанию серы в чугуне. Например, для опыта № 2  $\lambda = (0,3 - 0,26) : 0,3 = 0,13$ . Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенные серии опытов подтверждают выводы проведенного ранее термодинамического моделирования о том, что стронций является сильным десульфуратором. Потенциально возможно при использовании стронция добиться снижения содержания серы в чугуне в 5–7 раз.

2. Для значимого снижения содержания серы в чугуне количество применяемого для десульфурации стронция должно отвечать значениям  $\eta \geq 1$ . При  $\eta < 1$  (т.е. расход стронция меньше стехиометрически необходимого для связывания серы количества) эффективность использования стронция снижается, поскольку при малых концентрациях в рассматриваемой системе реагенты – стронций и сера – не могут прореагировать полностью по кинетическим причинам, и КПД реакции десульфурации оказывается незначительным.

3. При увеличении  $\eta$  выше 1,4...1,6, т.е. при значительном увеличении количества стронция выше стехиометрически необходимого, эффективность использования стронция снижается.

В результате проведения первых серий опытов выявлено, что степень десульфурации чугуна стронцием существенно зависит от абсолютного количества серы, присутствующей в металле. Для определения влияния количества серы на степень десульфурации была проведена еще одна серия опытов. В расплав чугуна ЕКО-Stahl, содержащий



0,04 % масс. серы при температуре 1550 °С, был введен стронций в количестве, соответствующем 0,5 % масс. (что соответствует 5 кг стронция на 1 т чугуна и  $\eta = 5,0$ ). Далее были отобраны пробы металла через 15 и 60 мин после присадки стронция. Результаты химических анализов по определению содержания серы в чугуне приведены в табл. 4.17.

Таблица 4.17

**Результаты опытов по определению влияния количества серы на степень десульфурации чугуна**

Время выдержки, мин	Содержание серы, % масс.	Степень относительной десульфурации
0	0,040	0,000
15	0,033	0,175
60	0,027	0,325

Результаты исследований позволяют сделать следующее заключение: при небольших содержаниях серы, соответствующих реальным ее концентрациям в чугуне, степень десульфурации чугуна стронцием может достигать 30 % и определяется кинетическими особенностями процесса. В реальных условиях доменной плавки, когда осуществляется капельное проникновение расплава металла через расплав шлака, возможно обеспечение оптимальных кинетических условий для десульфурации чугуна стронцийсодержащим шлаком. Поэтому степени десульфурации, полученные в лабораторных экспериментах, можно рассматривать как нижние пределы десульфурации.

Исследования микроструктуры передельного чугуна завода EKO-Stahl, после десульфурации его стронцийсодержащим материалом производились в отраженном свете на микроскопах Полам-311 и Amplival-pol-4, при увеличении в 200 раз. Микроструктуры исследованных образцов чугуна приведены на рис. 4.8–4.16 (после травления 3%-ным раствором  $\text{HNO}_3$ ). Исходный образец представляет собой типичный передельный чугун – его основными структурными составляющими являются цементит и ледебуритная эвтектика (рис. 4.8). Рядом располагаются области, где к уже названным составляющим добавляются выделения хлопьевидного графита (рис. 4.9).

Добавка в чугун для повышения содержания серы сульфида  $\text{FeS}$  резко изменила только форму графитных выделений – на смену хлопьевидным выделениям пришли крупные «крабовидные» выделения (рис. 4.10). Добавка в исходную систему стронция в количестве 0,1 % масс., не изменив структуры ледебуритной матрицы, заметно

уменьшила размеры крупных графитных выделений (рис. 4.11). Причем наряду с крупными «крабовидными» выделениями обнаруживаются и мелкие точечные выделения графита – «графитовая спесь». Ее коагуляция, так же как и заметная сфероидизация «крабов», отчетливо наблюдается при увеличении количества стронция – до 0,95 % масс. (рис. 4.12 и 4.13). Дальнейшее увеличение вводимого стронция до 1,8 % масс. приблизило содержание серы к исходному малосернистому чугуну, а графитные выделения приобрели первоначальную хлопьевидную форму (рис. 4.14).

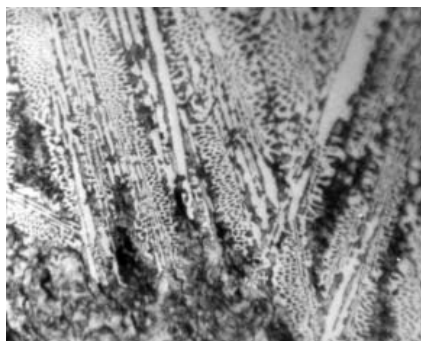


Рис. 4.8. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl (ледебуритная эвтектика)

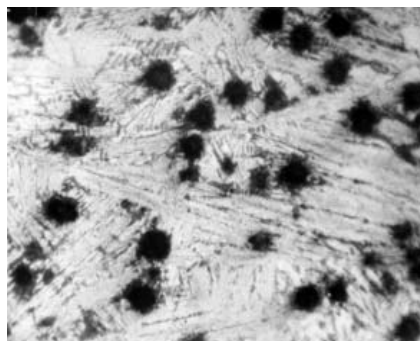


Рис. 4.9. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl (хлопьевидный графит)



Рис. 4.10. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl, обогащенного серой 0,3 % масс. («крабовидные» выделения графита)

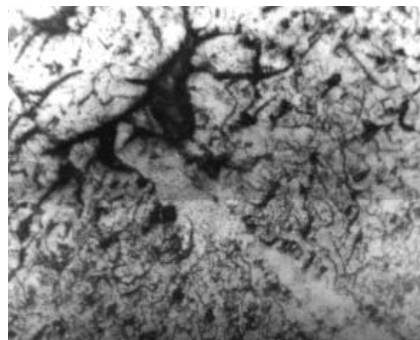


Рис. 4.11. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 0,1 % масс. Sr («крабовидный» графит и графитовая спесь)

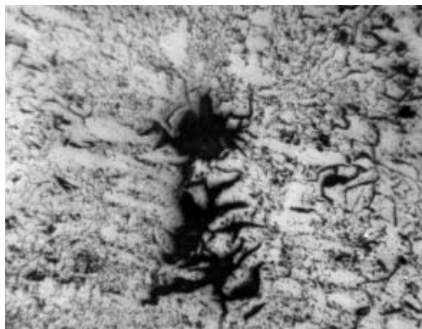


Рис. 4.12. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 0,95 % масс. Sr (сфероидизация «крабовидного» графита)

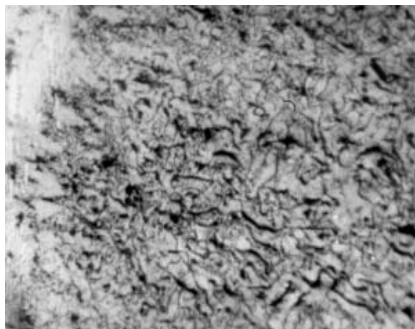


Рис. 4.13. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 0,95 % масс. Sr (коагуляция графитовой спели)

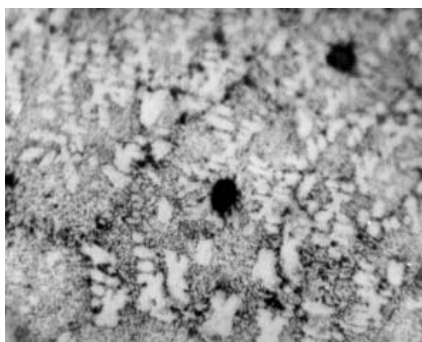


Рис. 4.14. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 1,8 % масс. Sr (хлопьевидный графит)

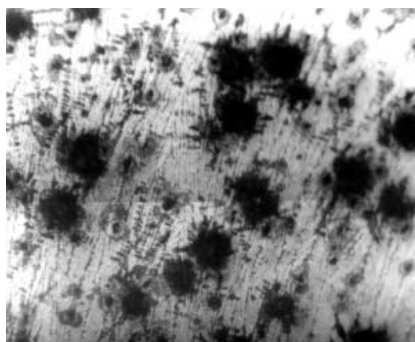


Рис. 4.15. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 0,5 % масс. Sr и выдержки 15 мин (коагуляция хлопьевидного графита)

Во второй серии опытов проверялось влияние на содержание серы выдержки расплавленного чугуна. При содержании  $Sr = 0,5$  % масс. и при 15-мин выдержке в индукционной печи выделения графита сохраняли хлопьевидную форму, однако их размеры заметно возросли в сравнении с исходным чугуном (сравнить рис. 4.15 и 4.16). Дальнейшее увеличение выдержки до 60 мин способствовало еще большей сфероидизации графитных выделений и получению шаровидного

графита (см. рис. 4.16). Одновременно отмечается практически полное исчезновение мелкой «графитовой спели».

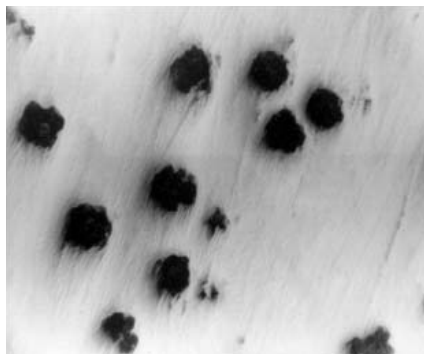


Рис. 4.16. Микроструктура чугуна завода ЕКО-Stahl после введения 0,5 % масс. Sr и выдержки 60 мин (шаровидный графит)

Результаты микроскопических исследований являются подтверждением результатов химических анализов образцов чугуна после десульфурации стронцием. Кроме того, добавка стронция в расплав чугуна приводит к сфероидизации графита, т.е. оказывает модифицирующее действие. Можно рекомендовать добавки стронцийсодержащих веществ в доменную шихту как с целью снижения содержания серы, так и для повышения свойств передельного чугуна [346, 347].

**Определение вязкости шлаков, содержащих SrO.** Для проведения исследований влияния стронция на вязкость доменного шлака в условиях доменной печи №5А ЕКО-Stahl были подготовлены образцы следующего состава (табл. 4.18)

Таблица 4.18

**Химический состав исследуемых образцов**

Номер образца	Содержание в исследуемом образце, % масс.		
	шлак завода ЕКО-Stahl	CaO химически чистый	SrO химически чистый
1	100	—	—
2	99,1	—	0,9
3	98,2	—	1,8
4	95,8	4,2	—
5	94,8	4,3	0,9
6	93,9	4,3	1,8

Результаты испытаний, проведенных по стандартной методике на металлургическом вискозиметре при температурах 1550 и 1650 °С, представлены в табл. 4.19.

*Таблица 4.19*

**Результаты определения вязкости образцов**

Номер образца	Вязкость, пуаз	
	1550 °С	1650 °С
1	0,8	–
2	3,4	–
3	1,2	1,3
4	2,8	2,0
5	2,3	2,4
6	2,2	1,0

Результаты испытаний показывают, что в целом увеличение содержания стронция приводит к снижению вязкости шлака. Особенно наглядно это проявляется для образцов, содержащих СаО при температуре 1550 °С. Для тех же образцов, но при температуре 1650 °С сначала происходит незначительное увеличение вязкости при содержании SrO 0,9 %, а затем ее резкое падение при содержании SrO 1,8 %. Для образцов, содержащих только шлак завода ЕКО-Stahl, влияние стронция незначительно: при добавлении 0,9 % SrO происходит более чем трехкратный рост вязкости, при дальнейшем увеличении SrO до 1,8 % почти такое же снижение вязкости. Увеличение температуры испытаний либо практически не меняет вязкости (образцы № 3, № 5), либо снижает вязкость (образцы № 4, № 6).

## 4.5. Свинец

Свинец попадает в доменную печь в составе содержащих свинец железорудных материалов и при переплавке главным образом отходов сернокислотного производства. Согласно общепринятым представлениям [311, 348, 349], обладая очень низкой температурой плавления (327 °С), в доменной печи свинец находится в сильно перегретом состоянии и очень подвижен. Он активно проникает в мельчайшие поры и зазоры в кладке лещади и горна и разрушает ее. Содержание свинца в чугунах и шлаке может составлять соответственно 0,09 и 0,04 % масс. Из-за высокой плотности жидкого свинца (по сравнению с чугуном) и слабой его растворимости в чугуне он располагается на лещади доменной печи под слоем металла.

На Крекиковском металлургическом комбинате (Болгария), где проплавлились полиметаллические руды, восстановленный свинец распределялся следующим образом [311, 348, 349]:

- выпускался через специальную летку ниже уровня на 3,5 м чугуновой летки – 50...55 %;
- выносился газом и улавливался в газоочистке – 7...8 %;
- выносился из печи с чугуном – 12...15 %.

Характерные балансы свинца для ОАО «Северсталь», ОАО «Тулачермет» и ЕКО-Stahl приведены в табл. 4.20.

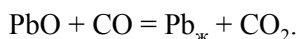
Таблица 4.20

**Характерные балансы свинца  
при выплавке перedельного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	Тулачермет	ЕКО-Stahl
Приход в доменные печи:			
с железорудной частью	10	45	20
с коксом	нет	30	1
в том числе с ОЧК	–	25	–
<b>Итого приход</b>	<b>10</b>	<b>75</b>	<b>21</b>
Переходит в ходе доменной плавки:			
в чугун	3	45	10
в шлак	1	5	нет
в доменный шлам	4	10	5
<i>КК<sub>д.ш</sub></i>	50	60	50
Невязка <sup>1</sup>	2 (20 %)	15 (20 %)	5 (25 %)

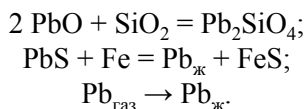
<sup>1</sup> Переходит в кладку, накапливается в виде настывлей, самостоятельной фазы в горне печи, в циркуляционном контуре; не улавливается в процессе газоочистки.

Выполненные термодинамические расчеты, результаты статистических и балансовых исследований позволяют предположить следующую схему фазовых превращений свинца в доменном процессе (Приложение 7). Свинец поступает в доменную печь главным образом в составе соединений с серой, в виде PbS или PbSO<sub>4</sub>. В случае поступления свинца в составе оксида его восстановление оксидом углерода до Pb имеет место уже при температурах 400...700 °С:



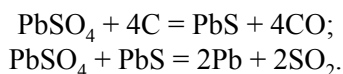
При этих же температурах происходит частичное связывание свинца в устойчивые силикаты, восстановление сульфида свинца метал-

лическим железом и конденсация возгона свинца, образовавшегося в нижних высокотемпературных зонах печи:

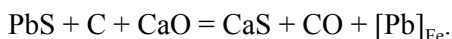


В итоге небольшая часть свинца в составе  $\text{Pb}_2\text{SiO}_4$  выносится из доменной печи со шлаком. Уже в шахте доменной печи в значительном количестве образуется жидкий свинец, часть которого располагается в трещинах и порах частиц железорудных материалов и блокирует диффузионные пути восстановительного газа внутрь частиц. Некоторая часть свинца проникает в поры футеровки печи и образует настыли.

$\text{PbSO}_4$  активно восстанавливается в температурном интервале 650...900 °C по реакциям:



$\text{PbS}$ , опускающийся с шихтой в зону с температурой 1000...1200 °C, восстанавливается углеродом кокса в присутствии  $\text{CaO}$  и металлического железа по суммарной реакции



При этих же температурах (1000...1200 °C) получает развитие реакция



$\text{PbS}$  активно конденсируется в верхней части заплечиков. Конденсированный  $\text{PbS}$  реагирует с углеродом кокса в присутствии  $\text{CaO}$  и железа и таким образом возникает контур циркуляции:  $\text{Pb}_{\text{ж}} \rightarrow \text{Pb}_{\text{газ}} \rightarrow \text{PbS} \rightarrow \text{Pb}_{\text{ж}}$ .

Свинец, опускающийся вместе с шихтовыми материалами, возгоняется в нижней части заплечиков. Мелко распределенный свинцовый туман поднимается вместе с шахтным газом, чтобы снова принять участие в кругообороте. Опыты в экспериментальной печи показали обогащение свинцом высокодисперсной пыли шахтного газа при температуре 1000 °C [311]. Таким образом формируется второй контур циркуляции:  $\text{Pb}_{\text{ж}} \rightarrow \text{Pb}_{\text{газ}} \rightarrow \text{Pb}_{\text{ж}}$ .

В горне доменной печи, где температура достигает более 1500 °C и свинец нерастворим в железе, имеет место активное испарение и уле-

тучивание свинца. Вместе с тем вследствие высокой удельной массы и большой подвижности часть свинца собирается на лещади, откуда легко проникает в швы кладки [311, 348, 349].

## 4.6. Мышьяк

Мышьяк попадает в доменную печь в составе всех шихтовых материалов (табл. 4.21, 4.22). Согласно существовавшим до настоящего времени представлениям, мышьяк должен полностью переходить в чугун независимо от того, в составе какого материала он попал в печь. Однако данные тонкого химического анализа опровергают существующие взгляды. Представленная информация показывает, что мышьяк присутствует во всех фазах доменного процесса.

Таблица 4.21

**Характерные балансы мышьяка при выплавке перedefльного чугуна, г/т чугуна**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	EKO-Stahl
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	6	20	15	60
с коксом	4	5	10	5
в том числе с ОЧК	3	4	8	4
<b>Итого приход</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>65</b>
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	5	15	10	50
в шлак	2	5	5	10
в доменный шлам	< 1	< 1	< 1	< 1
<b>Невязка</b>	<b>3 (30 %)</b>	<b>5 (20 %)</b>	<b>5 (25 %)</b>	<b>5 (8 %)</b>

Таблица 4.22

**Баланс мышьяка при выплавке литейного чугуна и ферромарганца для условий ОАО «Косогорский металлургический завод», г/т чугуна**

Статья баланса	Литейный чугун	Ферромарганец
Приход в доменные печи:		
с железорудной частью	33	720
с коксом	5	10
в том числе с ОЧК	4	8
<b>Итого приход</b>	<b>38</b>	<b>725</b>
Переходит в ходе доменной плавки:		
в чугун	30	450
в шлак	3	2
в доменный шлам	Менее 1	—
<b>Невязка</b>	<b>5 (13 %)</b>	<b>—</b>



Данные балансов мышьяка, построенных для доменных печей различных предприятий, и результаты термодинамического моделирования его поведения в доменном процессе позволяют построить принципиальную схему поведения элемента в ходе доменной плавки в зависимости от того, в составе какого материала он попадает в агрегат. Выявленные закономерности поведения мышьяка в доменной плавке иллюстрируются данными табл. 4.23 и рис. 4.17 и 4.18 [8, 350–352].

Таблица 4.23

**Распределение мышьяка между фазами доменного процесса в зависимости от формы его присутствия в шихтовых материалах**

Форма поступления в доменную печь	Распределение между фазами процесса, %		
	Чугун	Шлак	Газ
В составе железных или марганцевых руд	30...70	–	30...70
В составе агломерата и окатышей	70...90	До 30	До 5
В неорганической части кокса	–	До 30	Свыше 70
В органической части кокса	До 30	–	Свыше 70

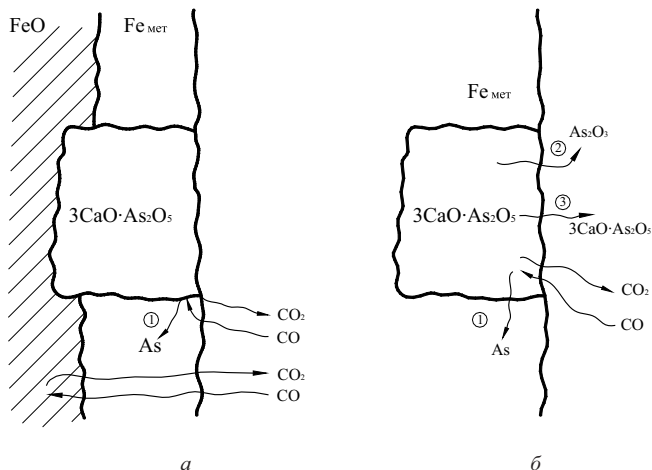


Рис. 4.17. Схема поведения мышьяка в доменной плавке в случае его попадания в печь в составе офлюсованных агломерата или окатышей:

- а – реакции в твердой фазе в шахте печи; б – реакции в зоне «размягчения плавления» шихты;  
 1 – растворение мышьяка в свежавосстановленном железе; 2 – возгонка  $As_2O_3$ ; 3 – растворение  $3CaO \cdot As_2O_5$  в шлаке

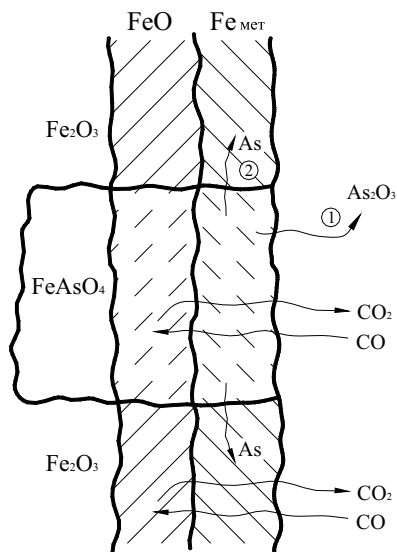


Рис. 4.18. Схема поведения мышьяка в доменной плавке в случае его попадания в печь в составе неофлюсованного железорудного материала:  
 1 – возгонка  $\text{As}_2\text{O}_3$ ; 2 – растворение мышьяка в свежавосстановленном железе

## 4.7. Фосфор

Наиболее изученным микроэлементом доменной плавки является фосфор. Тем не менее до сих пор описания его поведения в доменном процессе в учебниках и специальных изданиях имеют существенные различия. Это говорит о сложности и актуальности анализа фазовых превращений микроэлементов в сложных металлургических системах. Ниже приводится подробная ретроспектива изменения представлений о поведении фосфора в доменной плавке и результаты анализа по описанной выше методике.

Первые целенаправленные исследования по определению присутствия фосфора в сплавах железа с углеродом относятся к 1770 г. Они были выполнены немецким химиком Мейером и опубликованы в двух очерках в журнале «Annales de Chimie» (том 3) за 1784 г. Ученый полагал, что он открыл новый элемент – полуметалл, придающий

чугуну легкоплавкость. Мейер даже предложил для него название – «siderium». Однако, анализируя результаты опытов Мейера в 1785 г., подробную статью (*Annales de Chimie*, том 11) опубликовал знаменитый ученый К.В. Шееле, который, собственно, и идентифицировал обнаруженный Мейером элемент как фосфор.

В последующие годы исследования взаимодействия железа и фосфора проводились с высокой интенсивностью практически во всех ведущих промышленных мировых державах. Подробную статью об обнаружении присутствия фосфора в железных рудах и чугунах Франции, опубликовал в 1806 г. в *Annales des Mines* (том 20) Л.Н. Воклен. Воклен впервые показал, что основным источником фосфора в чугуне является именно железная руда. Формы присутствия фосфора в железных рудах – фосфаты кальция и в чугуне и стали – фосфиды железа установил, всесторонне исследовал и подробно описал Й.Я. Берцелиус (*Afhandlinger i fysik, kemi och mineralogi* и *Traite de Chimie*).

Выполненные в течение трех десятилетий фундаментальные исследования позволили сформулировать основные теоретические положения о влиянии фосфора на свойства чугуна и стали, по существу не претерпевшие принципиальных изменений вплоть до настоящего времени. Их обобщил в сочинении «*Eisenhüttenkunde*» К.И.Б. Карстен. Эта книга, опубликованная в 1818 г., в истории металлургии рассматривается как образец одновременно и учебника, и практического руководства по производству черных металлов. Карстен подробно описал влияние фосфора на литейные свойства чугуна, хладноломкость железа и стали.

С этого времени практически все книги по металлургии железа более или менее подробно воспроизводили текст Карстена. Например, в практическом руководстве [353] приводится следующая цитата: «Соединение фосфора с железом может быть превосходно отполировано, но является достаточно хрупким (хладноломким) ... присутствие фосфидов приводит к хладноломкости чугуна».

Первая балансовая доменная плавка с целью исследования распределения фосфора между продуктами процесса была проведена английским инженером И. Райли в 1859 г. Эксперименты проводились на 13 доменных печах завода в городе Доулейс (*Dowlais, Уэльс*) в течение семи дней. Печи работали на коксе и горячем дутье и про-

изводили серый чугун. Были отобраны и проанализированы пробы чугуна, шлака и пыли, «откладывающейся на колошнике и в газоотводящих трубах». Подробное описание экспериментов было составлено Д. Перси и впоследствии неоднократно воспроизводилось в теоретических работах по доменному процессу [354, 355]. Результаты опытов в обработке Перси приведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23

**Содержание основных компонентов в доменном шлаке, полученном при производстве серого чугуна на заводе в Доулейсе в 1859 г., % масс. [354, 355]**

Компонент	Максимум	Среднее	Минимум
Кремнезем	45,23	41,85	39,09
Глинозем	17,14	14,73	11,55
Известь	34,32	30,99	23,81
Оксид магния	5,58	4,76	3,97
Оксид железа	6,91	2,63	1,29
Пентаоксид фосфора	0,43	0,15	0,10

Содержание фосфора в пыли, накапливающейся в газоотводящих трубах, по анализу Райли составило около 0,17 % масс. Таким образом, И. Райли впервые установил, что фосфор, поступающий в доменную печь с кусковой рудой, коксом и известняком, распределяется между чугуном, шлаком и газовой фазой процесса. Кроме того, он исследовал взаимосвязь между содержанием в шлаке оксида железа и пентаоксида фосфора. Согласно его выводам «содержание фосфора в шлаке оставалось практически неизменным вплоть до момента повышения содержания оксидов железа до 2,5 %». Затем отмечалось «пропорциональное увеличение содержания обоих исследуемых компонентов». Результаты опытов Райли также показывают, что в ходе плавки имело место накопление фосфора в доменном шлаке, так как среднее его содержание в шихте существенно меньше, чем в пробах пыли из газоотводящих труб.

Исследования И. Райли сформировали характерную для третьей четверти XIX в. точку зрения: в ходе доменной плавки серого чугуна около 10 % элемента переходит в шлак, до 5 % – в газ, остальное – в чугун [356, 357].

Активное развитие способов производства литой стали (бессемеровской, томасовской, мартеновской) в последней четверти XIX в. привело к тому, что почти 95 % выплавляемого в доменных печах металла стало представлять собой перепельный чугун. Совершенство-

вание технологии доменной плавки позволило практически гарантировано обеспечивать содержание оксида железа в шлаке менее 2 % масс. В результате в большинстве практических руководств начала XX в. [358–361], не претендующих на глубокий теоретический анализ доменного процесса, становится нормой упоминать о практически полном переходе фосфора в чугун и невозможности повлиять на этот процесс технологическими способами. Например, «при холодном ходе доменной печи, в присутствии значительного количества оксида железа в шлаке, возможен переход в шлак до 15 % фосфора. При горячем ходе печи с кремнеземистой шихтой можно считать, что весь фосфор перейдет в чугун» [360].

К началу XX в. уже был подробно теоретически исследован механизм восстановления фосфора из фосфата кальция (например, [362]) и во многих книгах того времени приводится реакция:



В таком общепринятом виде описывается поведение фосфора в доменной плавке в советских металлургических учебниках и технических энциклопедиях 20–30 годов XX в. [363–367]. Приведем цитату из книги наиболее авторитетного автора – академика М.А. Павлова [366]: «Фосфор, входящий в доменную печь обыкновенно в виде фосфорноизвестковой соли, восстанавливается после разложения этой соли кремнеземом, т.е. в области высоких температур реакция идет полностью благодаря присутствию избытка кремнезема в шлаке. Лишь при значительном охлаждении горна, когда в шлак переходит закись железа, часть фосфора не восстанавливается». Отметим, что Павлов пишет о восстановлении фосфора, а не его распределении между фазами доменной плавки. Кроме того, важно, что Павлов считает нормальным, т.е. характерным для горячего хода доменной печи при выплавке серого чугуна на коксе, содержание оксида железа в шлаке 0,3...2,7 %. Оно приведено в таблице этой книги «Состав характерных видов доменных шлаков промышленности СССР». Упомянутый интервал практически полностью соответствует области значений содержания оксида железа в шлаке, которая была определена И. Райли в 1859 г.

Необходимо упомянуть и о том, что коллега Павлова и его соавтор по статье «Доменное производство» [366] А.Ф. Новоспаский в

учебнике, изданном в 1933 г., счел необходимым высказать мнение об образовании возгонов фосфора: «Фосфор... восстанавливается в доменной печи почти полностью, можно считать, что 10 % возгоняется и уходит с газами» [367].

Мнение о полном переходе фосфора непосредственно в чугун (т.е. минуя газовую фазу) оказалось очень живучим. Оно перекочевало во многие практические руководства и популярные книги о доменном процессе первой половины XX в. Например, в популярном издании американских специалистов [368] можно прочесть следующее: «Фосфор является в доменной плавке единственным элементом, на который искусство доменщика не имеет абсолютно никакого влияния. Его соединения полностью восстанавливаются, и фосфор из всех сырых материалов переходит в чугун».

Для практических целей и общего представления о доменной плавке такое изложение вполне оправдано, однако подобная трактовка приводится и в некоторых современных отечественных учебниках, претендующих на серьезные теоретические обобщения металлургических процессов: «В реальных условиях доменной плавки фосфор, попадающий с шихтой в доменную печь, целиком переходит в металл...» [307]; «...весь попавший в доменную печь фосфор целиком переходит в чугун и регулировать его содержание в металле можно, только изменяя состав шихты» [369].

В целом в современных российских учебниках сведения о поведении фосфора в доменной плавке ограничиваются реакциями его восстановления из фосфатов кальция и железа и аксиомой о его полном переходе в чугун. Некоторые авторы даже называют такую точку зрения общепринятой [370].

С положением о практически полном восстановлении фосфора (при содержании оксида железа в шлаке менее 2,5 %) уже сто пятьдесят лет представители металлургической науки действительно не спорят, а вот с полным переходом элемента в чугун дело обстоит иначе. Балансовые исследования по определению распределения фосфора между продуктами доменной плавки многократно проводились еще во второй половине XIX в. При этом, несмотря на то что балансовые расчеты каждый раз показывали, что часть фосфора переходит в газовую фазу, результаты непосредственных анализов колошникового газа на присутствие в нем соединений фосфора неизменно давали отрицательный результат.

В этом смысле, весьма характерно следующее утверждение Ледебура [371], который ссылается на опыты Финкенера (Wedding «Handbuch der Eisenhüttenkunde», 1884) и Гильгенштока (Stahl und Eisen, 1886) и заключает: «при доменной плавке руд с коксом большая часть заключающегося в рудах, флюсах и золе фосфора, восстанавливается и переходит в железо. Некоторые техники уверяли неоднократно, будто при восстановительной плавке часть фосфора шихты улетучивается. Заключение это основывается на определении содержания фосфора в шихте, чугуна и шлаке. Однако до сих пор не удавалось доказать присутствие фосфора в каком-либо виде в улетающих из доменной печи газах». Заметим, что и в настоящее время анализ металлургических газов на присутствие соединений фосфора остается сложнейшей проблемой. И это неудивительно, поскольку несложный арифметический расчет показывает, что при переходе десятой части фосфора, поступающего с шихтой, в газ, его объемное содержание находится на уровне тысячных долей процента, что требует применения специфических дорогостоящих методов химического анализа. Кстати, и современные балансовые исследования дают результаты, аналогичные упомянутым выше. Например, по мнению автора одного из зарубежных учебников по доменному производству [372] «...переход фосфора в чугун составляет около 90 %. Остальные 10 % переходят в газ, шлак, а также накапливаются в футеровке». В отечественном издании [195], в котором проанализированы параметры работы доменных печей не только России, но и Германии, приводятся следующие данные: в шлак переходит до 2 % фосфора, а в газ – до 4 %.

С 1935 по 1940 г. И.З. Козловичем, А.П. Любаном, М.М. Лейбовичем и другими исследователями были проведены масштабные промышленные опыты по зондированию доменных печей комбинатов и заводов СССР: Магнитогорского, Макеевского, Косогорского, «Азовсталь» и «Запорожсталь». Было определено содержание кремния, марганца, фосфора и серы в материалах, извлеченных из распара и горна доменных печей при выплавке передельного чугуна, ферромарганца и ферросилиция. Результаты этих исследований приведены и прокомментированы во многих источниках – наиболее полно в справочниках М.А. Павлова и И.П. Бардина, монографиях А.П. Любана и А.Д. Готлиба [373–376].

В ходе исследований удалось установить, что содержание фосфора в пробах металла из распара существенно превышало содержание

элемента в пробах чугуна из горна доменных печей. Данный факт, подтверждающий «энергичную возгонку восстановленного фосфора и поглощение его паров железом», специалисты трактовали по-разному. А.П. Любан полагал, что железо распара насыщается парами фосфора, образующимися в горне, причем настолько интенсивно, что поглощает весь фосфор. По мнению Н.И. Красавцева, «фосфор в значительной степени восстанавливается выше распара... Ввиду возгонки его и поглощения металлом, трудно по содержанию фосфора в металле распара установить, какая часть фосфора восстановилась выше этого горизонта, а какая часть ниже» [376].

Наиболее аккуратно и полно сформировавшуюся точку зрения (на основе анализа и зарубежной литературы) в 1966 г. сформулировал А.Д. Готлиб: «Восстановление фосфора ускоряется присутствием железа и кремнезема. Железо энергично поглощает фосфид железа и активно соединяется с фосфором в парообразном состоянии... Практически для удобства технических расчетов принимают, что фосфор шихты полностью восстанавливается и переходит в чугун. В действительности переходит в чугун около 95 % всего фосфора» [376].

Актуальность фундаментальных исследований поведения фосфора в доменном процессе в последние годы неуклонно возрастает. Здесь необходимо выделить несколько факторов. Во-первых, увеличивается содержание фосфора в сырьевых материалах для доменной плавки: в железных рудах основных разрабатываемых месторождений Северной Америки, Австралии и Бразилии [377], в коксующихся углях практически всего мира [378–380]. Во-вторых, принципиально изменились представления о формах присутствия фосфора в шихтовых материалах. Например, установлено, что в ходе агломерации железосодержащих материалов как природного, так и техногенного происхождения, фосфор преимущественно концентрируется в фазе двухкальциевых силикатов, в коксе и пылеугольном топливе он представлен не только в составе минеральной фазы, но и в виде гетероатомов включения в кристаллическую решетку. В-третьих, применяются новые способы подачи в доменную печь материалов, содержащих фосфор. Теперь он попадает в агрегат не только через колошник, но и с материалами, вдуваемыми в горн печи (причем не только с пылеугольным топливом, но и с конвертерным шлаком, «легкой» фракцией от шредирования автомобилей, электронной и электробытовой техники и других техногенных материалов)» [381–383].



Анализ результатов термодинамических расчетов, выполненных по оригинальной методике (см. п. 4.2), показывает, что главная особенность поведения фосфора при нагреве в восстановительной среде вместе с оксидами железа заключается в следующем. До тех пор пока не начался интенсивный процесс восстановления железа в твердом состоянии, фосфор присутствует в системе практически только в конденсированных соединениях минеральной части шихты и кокса, т.е. может газифицироваться очень незначительная его часть (не более 1 %). Затем, в относительно узком температурном интервале 800...1000 °С, когда металлического железа на поверхности частиц шихты уже достаточно много, происходит быстрое интенсивное восстановление фосфора из минеральной части шихты. Можно утверждать, что наличие активной поверхности восстановленного железа приводит к практически полному адсорбционному захвату всего восстанавливающегося фосфора и растворению его в железе. При более высокой температуре (выше 1300 °С) фосфор, оставшийся к этому времени в органической части кокса, легко газифицируется в виде соединений  $P_2$  и  $PO$  (в соответствии с термодинамическими данными).

При прохождении газообразных соединений фосфора через вышележащие слои, содержащие капли расплавленного железа и металлическое твердое железо, происходит его дополнительный частичный переход в металл. В итоге в газовую фазу может перейти (из органической части кокса) не более 15...20 % фосфора, т.е.  $\gamma_3P < 15$  %. Реальное распределение фосфора между тремя металлургическими средами зависит от состава и поверхностных свойств шихтовых материалов, которые определяют кинетику процессов восстановления. Если скорость восстановления и газификации фосфора недостаточна, чтобы обеспечить термодинамически полный его переход в металл и в газ, имеет место попадание его некоторой доли в шлак совместно и пропорционально перешедшей в шлак доле железа.

Таким образом, ведение доменной плавки на современном уровне невозможно без учета поведения микроэлементов, оказывающих существенное влияние на сбережение ресурсов, качество продукции и состояние окружающей среды. Разработана методика анализа и прогнозирования поведения микроэлементов в доменной плавке, учитывающая современные особенности процесса, форму присутствия примесных элементов в металлургических материалах и способ их ввода в доменную печь [384–390].

Наблюдающееся в последние годы увеличение доли перехода микроэлементов доменной плавки в возгоны и повышение их содержания в доменном шламе связано главным образом с особенностями поведения доли этих микроэлементов, входящей в состав органической части кокса и пылеугольного топлива.

Для некоторых микроэлементов, поступающих в доменную печь с офлюсованными и неофлюсованными материалами (в частности для мышьяка), можно предполагать принципиально различный характер поведения в доменной плавке.

Для практических целей контроля и прогноза содержания микроэлементов в продуктах доменного процесса целесообразно введение параметра «Приведенный коэффициент перехода микроэлемента в продукты доменной плавки»,  $\mathcal{E}_\phi^i$ , доли ед.:

$$\mathcal{E}_\phi^i = \frac{1}{M_i} (\eta_i^{\text{ожр}} OЖР_i + \eta_i^{\text{ножр}} НОЖР_i + \eta_i^{\text{очк}} ОЧК_i + \eta_i^{\text{мчк}} МЧК_i + \eta_i^{\text{олд}} ОДД_i + \eta_i^{\text{млд}} МДД_i ).$$

В приведенной формуле:

- $\mathcal{E}_\phi^i$  – коэффициент перехода микроэлемента в продукты доменной плавки (чугун, шлак, газовую фазу), доли ед.;
- $\eta_i^{\text{ожр}}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из офлюсованных железорудных материалов, доли ед.;
- $OЖР_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе офлюсованных железорудных материалов, кг/т чугуна;
- $\eta_i^{\text{ножр}}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из неофлюсованных железорудных материалов, доли ед.;
- $НОЖР_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе неофлюсованных железорудных материалов, кг/т чугуна;
- $\eta_i^{\text{очк}}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из органической части кокса, доли ед.;
- $ОЧК_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе органической части кокса, кг/т чугуна;
- $\eta_i^{\text{мчк}}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из «минеральной» части кокса, доли ед.;

- $MЧК_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе «минеральной» части кокса, кг/т чугуна;
- $\eta_i^{одд}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из органической части дутьевой добавки, доли ед.;
- $ОДД_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе органической части дутьевой добавки, кг/т чугуна;
- $\eta_i^{мдд}$  – коэффициент перехода микроэлемента в анализируемый продукт доменной плавки из «минеральной» части дутьевой добавки, доли ед.;
- $МДД_i$  – приход микроэлемента в доменную печь в составе «минеральной» части дутьевой добавки, кг/т чугуна;
- $M_i$  – общий приход микроэлемента в доменную печь, кг/т чугуна.

В ходе исследований поведения галлия в доменной плавке впервые установлены факты развития изоморфного взаимного замещения галлия и железа в железогаллийалюминиевом оксидном растворе (при практически неизменной массовой доле  $Al_2O_3$ ) и формирования металлической фазы, состав которой соответствует формуле  $Fe_3Ga$ . Доказана возможность и предложена технология получения металлического галлия из чугуна, используемого в качестве сырья.

Результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что в ходе доменной плавки можно осуществлять глубокое селективное разделение основных составляющих комплексных руд, техногенных материалов и металлургических углей. Например, в доменном процессе родственные химические элементы: алюминий, галлий и индий, входящие в состав всех видов шихтовых материалов, распределяются между основными фазами следующим образом (табл. 4.24):

Таблица 4.24

**Распределение алюминия, галлия и индия  
между продуктами доменной плавки, %**

Элемент	Основные фазы доменного процесса			
	Чугун	Свинец в виде самостоятельной фазы	Шлак	Газ
Алюминий	0,01	–	99,99	–
Галлий	99	До 0,5	–	До 0,5
Индий	–	95	–	До 5

Данное обстоятельство позволяет предложить следующую принципиальную схему переработки комплексной руды или техногенного материала, содержащего Fe, Al, Pb, Ga, In [322] (рис. 4.19).

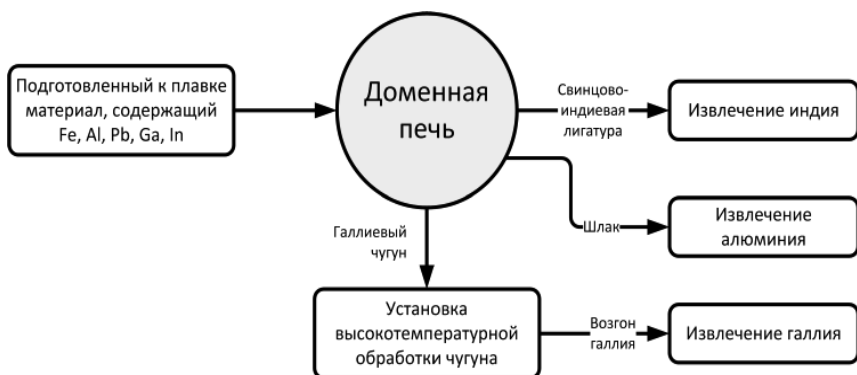


Рис. 19. Принципиальная схема переработки комплексной руды или техногенного материала, содержащего Fe, Al, Pb, Ga, In

## Глава 5. ПРОГНОЗ ОБРАЗОВАНИЯ И ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО РЕГИОНА

### 5.1. Прогноз образования техногенного месторождения на территории металлургического региона

Одним из наиболее важных с точки зрения оценки воздействия на окружающую среду результатов расчета элементо потоков является оценка накопления какого-либо элемента на территории региона. Вплоть до настоящего времени в качестве критериев, характеризующих уровень загрязнения почв исследуемой территории соединениями тяжелых металлов, используются следующие показатели:

- коэффициент опасности загрязнения почвы ( $K_o$ ), определяемый отношением фактического содержания вещества в почве ( $C$ , мг/кг) к его предельно допустимой концентрации (ПДК, мг/кг):  $K_o = C/\text{ПДК}$ ;
- коэффициент концентрации химического вещества ( $K_c$ ), определяемый отношением:  $K_c = C/C_\phi$ , где  $C_\phi$  – фоновая концентрация химического вещества в исследуемом регионе, мг/кг;
- суммарный показатель загрязнения  $Z_c$ , определяемый как сумма

коэффициентов концентрации химических элементов:  $Z_c = \sum_{i=1}^n K_{ci}$ , где  $n$  – число суммируемых элементов.

Исходя из значений показателя  $Z_c$  ситуация с загрязнением почв на исследуемой территории признается «допустимой», «умеренно опасной», «опасной», «чрезвычайно опасной» и т.д. [391, 392]. Уже к 1995 г. на территории Череповецкого металлургического региона свыше 80 % почвенного покрова характеризовалось как почвы, загрязненные умеренно опасно и выше [393–395].

Методология элементо потоков подразумевает исследование движения химических элементов между всеми структурными подразделениями предприятия, а также в составе выбросов всех видов. Принципиальная схема элементо потоков металлургического предприятия полного цикла приведена на рис. 5.1. Выделены основные блоки, в которых движение элементов имеет существенные особенности:

- производственный цикл, в котором, собственно, и осуществляется производство основной готовой продукции;

– вторичный цикл, включающий подразделения, в которых осуществляется переработка вторичных материалов (например, шламов и шлаков) и производство попутной продукции;

– техногенный цикл, связанный с депонированием текущих отходов производства. Необходимо отметить, что с развитием металлургических технологий становится возможной переработка ранее складировавшихся металлургических материалов и вовлечение их в производственный и вторичный циклы получения готовой продукции;

– техногенная среда – окружающая среда металлургического региона, которая подвергается непосредственному воздействию выбросов предприятия.

Таким образом, можно выделить основные элементопотоки:

$I^{п.р}$ ,  $I^{в.р}$  – потоки элемента с сырьевыми материалами, поступающими на предприятие в составе всех видов природных и вторичных ресурсов;

$I^{п.в}$ ,  $I^{в.п}$  – потоки элемента с вторичными материалами (шламами, шлаками и др.), направляемыми на переработку из производственного цикла и возвращаемыми в производственный цикл после вторичной переработки в рамках производственного рециклинга и отложенного рециклинга (из техногенного цикла);

$I^{в.т}$ ,  $I^{т.в}$  – потоки элемента с материалами, депонируемыми в золошламонакопителях (ЗШН) отвалах, техногенных водоемах и пр., и материалами, направляемыми на переработку в техногенный цикл для последующего использования в производстве готовой и попутной продукции;

$I_{пыль}^т$ ,  $I_{вод}^т$  – потоки элемента, формирующиеся в результате процессов пыления и вымывания из мест депонирования металлургических отходов;

$I_{п.ц}^{н/у}$ ,  $I_{в.ц}^{н/у}$ ,  $I_{т.ц}^A$ ,  $I_{т.с}^A$  – потоки элемента в составе выбросов неуловленной пыли (н/у) за территорию металлургического региона;

$I_{т.ц}^{ос}$  – потоки элемента в составе выбросов пыли из металлургических агрегатов на территорию предприятия;

$I_{в.ц}^г$ ,  $I_{т.ц}^г$ ,  $I_{т.с}^г$  – потоки элемента со сточными водами за территорию предприятия (в производственном цикле предприятия осуществляется оборотное водоснабжение, и выбросами элемента с техническими водами из основных агрегатов можно пренебречь);

$I_{п.ц}^{г.п}$ ,  $I_{в.ц}^{г.п}$  – потоки элемента в составе готовой и попутной продукции, производимой в агрегатах производственного и вторичного цикла;

$\Delta I_{п.ц}^{рец}$ ,  $\Delta I_{в.ц}^{рец}$ ,  $\Delta I_{т.ц}^{деп}$ ,  $\Delta I_{т.с}$  – текущее накопление элемента в составе складирiuемых и депонируемых материалов.

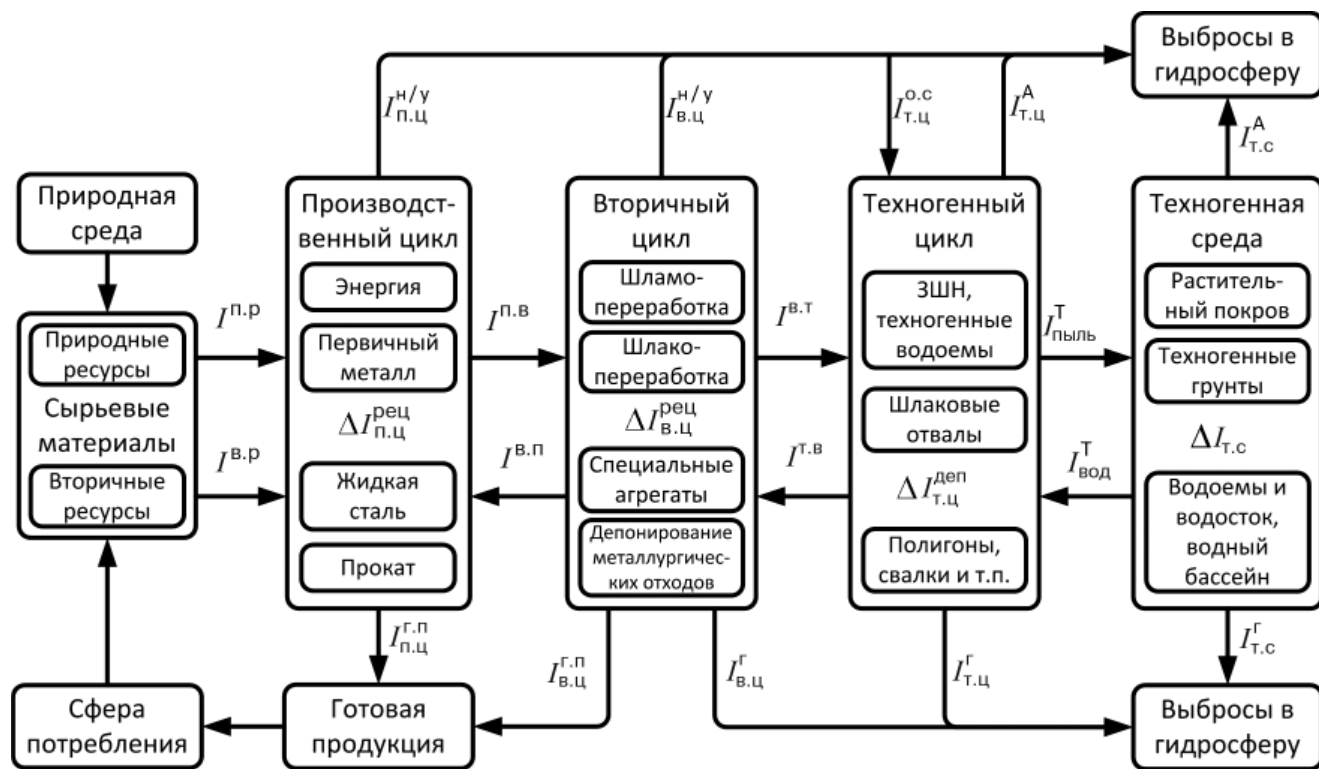


Рис. 5.1. Принципиальная схема элементопотоков для металлургического предприятия полного цикла

В общем виде баланс элемента для рассматриваемого временного отрезка выглядит следующим образом:

$$I^{п.р} + I^{в.р} = I_{п.ц}^{г.п} + I_{в.ц}^{г.п} + I_{п.ц}^{н/у} + I_{в.ц}^{н/у} + I_{т.ц}^A + I_{т.с}^A + I_{в.ц}^Г + I_{т.ц}^Г + I_{т.с}^Г + \Delta I_{п.ц}^{рец} + \Delta I_{в.ц}^{рец} + \Delta I_{т.ц}^{леп} + \Delta I_{т.с}.$$

Для каждой конкретной составляющей структурной схемы: металлургического агрегата, передела, технологического участка по переработке вторичных материалов или депонирования отходов и проч., баланс химического элемента может быть представлен в следующем виде (на примере составляющих производственного цикла):

$$\begin{aligned} \sum_1^k I_k^{вход} + \sum_1^l I_l^{в.р} + \sum_1^m I_m^{п.р} + \sum_1^n I_n^{в.п} + \sum_1^p (I_{п.ц}^{рец})_p^{вход} = \\ = \sum_1^x I_x^{вых} + \sum_1^y I_y^{н/у} + \sum_1^z I_z^{п.в} + \sum_1^q (I_{п.ц}^{рец})_q^{вых}. \end{aligned}$$

В приведенной формуле:

$\sum_1^k I_k^{вход}$  – сумма входящих потоков элемента в составе продуктов всех предшествующих металлургических производств;

$\sum_1^l I_l^{в.р}$  – сумма потоков элемента в составе вторичных ресурсов, поступающих со стороны;

$\sum_1^m I_m^{п.р}$  – сумма потоков элемента в составе природных ресурсов;

$\sum_1^n I_n^{в.п}$  – сумма потоков элемента в составе материалов производственного и отложенного рециклинга, прошедших подготовку в производствах вторичного цикла;

$\sum_1^p (I_{п.ц}^{рец})_p^{вход}$  – сумма потоков элемента в составе материалов производственного рециклинга, поступающих непосредственно из агрегатов производственного цикла;

$\sum_1^x I_x^{вых}$  – сумма потоков элемента в составе продуктов рассматриваемого производства, направляемых в последующие переделы или собственно готовой продукции;



$\sum_1^y I_y^{H/y}$  – сумма потоков элемента в составе не улавливаемых выбросов пыли;

$\sum_1^z I_z^{П.В}$  – сумма потоков элемента в составе вторичных материалов, направляемых на переработку во вторичный цикл, в том числе для последующего депонирования;

$\sum_1^q (I_{п.ц}^{рец})_q^{ВЫХ}$  – сумма потоков элемента в составе вторичных материалов производственного рециклинга, направляемых непосредственно для использования в агрегатах производственного цикла.

По аналогии для всего производственного цикла в целом может быть использована следующая формула:

$$\sum I^{П.Р} + \sum I^{В.Р} + \sum I^{В.П} = \sum I_{п.ц}^{Г.П} + \sum I_{п.ц}^{H/y} + \sum I^{П.В} \pm \Delta I_{п.ц}^{рец}.$$

Описанная методика расчета элементопотоков может быть использована для ретроспективного анализа («ретроанализа») накопления (или диссипации) элемента на территории металлургического региона, для оценки текущего состояния региона (что происходит: накопление или диссипация элемента), для прогноза состояния региона в будущем (в том числе, для случая ввода в эксплуатацию нового предприятия).

## **5.2. Оценка мощности техногенного месторождения для металлургического региона (на примере ОАО «Северсталь»)**

Приведем пример «ретроанализа» накопления микроэлемента – металла (стронция) на территории Череповецкого металлургического региона в 1955 – 1995 гг. Выбор объекта исследований обусловлен следующими причинами:

- наличием значительного количества необходимой для расчетов информации [8, 393–395];
- тем обстоятельством, что сырьевая база производства оставалась на всем протяжении истории комбината практически неизменной, что позволяет достаточно корректно распространять данные современных химических анализов на весь исследуемый период.

Череповецкий металлургический комбинат (в настоящее время ОАО «Северсталь») был введен в эксплуатацию в 1955 г. В развитии

металлургического производства в Череповецком регионе можно выделить ряд этапов. Первоначально цехи располагались на возвышенной части местности. При последующем расширении промышленной зоны для размещения производства использовались низинные районы, а для строительной планировки местности широко применялись различные отходы металлургического производства: шламы, шлаки, промышленный мусор и т.п. По мере возрастания производственных мощностей, освоения их новых видов и связанного с этим увеличения количества отходов (особенно в виде шламов) под их складирование были выделены специальные территории, занятые к настоящему времени шлаковыми отвалами, золошламонакопителями и свалками. Техногенные материалы широко применялись на комбинате также при перепланировках, строительстве автомобильных дорог, прокладке железнодорожных путей, формировании производственного стока технических вод, дождевой, ливневой и паводковой канализации, прудов-осветлителей и т.п.

В геоморфологическом отношении территория индустриального района города Череповца подразделяется на две явно выраженные части:

- северо-восточную, представляющую собой равнину с абсолютными отметками 120...145 м.;
- юго-западную – озерно-ледниковую террасу Малого Шекснинского озера с абсолютными отметками 113...115 м.

От равнины озерно-ледниковая терраса отделяется хорошо выраженным абразионным уступом высотой до 20...30 м, пересекающим всю территорию комбината с северо-запада на юго-восток. Уступ размыт и выположен лишь в его северо-западной части, где с возвышенности стекает ручей, впадающий в реку Кошта. Из анализа геоморфологического положения следует вывод о неблагоприятной ситуации с грунтовыми водами, так как золошламонакопители, пруды-осветлители и т.п. вынесены в низинную территорию, где грунтовые воды близко подходят к поверхности, что способствует миграции растворенных в них элементов и соединений [393].

К 1995 г. территория предприятия, занятая производственными подразделениями, составляла около 16,5 км<sup>2</sup>, а территория, занимаемая техногенными грунтами (с учетом площади ЗШН № 1 и № 2 – табл. 5.1), около 24 км<sup>2</sup>.

Технические характеристики золошламонакопителей

Параметр	ЗШН № 1	ЗШН № 2
Год ввода в эксплуатацию	1975	1984
Расчетный срок эксплуатации, лет	18,5	20,0
Вместимость, млн м <sup>3</sup>	11,07	35,0
Занимаемая площадь, га	119,0	429,6
Количество наблюдательных скважин	0	14
Расстояние от ближайшего водотока, км	0,5 от р. Шексна	0,3...0,4 от р. Кошта
Расстояние от г. Череповца, км	4,0	6,0
Противофильтрационный экран	Из суглинка	Из суглинка
Длина стороны накопителя L, см	480,0	3182,9
Предельно допустимый объем накопления отходов, м <sup>3</sup>	11,07·10 <sup>6</sup>	35,0·10 <sup>6</sup>
Объем сточных вод, м <sup>3</sup> /год	61 898 160	21 527 933
Объем накопления отходов, м <sup>3</sup> /год	—	181 037,91

В расчетах накопления микроэлементов в грунтах, растворения и миграции их с грунтовыми, подземными и сточными водами и т.п. общая территория промышленной зоны г. Череповца с учетом азотно-тукового производства (АТП), Череповецкого сталепрокатного завода (ЧСПЗ), муниципальной свалки твердых бытовых отходов (ТБО) и прилегающих территорий принимается равной 50 км<sup>2</sup> [393–395].

Для оценки накопления какого-либо элемента на территории металлургического региона необходимо знать параметры элементопотока за весь период функционирования предприятия, а это в настоящее время для отечественных и зарубежных предприятий практически невозможно. Поэтому для примера конкретного расчета используем «усредненный» элементопоток, характеризующий ситуацию за весь период работы предприятия с момента его основания.

Освоение металлургического производства в Череповецком регионе началось с выплавки первичного металла – чугуна – в доменных печах. Поэтому ретроспективный анализ развития производственных мощностей предприятия проводится именно на 1 т чугуна. Усредненные параметры расхода металлургических материалов за период 1955–1995 гг. приведены ниже, кг/т чугуна:

Угольный концентрат (в основном печорских углей) . . . . .	1290
Железорудные концентраты (Ковдорского и Оленегорского месторождений) . . . . .	923
Железная руда кусковая агломерационная . . . . .	58
Окатыши Костамушского ГОКа . . . . .	535

Известняк и доломит .....	392
Металлолом со стороны .....	387
Ферросплавы .....	62
Агломерат .....	1045
Кокс доменный, литейный и коксик- .....	537
Доменный шлак .....	320
Сталеплавильные шлаки .....	128
Золошлаковые отходы и шламы ТЭЦ и углеподготовительного отделения .....	85,5
<b>Шламы:</b>	
доменный .....	9,5
мартеновский .....	5
кислородно-конвертерный .....	14
электросталеплавильный .....	2
цеха изложниц и МНЛЗ .....	7
сварочный шлак и шлам прокатных цехов .....	8

**Приход стронция на предприятие.** В соответствии с данными химического анализа и изменением структуры производства АО «Северсталь» приход стронция с угольным концентратом составлял в среднем 60 г/т чугуна. Причем, в доменную печь попадало 35 г/т чугуна, а при сжигании угля ТЭЦ направлялось около 25 г/т чугуна. Приход стронция с железорудными материалами (концентратом и рудами) и флюсами составил в среднем 70 г/т чугуна (в том числе с флюсами – 5 г/т чугуна). Таким образом, всего поступило стронция в производственный цикл ЧерМК – АО «Северсталь» за период 1955–1995 гг.:  $(60 + 5) \cdot 10^{-6} \cdot 227,7 \cdot 10^6 = 15\,255,9$  т, где  $227,7 \cdot 10^6$  – количество чугуна произведенного предприятием за 1955–1995 гг.

**Поведение стронция при производстве чугуна.** В доменные печи попадает 35,0 г стронция/т чугуна с коксом и коксиком, 2,0 г стронция/т чугуна с железорудными материалами и 2,5 г стронция/т чугуна с флюсующими добавками. Согласно коэффициентам распределения стронция между продуктами доменной плавки, определенными ранее (гл. 4), получим:

- в доменный шлак перейдет стронция, г/т чугуна:

$$2,0 + 2,5 + 35 \cdot 1/3 + 35 \cdot 2/3 \cdot 0,3 = 23,2;$$

- в выбросы попадает:

$$35 \cdot 2/3 \cdot 0,7 = 16,3 \text{ г стронция/т чугуна};$$

- улавливается системами газоочистки 4,5 г стронция/т чугуна. Это количество в составе доменного шлама далее отправляется на аглофабрику, попадает в состав агломерата и в итоге также оказывается в доменном шлаке.

Таким образом, 39,5 г стронция/т чугуна распределяются следующим образом:

- в доменный шлак:  $23,2 + 4,5 = 27,7$  г стронция/т чугуна;
- в возгоны, не улавливаемые газоочистными сооружениями доменного цеха:  $39,5 - 27,7 = 11,8$  г стронция/т чугуна.

Таким образом, часть стронция образует контур циркуляции с колошниковой пылью, агломерационными и доменными шламами. Принимая эту часть постоянной, в дальнейших расчетах ее не учитываем.

**Стронций в сталеплавильном производстве.** Анализ продуктов сталеплавильного производства АО «Северсталь» показал присутствие стронция только в сталеплавильных шлаках: ни в жидкой стали, ни в сталеплавильных шлаках стронций не обнаружен. Источником стронция в сталеплавильных переделах является известь. Таким образом, стронций, попадая в сталеплавильные агрегаты в составе извести в количестве 2,5 г/т чугуна, в таком же количестве выносятся из них в составе шлаков и направляется на хранение в отвалы или ЗШН (т.е. в техногенные грунты на территории предприятия).

**Поведение стронция при углеподготовке (УГФ) и сжигании угля на ТЭЦ.** Из 60 г стронция/т чугуна, поступающих на предприятие в составе угольного концентрата, 35 г/т чугуна попадает в агломерационный и доменный переделы, а остальные 25 г/т частично переходят в шламы углеподготовительных производств (УГФ), а в основном направляются на сжигание на ТЭЦ в составе так называемого промпродукта. Определим параметры движения стронция с продуктами переработки углей.

Ниже приведены данные об образовании шламов в АО «Северсталь» в период с 1986 по 1989 г. [394, 395] (среднегодовое производство чугуна в этот период составило 10,3 млн т), тыс. т/год:

Отделение подготовки угля и коксохимическое производство (УГФ и КХП) . . . . .	380
Доменный цех . . . . .	42,5
Мартеновский цех . . . . .	45,0
Электросталеплавильный цех (ЭСПЦ) . . . . .	20
Кислородно-конвертерный (ККЦ) . . . . .	130

Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ № 1 и № 2) . . . . . 365 (зола, шлак и шлам)  
Остальные производства . . . . . 70,5  
Итого . . . . . 1053

Общее количество не утилизируемых шламов (доменные шламы полностью используются в агломерационном процессе) составляет:

$(1053 - 42,5) : 10,3 = 98,1$  кг шламов/т чугуна;

количество золошлаковых отходов (ЗШО) и шламов УГФ, КХП и ТЭЦ:

$(380 + 365) : 10,3 = 72,3$  кг ЗШО и шламов/т чугуна.

Среднее содержание стронция в ЗШО и шламах УГФ, КХП и ТЭЦ составляет около 58 г/т материала. На 1 т чугуна это количество будет равно  $58 \cdot 0,0723 = 4,42$  г стронция/т чугуна.

Таким образом, подавляющая часть стронция ( $25,0 - 4,2 = 20,8$  г/т чугуна), направляемая на ТЭЦ в качестве промпродукта для сжигания, в итоге попадает в воздушный бассейн металлургического региона, минуя системы газоочистных сооружений (на ТЭЦ АО «Северсталь» в рассматриваемый период такие системы отсутствовали).

**Накопление стронция в золошламонакопителях.** Микроэлементы могут выноситься их ЗШН в составе мельчайшей пыли в результате процессов «перевеивания» и вымываться в водный бассейн металлургического региона. Оценим количество стронция, остающегося в ЗШН. Исследованиями [394, 395] определено содержание стронция в материалах, складированных в ЗШН № 1 и № 2. В зависимости от фракционного состава исследуемых материалов оно приведено в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Содержание стронция в различных фракциях  
промышленных отходов ЗШН № 1 и № 2**

Фракция, мм	Доля фракции в пробе, % масс.	Содержание стронция, г/т
До 0,005	1	374
0,01...0,005	1	106
0,05...0,01	7	86
0,1...0,05	27	30
0,25...0,1	44	23
0,5...0,25	11	26
1...0,5	3	44
2...1	3	55
5...2	3	24

Среднее содержание стронция в материалах ЗШН составляет 35,6 г/т шлама.

Исходя из того что ЗШН № 1 был введен в эксплуатацию в 1972 г., можно определить, какое количество стронция накоплено в ЗШН:

$$178,6 \cdot 10^6 \cdot 0,0981 \cdot 35,6 \cdot 10^{-6} = 623,7 \text{ т стронция,}$$

где 178,6 – количество произведенного на предприятии чугуна за 1975–1995 гг., млн т;

или  $0,0981 \cdot 35,6 = 3,5$  г стронция/т чугуна.

Таким образом, из 4,2 г стронция/т чугуна, поступающих в ЗШН,  $4,2 - 3,5 = 0,7$  г стронция/т чугуна выносятся из сооружения в воздушный и водный бассейны региона.

**Вынос стронция за территорию металлургического региона с подземным потоком подземных вод.** Исследованиями [393–395] определены параметры стока подземных вод Череповецкого района и содержание в них стронция. Пробы отбирались в следующих точках:

Место отбора проб	Содержание стронция, г/м <sup>3</sup>
Левый берег р. Кошта у ЗШН № 2	0,54
ТЭЦ №2	0,60
Прокатные цеха	0,25
Граница ЧСПЗ – прокатные цехи	0,18
ЗШН № 1	0,24
Свалка бытовых отходов на правом берегу р. Кошта	0,23

Принимая содержание стронция в подземном стоке равным 0,45 г/м<sup>3</sup> и интенсивность стока подземных вод равной 1070 м<sup>3</sup>/сут., получим общее количество стронция, выносимого с подземными водами ежегодно в 1990–1995 гг.:

$$1070 \cdot 365 \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} = 0,175 \text{ т/год.}$$

При среднем производстве чугуна на предприятии в этот период 7,65 млн т в год получим количество стронция, выносимого с подземными водами на единицу чугуна:

$$(0,175 \cdot 10^6) : (7,65 \cdot 10^6) = 0,02 \text{ г/т чугуна.}$$

**Вынос стронция за территорию металлургического региона с поверхностным стоком.** По данным [382] поверхностный сток с территории металлургического комбината составляет около 1056 м<sup>3</sup>/сут. При этом содержание стронция в поверхностных водах колеблется в пределах 1,32...5,11 г/м<sup>3</sup>, составляя в среднем 3,2 г/м<sup>3</sup>. Таким образом,

количество стронция, выносимого с поверхностным стоком, составляет:

$$1056 \cdot 365 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} = 1,23 \text{ т/год}$$

или  $(1,23 \cdot 10^6) : (7,65 \cdot 10^6) = 0,16 \text{ г стронция/т чугуна}$ .

**Определение количества стронция, растворенного в грунтовых водах.** Количество стронция, растворенного в грунтовых водах, можно определить следующим образом:

$$50 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 0,25 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6} = 262,5 \text{ т,}$$

- где  $50 \cdot 10^6$  – территория металлургического комбината, м<sup>2</sup>;  
 20 – средняя глубина залегания водонепроницаемого горизонта, м;  
 0,25 – средняя влажность грунтовых пород (до глубины 20 м), доли;  
 $1,05 \cdot 10^{-6}$  – среднее содержание стронция в грунтовых водах, т стронция/м<sup>3</sup>.

$$(262,5 \cdot 10^6) : (227,7 \cdot 10^6) = 1,15 \text{ г стронция/т чугуна.}$$

**Накопление стронция в грунтах металлургического региона.** Мигрирующие химические элементы, прежде всего металлы, отличаются выраженной тенденцией к накоплению или выносу из основных видов почвообразующих пород [393–398]. Результаты исследований по определению содержания стронция в грунтах промышленного региона г. Череповца приведены в табл. 5.3.

Анализ полученных результатов показал, что среднее содержание стронция в техногенных грунтах, занимающих площадь около 28 км<sup>2</sup>, составляет 178 г/т грунта при фоновом содержании около 140 г стронция на 1 т грунта. Средняя мощность техногенных грунтов оценивается в 3,5 м.

Таблица 5.3

**Содержание стронция в грунтах на территории АО «Северсталь»**

Место отбора пробы	Глубина бурения, м	Содержание стронция, г/т		
		в пробе	среднее в пробе	аномальное
Район кислородно-конвертерного цеха	18	171...123	140	До 0,4 м – 171
Район ЧСПЗ <sup>1</sup>	4	117...326	168	До 1,1 м – 300...326



Место отбора пробы	Глубина бурения, м	Содержание стронция, г/т		
		в пробе	среднее в пробе	аномальное
Завод бетонных изделий	3	131...195	158	До 0,6 м – 174...195
Левый берег р. Кошта	21	94...192	150	До 0,6 м – 176...192
Район ЗШН №2	13	88...237	169	До 0,6 м – 197...273
Берег р. Кошта у ЗШН №2	13	133...146	139	Равномерное распределение
ЗШН №1	23	128...247	137	До 0,6 м – 193...247
Сток из ЗШН №1	23	123...192	142	Равномерное распределение
Район АТП <sup>2</sup>	12	137...240	148	До 0,1 м – 240
Район АТП и КХП <sup>3</sup>	6	167...179	174	Равномерное распределение
Шлаковый отвал	8	156...286	160	До 0,1 м – 286
Граница порта и завода бетонных изделий	3	165	145	Равномерное распределение
Порт	4	160	140	То же
Граница прокатного цеха и жилых районов	5	80...350	188	До 2 м – 200...350

<sup>1</sup> ЧСПЗ – Череповецкий сталепрокатный завод.

<sup>2</sup> АТП – азотно-туковое производство;

<sup>3</sup> КХП – коксохимическое производство.

Таким образом, общее количество стронция, перешедшего за время работы комбината в техногенные грунты, составляет:

$$28 \cdot 10^6 \cdot 3,5 \cdot 1,6 \cdot (178 - 140) \cdot 10^{-6} = 5958,9 \text{ т, или } 26,17 \text{ г/т чугуна,}$$

где  $28 \cdot 10^6$  – общая площадь техногенных грунтов на территории металлургического региона;

3,5 – средняя мощность техногенных грунтов, м;

1,6 – средняя плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;

(178 – 140) – разность между содержанием стронция в техногенных грунтах и фоновым содержанием, г/т.

**Аккумуляция стронция растительным покровом.** Аккумуляция микроэлементов растительным покровом оценивается коэффициентом биологического поглощения  $A_x$  (табл. 5.4):

$$A_x = L_x / N_x,$$

где  $L_x$  – содержание элемента в золе растения;

$N_x$  – содержание элемента в горной породе или почве, на которой произрастает растение, кларк концентрации.

Стронций относится к элементам очень интенсивного биологического накопления ( $A_x = 10 \dots 100$ , в среднем для условий севера Европейской части России – 75). Кроме того, стронций обнаруживает тенденцию к накоплению в свежем опаде листовенного леса и лесной подстилке. В озеленении техногенных грунтов северной и средней полосы России во второй половине XX в. наиболее часто использовалась липа мелколистная. Для этой древесной породы характерно интенсивное накопление Sr, Mo, Cu.

Таблица 5.4

Ряды биологического поглощения [385–387]

Эффективность биологического поглощения элемента		Коэффициент <sup>1</sup> биологического поглощения $A_x$				
Ряд	Группа	100n	10n	n	0,n	0,0n – 0,00n
Элементы биологического накопления	Энергичного	P, S, Cl, Br, I				
	Сильного		Ca, Na, K, Mg, Zn, B, Se, Sr			
Элементы биологического захвата	Среднего			Mn, F, Ba, Ni, Cu, Ga, Co, Pb, Sn, As, Mo, Hg, Ag, Ra		
	Слабого и очень слабого				Si, Al, Fe, Ti, Zr, Rb, V, Cr, Li, I, Nb, Be, Cs, Ta, W, Se, Sb, Cd	

<sup>1</sup> n – коэффициент от 1 до 9.

Определим количество стронция, аккумулируемого растительным покровом промышленного района г. Череповец:

$$178 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot (0,35:10) \cdot 5 \cdot 0,25^2 \cdot (3,14:4) \cdot 0,2 \cdot 0,035 \cdot 75 = 4,01 \text{ т стронция,}$$

или 0,18 г стронция на 1 т чугуна,

где  $178 \cdot 10^{-6}$  – содержание стронция в технических грунтах, т/м<sup>3</sup>;  
 $50 \cdot 10^6$  – территория металлургического комбината, м<sup>2</sup>;  
0,35 – территория, занимаемая зелеными насаждениями, доли;  
10 – территория, занимаемая одним деревом, м<sup>2</sup>;  
5 – средняя высота дерева, м;  
0,2 – плотность древесины, т/м<sup>3</sup>;  
0,035 – среднее содержание золы в древесине, доли;  
75 – коэффициент интенсивности биологического поглощения стронция.

Построение схемы элементопотока стронция в численной форме приведено в табл. 5.5.

Таблица 5.5

**Элементопоток стронция для металлургического региона  
г. Череповец за период 1955-1995 гг.**

Статья баланса	Количество стронция	
	т	%
Приход, всего	15 255,9	100
В том числе:		
с угольным концентратом	13 662,0	89,6
с железорудными материалами	455,4	3,0
с флюсами	1 138,5	7,4
Расход:		
продукция (доменный шлак)	6 307,3	41,3
накоплено в техногенных грунтах, всего	7 325,1	48,0
В том числе:		
в ЗИП и шлаковых отвалах	1 366,2	
собственно в грунтах	5 958,9	
Выбросы в водную среду, всего	303,5	2,0
В том числе:		
грунтовые воды	262,5	
поверхностные сточные воды	36,4	
подземные воды	4,6	
Аккумулировано растительным покровом	40,1	0,3
Выбросы в воздушный бассейн за территорию предприятия (по разности)	1 278,9	8,4

В соответствии с изложенной методикой для рассмотренных выше условий металлургического региона г. Череповец были рассчитаны элементопотоки для следующих химических элементов: ванадия, кадмия, кобальта, меди, никеля, свинца, хрома и цинка. В балансовой форме они представлены в табл. 5.6.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) коэффициент извлечения микроэлементов в металлургическую продукцию колеблется в широких пределах от 13,7 % для кадмия до 85,3 % для хрома;

2) количество микроэлемента, остающегося (накапливающегося) в металлургическом регионе в составе техногенных грунтов также колеблется в широких пределах – от 10 % – для хрома, до 72,5 % – для кадмия;

Таблица 5.6

**Элементопотоки V, Cd, Co, Cu, Ni, pb, Cr, и Zn  
для металлургического региона г. Череповец за период 1955–1995 гг.**

Статьи баланса	Элементы							
	Ванадий		Кадмий		Кобальт		Медь	
	т	%	т	%	т	%	т	%
Приход, всего:	46 291	100,0	1161	100,0	23 407	100,0	14 037	100,0
В том числе:								
с угольным концентратом	10 701	23,1	387	33,3	4 280	18,3	3 051	21,7
с железорудными материалами	31 718	68,5	728	62,7	17 259	73,7	6 705	47,8
с флюсами	3 870	8,4	0	0	1 867	8,0	3 187	22,7
Расход:								
продукция	33 722	72,8	159	13,7	13 639	58,3	9 756	69,5
В том числе:								
металлопродукция	31 878		68,3		12 580		9 631	
попутная продукция	1 844		91,1		1 058		125	
накоплено в техногенных грунтах, всего:	11 885	25,75	842	72,5	9 483	40,5	4 062	28,9
В том числе:								
в шлаковых отвалах и ЗПП	2 960		364		1 115		2 573	
в грунтах	8 925		478		8 368		1 489	
Выбросы, всего:	68	0,15	45,5	3,9	22,8	0,1	207,2	1,5
В том числе:								
грунтовые воды	45		45		22		136	
поверхностные сточные воды	22		0		0		63	
подземные воды	0		0		0		6	
Аккумулировано растительным покровом	0	0	11	1,0	11	0,005	11	0,1
Выбросы в атмосферу (по разности)	614	1,3	102	8,8	250	1,05	0	0

Статьи баланса	Элементы							
	Никель		Свинец		Хром		Цинк	
	т	%	т	%	т	%	т	%
Приход, всего:	79 717	100,0	30 147	100,0	222 690	100,0	82 655	100,0
В том числе:								
с угольным концентратом	14 140	17,7	8197	27,2	15 028	6,7	3 643	4,4
с железорудными материалами	62 526	78,4	21 403	71,0	199 692	89,7	68 082	82,4
с флюсами	1 411,7	1,8	0	0	7 969,5	3,6	5 237,1	6,3
Расход:								
продукция	55 490	69,6	7 832	26,0	189 901	85,3	26 185	31,7
В том числе:								
металлопродукция	55 353		7 104		185 530		7 969	
попутная продукция	136		728		4371		1 821	
накоплено в техногенных грунтах, всего:	24 188	30,35	16 781	55,7	22 337	10,0	52 462	63,5
В том числе:								
в шлаковых отвалах и ЗШН	3 574		3 825		5 829		32 105	
в грунтах	20 613		12 956		16 508		20 356	
Выбросы, всего:	36	0,05	216	0,7	9 369	4,2	592	0,7
В том числе:								
грунтовые воды	34		102		11		409	
поверхностные	2		68		3 574		113	
сточные воды	0		45		5 783		68	
подземные воды								
Аккумулировано растительным покровом	2	—	2	—	0	0	409	0,5
Выбросы в атмосферу (по разности)	0	0	3 492	11,6	1 081	0,5	1 639	2,0

3) доля микроэлементов, рассеиваемых в окружающую среду через водный и воздушный бассейны, невелика и составляет для большинства исследованных металлов 1,6...3,2 %. Исключение составля-

ют хром, активно мигрирующий в водной среде (4,2 % выбросов в водную среду), кадмий и свинец (соответственно 8,8 и 11,6 % – распространение за пределы региона с выбросами в атмосферу).

Таким образом, можно считать установленным фактом, что микроэлементы, поступающие в производственный цикл предприятий черной металлургии в ходе соответствующих технологических операций, преимущественно попадают в состав готовой продукции или накапливаются на территории металлургического региона. Во втором случае они локализуются в техногенных грунтах, т.е. в основном в золошлаконакопителях, шлаковых отвалах, на свалках строительного мусора, а также в близлежащих грунтах, причем в основном на небольшой глубине – до 3,5...4 м. В результате на территории промышленного предприятия непосредственно в ходе его функционирования формируется техногенное месторождение. В рассматриваемом случае это комплексное месторождение цветных и редких металлов, количественную основу которого составляют цинк, никель, хром и свинец. Помимо детально рассмотренных микроэлементов в состав месторождения в значимых количествах входят также: лантаноиды, молибден, марганец, мышьяк, ниобий, литий, рубидий и некоторые другие элементы. Общая мощность месторождения может быть оценена в 200...250 тыс. т цветных и редких металлов.

Проведенные расчеты показывают, что за время существования интегрированного металлургического предприятия на его собственной и прилегающей к нему территории сформировалось техногенное образование, сравнимое по мощности с месторождением полиметаллического сырья. Оно может быть названо «техногенным месторождением» [8]. Череповецкое техногенное месторождение содержит более 300 тыс. т цветных и редких металлов, около 18 тыс. т мышьяка и до 3,5 тыс. т фтора. Очевидно, что на территории крупных металлургических, химических, машиностроительных предприятий, существующих более 50–60 лет, могут быть сформированы техногенные месторождения рудных и нерудных материалов.

## **Глава 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА БАЗЕ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ**

### **6.1. Техногенные материалы – перспективное сырье металлургии ближайшего будущего**

Превращение концепции устойчивого развития в главный приоритет развития мировой цивилизации выдвигает жесткие требования к освоению новых природных месторождений. В связи с критическим состоянием окружающей среды необходимо учитывать возможность существенного сокращения геологоразведочных работ на еще нетронутых территориях планеты. Поэтому с высокой степенью уверенности можно утверждать, что уже во второй половине XXI столетия основной сырьевой базой металлургии, как цветной, так и черной, станут месторождения полиметаллических руд и техногенных материалов [8, 55, 56, 136, 332–335, 399].

Их освоение требует разработки принципиально новых металлургических технологий, позволяющих осуществить глубокое селективное разделение металлов с высокими коэффициентами их извлечения из исходных материалов. Внедряемые технологии должны обеспечивать экологическую чистоту реализуемых технических решений при прогнозируемом и контролируемом составе отходов и попутных материалов [8, 44, 47, 48, 55, 56, 400].

В МИСиС проводились целенаправленные исследования по определению полного химического состава всех видов материалов, используемых и получаемых в процессах черной металлургии: руд, концентратов их обогащения, агломератов, окатышей, флюсов, углей и коксов, шлаков, шламов, пылей, чугунов и сталей (см. гл. 3 и 4). Анализ результатов показал, что на тонну готовой продукции предприятий черной металлургии в производственный цикл поступает от 4 до 10 кг примесных микроэлементов. Следует ожидать, что с освоением месторождений полиметаллических руд это количество возрастет в десятки раз [401].

Особую роль в черной металлургии играет твердое топливо. Коксующиеся угли становятся все более дефицитным и дорогостоящим сырьем. В связи с этим расширяется спектр углей, используемых при

производстве кокса, но не обладающих спекающими свойствами. Быстро растет количество углей, применяемых в качестве пылеугольного топлива и загружаемых в доменные печи через колошник. В ближайшем будущем ожидается развитие и распространение в производстве технологий получения формованного кокса. Во всех упомянутых случаях применяются угли с повышенным (по сравнению с классической технологией коксования) содержанием примесей.

Полный химический анализ коксов, используемых металлургическими предприятиями европейской части России и Урала показал, что они содержат до 7 кг/т примесных микроэлементов. Таким образом, уже сейчас при производстве чугунов специального качества металлургические угли рассматриваются как самостоятельный металлосодержащий компонент агломерационной и доменной шихты.

Еще одним источником цветных и редких металлов в черной металлургии стали отходы пластмасс. Технологии их утилизации внедрены в доменных печах в Германии и Японии [402–404].

Исследования потоков более чем 30 характерных для черной металлургии микроэлементов – металлов позволили оценить возможность их накопления на территории металлургических регионов в грунтах, отвалах, золошламонакопителях и других техногенных образованиях. Детальные исследования, проведенные для условий АО «Северсталь», показали, что мощность техногенного месторождения комплексных техногенных материалов в районе г. Череповец может достигать 300 тыс. т (см. гл. 5).

В связи с огромными масштабами производства черных металлов (по сравнению с уровнем получения других металлов) многие цветные, редкие, рассеянные металлы, присутствующие в шихтовых материалах черной металлургии в концентрациях лишь 10...50 г/т материала, поступают в доменные печи некоторых металлургических комбинатов в количествах, сопоставимых с уровнем их общемирового потребления. К таким металлам относятся, например: галлий, германий, индий, бериллий, многие редкоземельные металлы. В результате анализа большого статистического материала установлено и подтверждено расчетами с использованием новейших методов термодинамики, что поведение микроэлемента в металлургических агрегатах зависит от формы его присутствия в шихтовых материалах и способа ввода последних в агрегат (гл. 4).



Все продукты доменной плавки: чугун, шлак, шлам, возгоны могут рассматриваться как сырье для извлечения редких, рассеянных и цветных металлов. Таким образом, можно предполагать, что одной из наиболее перспективных металлургических технологий XXI в. будет технология совместной комплексной переработки полиметаллических руд, техногенных материалов и углей на базе агломерационного и доменного производства с получением в качестве основных продуктов процесса сырьевых материалов для цветной металлургии. Принципиальная схема такой технологии приведена на рис. 6.1 [322].

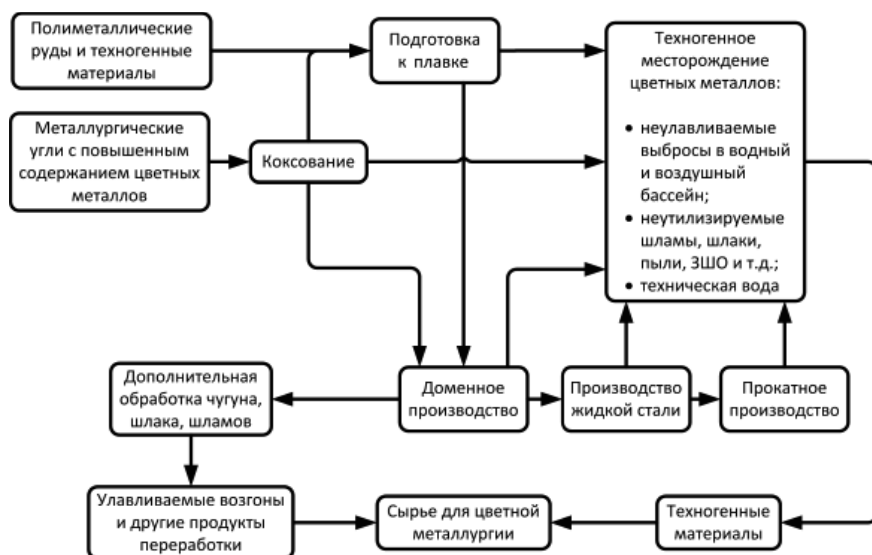


Рис. 6.1. Принципиальная схема переработки комплексного сырья на базе агломерационного и доменного производства.

Включение в глобальный производственный цикл переработки промышленных отходов решает одновременно две актуальные мировые проблемы – проблему ресурсов и проблему сохранности окружающей среды. Наиболее предпочтительным способом решения проблемы утилизации промышленных отходов является производственный рециклинг. Однако практика мирового хозяйства показала, что более 70 % всех образующихся техногенных отходов не могут быть переработаны предприятиями – изготовителями отходов. Это относится прежде всего к предпри-

ятиям энергетики, транспорта, оборонным отраслям промышленности, машиностроению и др. Это также целиком относится к отложенным отходам. Перерабатывать подобные материалы предстоит отраслям, не производившим эти отходы. Таким образом, назрела проблема концепции «глобального» (межотраслевого и межрегионального, а в будущем и международного) рециклинга материалов. Важнейшую роль в этом процессе могут сыграть предприятия черной металлургии. Некоторые металлургические агрегаты обладают уникальными возможностями для переработки практически любых видов отходов и, что не менее важно, достаточной производительностью. Прежде всего, к таким агрегатам относятся шахтные печи, например доменные и ваграночные, используемые соответственно для извлечения железа из рудного сырья и выплавки литейного чугуна. В упомянутых агрегатах могут быть использованы как кусковые, так и мелкодисперсные твердые и влажные техногенные материалы, жидкие и газообразные токсичные отходы (в том числе содержащие углерод и водород, галогенсодержащие, взрывоопасные, включающие свинец, стронций, мышьяк и др.). При этом:

- полностью исключаются выбросы токсичных соединений на поверхность земли (поскольку доменные и ваграночные шлаки и шламы являются ценным сырьем для строительной индустрии);
- минимизируются выбросы в водный бассейн (так как в черной металлургии вода используется для охлаждения агрегатов и лишь незначительно для влажной очистки от неуловленной пыли и смыва мелкодисперсных отходов);
- минимизируются в атмосферу (в доменном процессе невозможно, например, образование таких токсичных соединений как диоксины и фураны, оксидов азота, любых сложных углеводородных соединений, и т.п.);
- доменный газ является ценным энергетическим сырьем и полностью утилизируется.

Вышеперечисленные обстоятельства не могли не остаться незамеченными специалистами, и в последнее десятилетие XX в. были достигнуты значительные успехи в разработке технологий и совершенствовании технических возможностей доменной и ваграночной плавки с использованием самых разнообразных техногенных материалов. Схема применения техногенных материалов в шахтных печах приведена на рис. 6.2.



Рис. 6.2. Принципиальная схема применения техногенных материалов в шахтных печах

## 6.2. Доменная печь – агрегат XXI в.

Доменная плавка как процесс и доменная печь как агрегат сформировались в эпоху Средневековья и до сих пор не изменили своей сущности. Доменный процесс отличаются следующие особенности:

- непрерывный характер;
- противоточное движение шихты и газа;
- наличие в одном агрегате зон твердого, пластичного и жидкого состояния;
- значительный диапазон температур (от 20 до 3500 °С);
- значительный диапазон давлений (от 10 до 500 кПа);
- широкий спектр объемов агрегата и, следовательно, единичных мощностей (до 12 тыс. т чугуна в сутки);
- высокая продолжительность кампании печи (10–20 лет) и, соответственно, проплавление большого количества чугуна за кампанию (20...40 млн т);
- минимальное количество вредных выбросов в окружающую среду.

Противоточный принцип процесса, осуществляемого в закрытом агрегате шахтного типа, обеспечивает максимальное использование энергии в процессе и простоту в обращении с продуктами плавки. Наличие углеродистой насадки обеспечивает уникальную, характерную только для доменной печи особенность совмещения в одном агрегате трех фазовых состояний шихты (твердого, жидкого и размягченного), находящейся в противотоке с газом [321].

Описанная совокупность особенностей может показаться технически нереализуемой, однако в действительности доменная плавка существует уже около семи столетий. Вместе с тем, ход плавки в современных агрегатах характеризуется высокой устойчивостью при долговременно-непрерывном режиме работы. Это достигнуто в результате длительного эволюционного развития процесса с закреплением преимуществ, присущих шахтному противотоку. Результаты эволюции выразились в формировании уникальных свойств доменной печи, обеспечивающих устойчивое протекание процессов при высокой их эффективности. Рассмотрим некоторые из них.

Температурное и концентрационное поля современной доменной печи обладают замечательным свойством гашения колебаний, вызванных внешними воздействиями, что обеспечивает их устойчивость. Аналогичным свойством обладает коксовая насадка применительно к агрегатному состоянию материалов и их нагреву. Так, в случае уменьшения температуры плавления материалов вследствие повышения содержания в них монооксида железа («недовосстановленный» материал) или уменьшения основности шлака высота коксовой насадки увеличивается. Это способствует увеличению времени пребывания расплава в насадке и дополнительному его нагреву, который компенсирует «недогрев» материалов при поступлении в насадку. Хорошо известно, что правильный подбор составляющих доменной шихты способствует формированию шлаков, свойства которых мало изменяются при колебаниях их химического состава. Это также является компонентом устойчивости хода плавки. Совокупность указанных свойств, направленных на противодействие доменной печи негативным воздействиям, можно квалифицировать как своеобразный механизм саморегулирования.

Хотя основным назначением доменной печи является получение первичного металла, технология процесса и конструкция в равной мере адаптированы к получению полиметаллических лигатур, шлаковых расплавов и горючих газов, которые пока еще квалифицируются преимущественно как побочная продукция. Однако при иной постановке задач побочным продуктом может стать чугун. Уже сегодня значительная доля чугуна производится из комплексных полиметаллических руд, содержащих титан, хром, ванадий, медь, мышьяк, редкоземельные металлы. Доля этих руд будет в дальнейшем только возрастать. Количество микропримесей в чугуне до сих пор практически не контролируется. Перевод плавки комплексных руд в русло управляемого процесса потребует иной постановки вопроса. Прежде всего, требуется переориентация доменного процесса на максимально полное извлечение основных примесей путем получения полиметаллических лигатур или перевода примесных элементов в шлак с последующей его переработкой [321, 332–335, 405].

В комплексе металлургического предприятия доменная печь является также энергетическим агрегатом, снабжающим другие переделы доменным газом. Эта функция иногда может доминировать даже в су-

ствующих условиях, а в перспективе может стать не менее важной, чем производство чугуна. При этом следует помнить о том, что доменная печь – один из наиболее совершенных газификаторов кускового топлива. Она может быть настроена на получение горячих восстановительных газов для дувания в другие печи, но может работать в режиме генерации отопительного газа для энергетических нужд.

Таким образом, доменная печь, являясь многоцелевым агрегатом, легко может быть перестроена на технологию, в которой доминирует одна из основных функций доменного процесса: производство первичного металла, получение шлака заданного состава, выработка газа требуемых параметров путем газификации твердого топлива (а также отходов энергетики, ТБО и т.п.). При выполнении каждой из этих функций как основной частично (в зависимости от жесткости постановки задачи) выполняются и остальные, но во всех случаях может решаться задача утилизации отходов, особенно бытовых.

Металлургия является наиболее универсальной отраслью народного хозяйства, способной утилизировать, как техногенные, так и бытовые отходы. Как известно, отходы представляют собой главным образом оксиды и их соединения. Поэтому чаще всего утилизация как промышленных, так и твердых бытовых отходов должна проводиться в виде восстановительных операций с получением конечного продукта, например металла. В связи с этим агломерационное и доменное производства должны выполнять основную роль при переработке, кроме собственно металлургических, отходов энергетики, машиностроения, химии и др., а также ТБО. Большое значение при этом приобретают доменные печи небольшого объема, имеющие возможность более гибкого реагирования на запросы общества [323, 324, 406, 407].

### **6.3. Печи малого объема – будущее доменного производства**

*Новая структура черной металлургии.* В XX столетии развитие технологии доменной плавки происходило в основном по пути сооружения все более крупных агрегатов. Устаревшие или небольшие доменные печи заменяли печами большего объема. Классическая технология производства чугуна по-прежнему остается основой для получения всех марок стального проката и производства всех форм металлопродукции. В настоящее время около 70 % всего мирового

производства стали основывается на первичном металле, полученном по классической технологии. По крайней мере 95 % чугуна получают в доменных печах, что подтверждает определяющую роль технологии доменной плавки в черной металлургии.

В этих условиях следует заново оценить перспективность доменных печей большого объема. СССР долгое время был лидером в строительстве крупных доменных печей. Во второй половине XX столетия одна за другой, как правило, впервые в мире проектировались и вводились в действие доменные печи полезным объемом от 1386 до 5580 м<sup>3</sup>. Работа этих агрегатов отличалась прежде всего ростом производительности труда, что и являлось одним из основных экономических аргументов в пользу такого увеличения объема печи. Глубокий анализ этой проблемы проводился фрагментарно, что было в основном связано с «идеологизацией» вопроса и стремлением постоянно подтверждать преимущества существовавшей в то время политической системы. Между тем накапливалось все больше фактов негативных последствий роста объема доменных печей. Их можно в основном свести к следующему.

1. Мощные доменные печи успешно функционируют лишь при плавке шихты повышенного качества, поэтому при переходе к работе на печах большого объема растут расходы на процессы подготовки шихтовых материалов.

2. Ввиду известных ограничений по высоте доменных печей увеличение их объема осуществлялось в основном за счет роста горизонтальных размеров агрегатов. В этих условиях возникали затруднения с равномерностью протекания основных процессов по сечению печей, что в итоге приводило к существенным отличиям в составе чугуна, выпускаемого из различных леток.

3. Рост горизонтальных размеров привел к снижению доли протяженности окислительных зон по отношению к радиусу горна, что вызвало затруднения, связанные с функционированием коксовой насадки.

4. Трудности возникли и с общей организацией производства на предприятии полного цикла. Случайные и аварийные остановки крупной доменной печи могли парализовать работу энергохозяйства и потребителей чугуна, так как практически исключали возможности маневра, имевшие место на предприятиях с доменными печами

меньшего объема. Наряду с этим огромные массы шихты, перерабатываемые мощными доменными печами, и большие количества выплавленного чугуна вызывали напряженность в функционировании железнодорожного транспорта предприятия.

5. Рост приоритета экологических ограничений означал по существу конец эпохи доминирования крупных металлургических агрегатов. Известно, что основным недостатком металлургической отрасли с точки зрения давления на окружающую среду является высокая степень ее концентрации. При общем невысоком по сравнению с другими отраслями индустрии количестве выбросов черная металлургия характеризуется высокой их концентрацией на единицу площади металлургического региона. Исходя из состояния природной среды и здоровья человека, безусловно, целесообразно рассредоточение производств, иначе говоря, функционирование пяти доменных печей объемом  $1000 \text{ м}^3$ , удаленных друг от друга, предпочтительнее работы одной доменной печи объемом  $5000 \text{ м}^3$ .

6. Формирование мировых рынков сырья и металлов заставляет по-иному взглянуть на структуру металлургических предприятий. Для многих небольших государств, а также отдельных регионов крупных стран требуется производить небольшое количество первичного металла и поэтому крупные агрегаты просто не нужны.

7. В большинстве случаев относительно небольшие доменные печи имеют лучшие показатели по расходу энергоносителя и более маневренны в номенклатуре производимой продукции. Наконец, переработка техногенных и бытовых отходов, все в большем объеме охватывающая агрегаты металлургического комплекса, применима главным образом к небольшим агрегатам.

На решение проблемы размера доменных печей сильно влияет также ситуация с увеличением количества мини-заводов и перспективы организации предприятий микрометаллургии. На мини-заводах сталь, как правило, получают в электродуговых печах переменного или постоянного тока, на шихте, состоящей из лома и железа прямого восстановления (губчатого железа или металлизированных окатышей). Исторически успех выплавки стали в электропечах был в значительной степени связан с выплавкой стали сравнительно низкого качества (простых марок) для длинномерной продукции. В наши дни в связи с освоением современной технологии литья тонких слябов мини-заводы активно переходят на производство продукции из высококачественной стали.



Как известно, в электросталеплавильном производстве обычными источниками железа являются лом, губчатое железо (окатыши) и горячебрикетированное губчатое железо. Для производства чистой и высококачественной стали для горячекатаных полос требуется такой же высококачественный и дорогостоящий лом. Вместе с тем жидкий передельный чугун обладает существенными преимуществами как перед высококачественным ломом, так и перед его вышеупомянутыми заменителями. Отсутствие в чугуне нежелательных примесных микроэлементов, таких как медь, олово, хром и никель, гарантирует постоянное и высокое качество производимой металлопродукции.

Другими преимуществами жидкого передельного чугуна по сравнению с ломом и твердыми носителями железосодержащими материалами являются его высокое теплосодержание и «химическое тепло» углерода и кремния, которое составляет около 60 % от физического тепла жидкого чугуна. Таким образом, применение чугуна способствует уменьшению расхода электроэнергии и обеспечивает существенное снижение затрат в сталеплавильном производстве.

По данным [408] при заливке 40 % передельного чугуна производительность электропечи может быть повышена на 30 %, а расход энергии одновременно снижен на 36 %. Соответственно уменьшается время между выпусками и значительно сокращается расход дорогостоящих электродов.

***Современные концепции производства чугуна.*** В 90-х годах XX в. потребность в дешевом жидком передельном и твердом чушковом чугуне, выплавляемом в сравнительно небольших количествах для многочисленных сталеплавильных мини-заводов, стимулировала тенденцию совершенствования технологии выплавки чугуна в шахтных печах небольшого объема. На тенденцию повлияли также и местные условия, прежде всего доступность лома и цена на него.

Спрос на сравнительно небольшие количества жидкого передельного чугуна стимулировал разработку различных процессов восстановительной плавки. Традиционный доменный процесс довольно быстро приспособился к этому спросу, что выразилось в разработке конкурентоспособных агрегатов. Согласно сформировавшейся в последние годы XX в. традиции [419–412] доменные печи малого объема, специально разрабатываемые для обеспечения потребности мини-заводов, подразделяются следующим образом (табл. 6.1). Наиболее популярные на сегодняшний день объемы ДП – 135, 175, 215, 300 и

350 м<sup>3</sup>, что соответствует производительности в диапазоне от 100 до 250 т/год чугуна.

Таблица 6.1

**Международная классификация доменных печей малого объема**

Вид агрегата и международное сокращенное обозначение	Полезный объем, м <sup>3</sup>	Производительность, т/сут
Компактная ДП (CBF)	500...1500	1000...4000
Малая, или мини-ДП, МДП (MBF)	100...500	300...1000
МикроДП	до 100	менее 300

Технология плавки в вагранках также рассматривается как конкурентоспособная. Современные вагранки с горячим дутьем работают с производительностью до 100 т/ч (т.е. до 2500 т/сут чугуна). Кроме того, проведено много исследовательских работ по новой технологии плавки в вагранках с целью применения дутья, обогащенного кислородом, и получения передельного чугуна из самых разнообразных отходов черной металлургии, в результате чего возникли такие процессы, как OxiCup, MR-OCF, KSK, Star (см. 6.5):

- OxiCup, или «кислородная вагранка», работает на дутье, обогащенном кислородом или на кислородном дутье;
- MR-OCF (Multirole-oxygen Cupola Furnace) и KSK (Kreislaufgas-Sauersoff-Kupolofen) представляют собой вагранки с системой рециркуляции газов для наиболее полной утилизации пылеватых фракций шихты, вдуваемых через фурмы;
- Star – вагранка с двумя уровнями фурм для вдувания сталеплавильных, прокатных и травильных пылей и шламов в потоке горячего дутья.

На конференции в Атланте (США) в ноябре 1999 г. «Мини-заводы и заводы с полным металлургическим циклом в новом тысячелетии» особо отмечалось, что в современных условиях конкурентоспособность предприятий черной металлургии будет определяться гибкостью как сырьевых условий, так и номенклатуры продукции. Это потребует наличия в составе и мини-заводов, и крупных комбинатов не менее пяти шахтных печей различной мощности. В частности, обосновывалась целесообразность перехода к структуре цехов по производству первичного металла, включающих не менее двух CBF или MBF и не менее двух вагранок различной производительности. Особо отмечалось, что на металлургических заводах с полным циклом ком-

пактная доменная печь будет служить гибким и экономичным дополнением к уже существующим агрегатам [411–415].

Таким образом, одной из наиболее ярко проявившихся тенденций в производстве первичного металла является развитие технологии выплавки чугуна в доменных печах малого объема и в вагранках. Многие специалисты считают эту тенденцию основополагающей на ближайшие 50 лет [411–425].

**Практический опыт применения MBF.** Наиболее активно шахтные печи малого объема нового поколения внедряются в Бразилии, Индии, Индонезии и Китае. В табл. 6.2 приведен перечень доменных печей с полезным объемом от 100 до 500 м<sup>3</sup>. Необходимо отметить, что регистрация малых металлургических агрегатов осуществляется не во всех странах мира, поэтому приведенные данные являются неполными и требуют уточнения. Среди упомянутых более 400 печей большинство представляют собой традиционные небольшие доменные печи. В отличие от них MBF нельзя считать просто миниатюрным вариантом обычной доменной печи, поскольку они характеризуются существенно более низкими капиталовложениями и меньшими эксплуатационными расходами, что позволяет выплавлять в них конкурентоспособный товарный чугун [422, 423].

Таблица 6.2

**Зарубежные малые доменные печи объемом менее 500 м<sup>3</sup>**

Страны	Количество печей	Примечания
Китай	Более 250	Доля выплавки чугуна объемом менее 500 м <sup>3</sup> в общем объеме производства превышает 20 %. Сегодня в Китае запрещено строить доменные печи объемом менее 300 м <sup>3</sup>
Бразилия	160	136 MBF производят товарный чушковый чугун, 24 MBF работают на заводах с полным циклом (в том числе 5 печей фирмы SMS Demag)
Индия	21	Все MBF специальной конструкции введены в эксплуатацию после 1990 г. (в том числе печи фирм SMS Demag и TATA-Korf)
Индонезия	10	—
Многие страны	До 5	Аргентина, Босния, Венгрия, Вьетнам, Парагвай, Польша, Перу, Тунис, Турция

Лидером в разработке конструкций MBF и CBF нового поколения считается фирма SMS Demag, по проектам которой построены многие доменные печи в Бразилии, Индии и Индонезии. Эти печи производят и товарный чугун на коммерческих предприятиях неполного цикла, и жидкий передельный чугун для мини-заводов с полным циклом на основе кислородных конвертеров или дуговых сталеплавильных печей [415–420, 426–428].

Важнейшим преимуществом MBF является универсальность сырьевых условий работы (табл. 6.3). Они могут использовать кокс со сниженными показателями прочности, что для обычных доменных печей неприемлемо. MBF могут работать на шихте крупностью 8...15 мм, как это имеет место, например, на печах завода Midwest в Индии, где после грохочения весь кокс крупнее 8 мм и отсеvy рудных материалов утилизируются в печах MBF. Содержание золы в коксе колеблется в пределах 12...18 % и достигает максимума (21 %) на том же заводе Midwest в Индии.

В качестве топлива для печей MBF используют также и древесный уголь. В частности, в Бразилии эти печи нормально работают исключительно на нем. Крупность древесного угля составляет 12...120 мм, а содержание золы 2...4 % масс. [413–422].

Наиболее ярким примером гибкости работы MBF служат эксплуатационные показатели доменной печи № 2 завода в Белу-Оризонте. Эта печь успешно работала полностью на древесном угле крупностью 10...25 мм, на китайском коксе (15 % масс. золы при крупности 15...75 мм), а также на различных комбинациях древесного угля и кокса. В железорудной части шихты с одинаковым успехом применялись как по отдельности, так и в виде смесей: сырая кусковая руда крупностью 10...30 мм, мелкокусковая гематитовая руда крупностью 6...12 мм, а также окатыши крупностью 6...16 мм [424].

**Компактная доменная печь.** Компактные доменные печи (CBF – Compact Blast Furnace) предназначены специально для потребностей мини-заводов. При выборе концепции агрегата среднего размера для производства передельного чугуна на первый план были выдвинуты соображения гибкости работы и сокращения издержек [409, 410].

Таблица 6.3

## Показатели работы некоторых печей MBF

Показатель	Бразилия			Индия				
	MSA №2, Белу-Оризонте	Gerdau №1, Дивинополис	Sidersul №1, Рибас ду Риу Парду	Sesa Goa №1, Гоа	Midwest №1, Шрикакулам	Kirlos Kar №2, Хоспет	Usha Marti №1, Джамсхедпур	Kalyani №1, Хоспет
Полезный объем, м <sup>3</sup>	250	118	136	175	215	250	215	250
Выплавляемый чугун	передельный	передельный	литейный	литейный	литейный	литейный	передельный	передельный
Ввод в эксплуатацию, год	1986	1992	1990	1992	1993	1995	1994	1998
Производительность, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	2,83	2,20	2,28	1,60	1,21	1,82	2,26	2,10
Твердое топливо: вид	древесный уголь, кокс	древесный уголь, кокс	древесный уголь, кокс	кокс	кокс	кокс	кокс	кокс
Расход, кг/т чугуна	640	630	640	600	700	640	590	620
Крупность, мм	10...120	12...120	12...120	20...60	15...25	15...60	15...60	25...60
Зольность, % масс.	2...15	3...15	4...15	12	21	15	13	12
Железорудные материалы (вид)	кусовая руда, металлолом, окатыши	кусовая руда, металлолом, окатыши	кусовая руда, окатыши	кусовая руда	кусовая руда	кусовая руда	кусовая руда	кусовая руда
Крупность, мм	6...32	6...32	9...25	10...30	10...30	10...30	8...30	6...30
Содержание Fe, % масс.	66	65	66	65	64	65	65	65
Температура дутья, °С	800	750	700	800	750	780	760	750

Основные характеристики печи CBF, направленные на снижение капиталовложений до минимума:

- отсутствие основной башенной конструкции, типичной для обычных печей;
- оснащение по всей высоте холодильниками из меди и чугуна с шаровидным графитом в сочетании с системой оборотного водяного охлаждения;
- вертикальный конвейер подачи шихты;
- компактные литейный двор и воздухонагреватели;
- высокая степень автоматизации систем управления.

Печь CBF конструкции SMS DEMAG имеет диаметр горна 8 м и рассчитана на производство 1 млн т чугуна в год. Печи CBF оснащаются конусными засыпными аппаратами и подвижными плитами колошника. Конструкция литейного двора действительно является компактной, поскольку предусматривается работа печей с одной чугунной леткой. При этом печь оснащается сменным выпускным желобом. Качающийся желоб может эксплуатироваться с использованием гидравлического, пневматического или электрического привода. Чугунные желоба закрываются крышками, обеспечивающими требуемое обеспыливание литейного двора. Компактная бункерная эстакада включает бункерную емкость, рассчитанную на работу доменной печи в течение 15 ч. CBF оснащается двумя воздухонагревателями регенеративного типа с внутренними камерами сгорания. Все оборудование комплекса CBF располагается в пределах прямоугольного участка размером приблизительно 115×145 м. При этом обеспечивается грануляция шлака, размещение системы для вдувания ПУТ, мазута или других нефтепродуктов, а также установка разливы чугуна.

**Интегрирование МДП в мини-заводы.** Комплекс, состоящий из нескольких МДП, способен обеспечить дешевый и надежный источник производства чугуна для ДСП. Такое использование МДП в последние годы становится все более актуальным в развивающихся странах. Существует несколько причин, по которым МДП является важной составляющей мини-заводов. Продукция МДП, использующей природное сырье, является высококачественной и свободной от загрязняющих примесных элементов. По сравнению с традиционными доменными печами, низкие капитальные затраты на возведение МДП, их приспособляемость под конкретные нужды и использова-

ние широкого диапазона шихтовых материалов обеспечивают низкую производственную себестоимость даже для стран Азии, импортирующих железную руду, кокс, металлолом и энергоносители.

Во многих развивающихся странах (прежде всего, в Бразилии) сегодня в завалке ДСП используется до 40 % жидкого чугуна, что является технически и экономически выгодным. В табл. 6.4 представлены различные пропорции чугуна в завалке 85-т ДСП (по данным компании Siderurgica, Бразилия).

Таблица 6.4

Содержание чугуна в завалке, %	Количество вдуваемого кислорода м <sup>3</sup> /т	Снижение потребления энергии, кВт·ч/т стали
20	20	72
25	24	86
30	27	97
35	32	115
40	36	130
45	39	140
50	42	151

В Джамшедпуре (Индия) компания Usha-Martin применяет технологическую схему МДП-ДСП уже более семи лет, что позволяет увеличить производительность и снизить себестоимость стали. МДП Usha-Martin, работает на 100 % кусковой руды и имеет следующие параметры: производительность: 2 т/(м<sup>3</sup>·сут), расход кокса: 600...615 кг/т чугуна. Излишки колошникового газа используются для производства 3 МВт электроэнергии. Экономия на производственных расходах и увеличение производительности обеспечивают окупаемость вложений в технологическую схему МДП-ДСП в течение менее двух лет. Ниже представлены основные параметры работы ДСП мощностью 30 т компании Usha-Martin.

Традиционная завалка	Использование чугуна МДП
Чугун в завалке, % . . . . .	50
Губчатое железо, %. . . . .	15
Лом, % . . . . .	30
Кислород, м <sup>3</sup> /т. . . . .	30
Электроэнергия, кВт·ч . . . . .	275
Время между выпусками, мин . . . . .	80
Количество завалок в день. . . . .	17
Производительность, т/мес. . . . .	14 000

Результаты специальных исследований, выполненных специалистами компании Paul Wurth показали, что оптимальная доля чугуна в шихте ДСП находится в диапазоне 25...50 %. Типичная экономия энергии при этом не составляет 3,1...3,6 кВт·ч/% чугуна, но может достигать и 4,8 кВт·ч/% чугуна [422, 426].

Использование больших количеств горячего чугуна в ДСП позволяет снизить уровень потребляемой энергии до 200 кВт/т стали. Однако повышение доли чугуна выше 50 % может привести к увеличению времени от выпуска до выпуска из-за увеличения длительности процессов окисления [426].

По данным [429] в настоящее время с использованием МДП работают мини-заводы: Shiheng Special Steel (30 %), JYXS Xing Cheng Steel Works (30 %), Arcelor Mittal, Brazil (33 % Чугуна, 60 % лома + + добавки), Hospet Steel (30 %), Siscol India (34 %), Xining SSG (30 %), Shaoguan Iron and Steel (70 %), Wuzi Tristar I&S (70 %), JiNan I&S (30 %), E'cheng I&S (30 %), Steel Dynamics, INC USA (40 %), Severstal Wheeling (25...70 %).

Лидерами в развитии технологической схемы МДП-ДСП являются Китай, Индия, Бразилия. В Индии три доменные печи, классифицируемые как МДП, с рабочим объемом в 37,19 м<sup>3</sup> и 61,21 м<sup>3</sup>, построенные по немецкому проекту, действовали на заводе Kalinga Iron Woks последние 40 лет. Сегодня лидером по строительству МДП в Индии является совместное предприятие индийской компании TATA Steel и немецкой Korf. Первая МДП TATA-Korf с объемом 175 м<sup>3</sup> была запущена в 1992 г. в Гоа. Сегодня компания TATA-Korf предлагает МДП объемом от 175 до 350 м<sup>3</sup> производительностью от 75 до 200 т/год литейного чугуна при использовании 100 % кусковой руды и около 100 т/год передельного чугуна при использовании агломерата. Из-за простоты дизайна и привлекательных технико-экономических показателей МДП, построенные в Индии объединенной компанией TATA-Korf, стали популярными. С 1993 по 2000 г. было построено девять мини-доменных печей проектной мощностью 8·10<sup>5</sup> литейного чугуна и 10<sup>5</sup> т/год передельного. Такие печи в составе интегрированных мини-заводов разбросаны по всей стране и часто находятся далеко от мест добычи железной руды и портов.

**Современная доменная плавка на древесном угле.** Крупнейшим мировым экспортером товарного чугуна является Бразилия [430].



В Бразилии работают 67 производителей товарного чугуна, в распоряжении которых находятся 123 доменные печи (табл. 6.5). Это небольшие доменные печи с объемом производства от 1,5 до 12 тыс. т чугуна в месяц.

Бразилия является единственной страной в мире, применяющей для производства коммерческого чушкового чугуна доменные печи, работающие на древесном угле. Древесный уголь получают из отходов лесопильных заводов и биомассы лесонасаждений эвкалиптов.

Таблица 6.5

**Характеристика бразильских фирм-производителей чугуна**

Количество доменных печей у одной фирмы	Количество фирм, имеющих данное количество печей	Суммарный месячный объем производства чугуна этими фирмами, т	Доля данных фирм в общем объеме производства чугуна, %	Среднемесячный объем производства чугуна на одну доменную печь, т
1	31	194 800	23,5	6284
2	25	364 200	44,0	7284
3	5	91 500	11,03	6100
4	5	150 000	18,1	7500
7	1	28 000	3,37	4000
Итого	67	828 500	100,0	6736

Согласно бразильским государственным законам, компании, использующие древесный уголь, должны выполнять программу по восстановлению лесонасаждений. На типичных лесопосадках выращивают эвкалиптовые деревья по семилетнему циклу, при котором каждая та получаемой сухой древесины обеспечивается растущей биомассой из 6,8 т древесины, корней, листьев, являющихся поглотителем диоксида углерода и обеспечивающих поступление кислорода в атмосферу. Схема лесопосадок с семилетним циклом, применяющаяся для производства чушкового чугуна, обеспечивает положительный баланс генерации кислорода и фиксации атмосферного углерода.

Весь процесс от посадки деревьев до производства чушкового чугуна с применением древесного угля удаляет из атмосферы 1,1 т диоксида углерода на каждую тонну выплавленного чугуна. При производстве чушкового чугуна с применением кокса в атмосферу выделяется 1,8 т диоксида углерода. Таким образом, использование древесного угля вместо кокса уменьшает эмиссию диоксида углерода на 2,9 т/т чугуна.

Как известно, древесный уголь обладает существенно меньшей механической прочностью по сравнению с коксом, а также повышенными показателями прочности при восстановлении (RDI) и реакционной способностью (RI). Поэтому доменные печи, работающие на древесном угле, имеют меньшую высоту и больший диаметр по сравнению с доменными печами, работающими на коксе.

К отличительным особенностям доменной плавки на древесном угле относятся:

- низкие выход шлака (120...150 кг/т чугуна) и его основность  $((\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2) - 0,75...0,85$ ;
- температура в зоне замедленного теплообмена (800 °C) на 150 °C ниже при работе на древесном угле, чем на коксе (950 °C) вследствие высокой реакционной способности древесного угля;
- объем, занимаемый рудой в древесноугольной МДП (15%) составляет половину объема руды коксовой МДП (30%);
- время пребывания руды в зоне замедленного теплообмена составляет половину времени пребывания руды в МДП, работающей на коксе;
- теплота сгорания отходящего газа в МДП, работающей на древесном угле, намного выше, чем у МДП, работающей на коксе (4,2 и 3,1 МДж/м<sup>3</sup> соответственно).

Расход древесного угля в зависимости от его влажности и содержания кремния в чугуне составляет от 750 до 1000 кг/т товарного чугуна.

Качество чугуна, выплавленного в доменных печах, работающих на древесном угле, превосходит качество чугуна, полученного при использовании кокса, поскольку он имеет более низкое содержание серы и фосфора. Кроме того, древесноугольный чугун, как правило, свободен от таких микроэлементов, как титан, хром, цинк, в значительной степени поступающих в доменную печь в составе золы кокса.

С 1992 г. Бразилия планомерно увеличивает долю товарного чугуна в общем объеме его производства. Крупнейшим потребителем бразильского чугуна является США, на долю которого приходится свыше 70 % всего экспорта. Около 10 % чугуна Бразилия экспортирует на Тайвань.

***Совершенствование доменного процесса в малых печах.*** По мнению многих исследователей и специалистов доменного процесса,

производительность доменной печи может быть существенно повышена при выполнении следующих условий:

- существенное увеличение количества вдуваемых добавок при значительном повышении степени обогащения доменного дутья кислородом;
- существенное улучшение качества и металлургических свойств используемых шихтовых материалов.

Прогнозируется, что доменная печь объемом около  $600 \text{ м}^3$  сможет производить от 4 до  $7 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сутки}$  чугуна при расходе вдуваемого пылеугольного топлива 350...400 кг/т чугуна, расходе кокса около 200 кг/т и содержании кислорода в дутье до 60 % объемн. При условии сбалансированного соотношения технологического кислорода и вдуваемой добавки может быть достигнуто оптимальное распределение температур в доменной печи, а вдувание флюсов через фурмы способно существенно улучшить условия шлакообразования.

Вообще, технологии вдувания в доменные печи железосодержащих материалов и флюсов (из которых наиболее часто упоминается конвертерный шлак) в последние годы придается все большее значение. Многочисленные исследования показывают, что вдувание флюсов в доменную печь приводит к понижению основности первичных шлаков, формирующихся в районе заплечиков, и повышению основности шлака в верхней части горна доменной печи. Развитие технологии вдувания различных материалов, которые раньше загружались через колошник доменной печи, выгодное прежде всего для печей малого объема, позволяет существенно уменьшить протяженность зоны размягчения-плавления в доменной печи, повысить производительность и снять проблемы, связанные с низкой прочностью кокса и древесного угля в коксовой насадке [433].

***Инжекционные устройства для шахтных печей.*** Использование подходящего инжектора, который обеспечивает формирование непрерывного стабильного потока материалов, позволяет вдувать в шахтные печи различные твердые отходы, включая гранулированные пластики. Однако характеристики потока таких материалов гораздо сложнее по сравнению с пылевидным углем, что предопределяет более высокие технические требования к технологии инъекции. Кроме того, вдувание широкого спектра различных материалов предъявляет серьезные требования и к дозирующему устройству. Это объясняется

тем, что в каждом конкретном случае необходимо подавать в печи изменяющиеся количества материалов, которые к тому же различаются формой гранул и характеристиками потока.

В последние десятилетия в промышленном масштабе освоены технологии дувания в доменные печи следующих материалов [431, 432]:

- пыли мешочных фильтров, колошниковой пыли и других мелкодисперсных вторичных материалов и шламов;
- мелких частиц чугунного и стального скрапа и железорудной мелочи, играющих роль дешевых заменителей кусковых железорудных материалов;
- титанистого железняка (ильменита –  $\text{FeTiO}_3$ ) и синтетических титансодержащих материалов, например рутилита (технология фирмы Sacht-leben Chemie GmbH, Дуйсбург, Германия) для увеличения срока службы огнеупорной футеровки горна;
- легирующих для быстрого корректирования состава чугуна.

Дувание пыли сухих газоочисток предъявляет самые жесткие требования к оборудованию. Эти виды пыли отличаются высокой когезионной способностью, обусловленной мелким размером частиц и высоким содержанием цинка (до 40 %). Такая пыль весьма трудна для транспортировки. Необходимы гибкие технологические режимы, которые позволяют реализовать различные скорости транспортировки, изменяющиеся от высоких уровней до самых низких (не более 1 кг/мин). Дозировочный бункер должен иметь несколько выходных параметров для обеспечения возможности автоматического управления непрерывным процессом дувания при подаче как крупнодисперсных сыпучих материалов, так и тонкодисперсной пыли.

### ***Перспективы утилизации отходов пластмасс в доменных печах.***

Одним из наиболее перспективных материалов для дувания в доменные печи являются пластмассовые отходы. При таком способе их утилизации, во-первых, исключаются выбросы суперэкоотоксикантов, а во-вторых, даже в доменных печах малого и среднего объема полностью утилизируются отходы крупных промышленных регионов [402–404, 434–437].

Основными источниками отходов пластмасс в настоящее время являются: бытовые отходы (до 70 %), торговля и промышленность (до 15 %), электротехника и электроника (около 10 %), транспорт, строительство, сельское хозяйство. Важнейшей характеристикой отходов

пластмасс (как, впрочем, и самих пластмассовых изделий) является их энергетическая ценность. По химическому составу и теплоте сгорания пластмассы подобны основным ископаемым топливам – природному газу, нефти, углям (табл. 6.6).

Таблица 6.6

**Химический состав пластмасс и ископаемого топлива, % масс.**

Элементы	Природный газ	Уголь энергетический	Мазут	Пластмассы
Углерод	70...75	75...80	85...87	75...80
Водород	22...26	4...5	10...12	10...14
Зола	0	8...12	0,05...0,10	4...6
Сера	До 0,001	0,6...1,2	2,0...2,5	0,5...1,5
Хлор	0	0,1...0,3	До 0,05	До 1,5
Фтор	0	До 0,01	До 0,001	До 1,5
Калий	0	0,2...0,3	До 0,001	0,03...0,06
Натрий	0	До 0,1	До 0,001	0,08...0,12

Теплота сгорания некоторых горючих материалов приведена ниже, МДж/кг (м<sup>3</sup>):

Полиэтилен, полипропилен . . . . .	43,0...45,0
Нефтепродукты, мазут . . . . .	40,0...42,5
Природный газ . . . . .	30,0...38,5
Кокс . . . . .	28,0...32,5
Антрацит . . . . .	26,0...28,0
Энергетические угли . . . . .	13,0...20,5
Поливинилхлорид . . . . .	16,0...18,0
Коксовый газ . . . . .	15,0...17,0
Дерево, бумага и ТБО . . . . .	12,0...18,0

Структура обращения с отходами пластмасс в Японии и Германии, т.е. в странах, где организована четкая структура их сбора и сортировки, представлена ниже, % масс:

	Япония	Германия
Рециклинг для производства вторичных полимеров . . . . .	20...25	35...40
Сжигание для производства энергии . . . . .	35...40	15...20
Захоронение на полигонах . . . . .	35...40	40...45

**Комплексные решения по глобальному рециклингу на базе даменного производства.** Японская компания JFE Group внедрила комплексную технологию повторного использования промышленных и бытовых отходов в

качестве вторичных ресурсов при производстве чугуна [438]. Она включает утилизацию пластмассовой упаковки, отходов электробытовых приборов, бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТ), пищевых отходов и др.

Для организации переработки пластмассовой тары и упаковки, которая была начата в 2000 г., на территории металлургических комбинатов в Кэйхине и Фукуяме сооружено и введено в эксплуатацию оборудование по переработке пластика в доменное сырье общей мощностью 120 тыс. т/год, что позволило перерабатывать свыше 20 % всех собранных муниципальных отходов.

Для переработки отходов в доменное сырье прессованные и упакованные отходы, собранные и сортированные муниципальными органами, подвергаются измельчению и поступают в классификатор для разделения пластика по видам и удаления посторонних предметов. Твердые формованные детали, бутылки и другие изделия направляются на участок ручной сортировки, в котором удаляются объекты, не пригодные для переработки, после чего материал дробится до определенной крупности и становится пригодным для использования в качестве восстановителя в доменной печи. Таким образом, максимально реализуется выгода от размещения оборудования на территории металлургического предприятия и достигается практически безотходная переработка использованных бутылок из ПЭТ.

В 2001 г. компания JGE Urban Recycle ввела в эксплуатацию цех по переработке использованных электробытовых изделий четырех типов (телевизоры, стиральные машины, кондиционеры воздуха, холодильники) общей годовой мощностью 800 тыс. единиц. В структуре материалов этих изделий более 80 % приходится на черные металлы, пластик и цветные металлы.

При строительстве цеха переработки опирались на опыт, накопленный компанией JFE Group в технологии измельчения, сортировки и рециклинга. Все, что остается после ручного демонтажа, измельчают и подвергают механической сортировке. В воздушном сепараторе отделяется теплоизоляционный материал (уретан), который затем прессуют для сокращения объема и используют как доменное сырье. В магнитном сепараторе отделяют черный металл и утилизируют в производстве чугуна. Весь пластик, на который приходится около 30 % массы материалов электробытовых приборов, используется в качестве доменного сырья.

Фирма Japan Recycling построила на территории металлургического комбината в Тибэ систему переработки пищевых отходов в биомассу процессом

Bigadan с метановой ферментацией. Переработка начата в 2003 г. Мощность оборудования для переработки пищевых отходов равна 30 т/сут; оно позволяет вырабатывать 4700 м<sup>3</sup>/сут биогаза с содержанием метана около 60 %. Биогаз используется в качестве добавки к доменному дутью.

**Перспективы развития доменного производства.** Стратегию развития различных видов металлургического производства необходимо увязывать с общими мировыми тенденциями, характерными для экономики. Наиболее важными для металлургии изменениями можно считать следующие:

1. Резкое сокращение или (для отдельных регионов) полное исчезновение месторождений чистых по примесям железных руд. Меняется само содержание понятия «чистая руда». В XXI в. уже невозможно игнорировать присутствие в руде попутных элементов в количестве 0,001 % и более. Таким образом, железные руды, попадающие в разработку, будут относиться к классу комплексных видов сырья, а технология, основанная на извлечении лишь одного элемента (железа), в наступившем столетии будет постепенно терять право на существование. Поэтому оценивать перспективы агрегатов и технологий необходимо с учетом возможностей комплексного использования сырья и минимизации безвозвратных потерь попутных элементов. В этом отношении малые доменные печи с большими возможностями в гибкости управления процессом имеют неоспоримое преимущество.

2. Расход энергоносителей на процесс всегда был определяющей характеристикой его качества, а в XXI в. приобрел значение безусловного приоритета. Опыт показывает, что доменные печи размером до 1000 м<sup>3</sup> с использованием современных конструктивных и технологических новаций достигают существенно более низких показателей расхода энергоносителей, чем мощные доменные печи.

3. Глобальный рециклинг неминуемо станет составной частью индустриального производства. Переработка техногенного сырья в малых доменных печах имеет существенное преимущество перед крупными агрегатами. Наряду со снижением концентрации производства при рассредоточении малых печей по территории страны это означает получение ощутимых экологических преимуществ.

Таким образом, можно утверждать, что эпоха «монстров» в черной металлургии подходит к концу, будущее – за малыми (до 2000 м<sup>3</sup>) доменными печами.

#### **6.4. Ресурсосберегающая технология утилизации шламов гальванического производства с использованием МДП**

Среди многочисленных промышленных отходов особое место занимают шламы гальванического производства. Они содержат высокотоксичные металлы: кадмий, кобальт, никель, цинк, хром, свинец [439–441].

Несмотря на значительное снижение объемов гальванического производства в последние 20 лет, проблема утилизации шламов и сбросных вод гальванических цехов остается для Российской Федерации одной из наиболее важных. Согласно Федеральной целевой программе «Отходы» они относятся к первому классу токсичности и выделяются в отдельную группу по проблематике утилизации и безопасного захоронения. Ситуация заметно осложняется в связи с наличием большого количества учтенных и неучтенных захоронений шламов на местах бывших гальванических производств.

В передовых индустриальных странах захоронение опасных промышленных отходов стоит очень дорого, поэтому гальваношламы там перерабатываются с выделением меди, никеля и цинка. Однако проблемы существуют и здесь: непрерывное ужесточение нормативных требований к качеству сбросных вод гальванических производств к настоящему времени привело по существу к исчерпанию технических возможностей традиционных технологий их реагентной очистки. Достаточно сказать, что требуемая остаточная концентрация ионов меди и цинка в очищенных стоках гальванических производств в соответствии со стандартами стран Западной Европы, США и Японии должна быть существенно ниже допустимого их содержания в питьевой воде.

Между тем практика последних лет опровергает возможность создания бессточных гальванических производств, что в совокупности с требованиями об обязательном разделении локальных стоков с организацией замкнутых циклов водопользования, заставляет искать новые пути утилизации гальваноотходов. В лучшем случае современные малоотходные технологии гальванического производства позволяют существенно снизить расход потребляемой и сбрасываемой воды, но количество гальваношламов при этом остается таким же, как это было до предпринятых мер. В целом можно констатировать, что используемые в настоящее время методы очистки сточных вод и локальных стоков в гальванотехнике: реагентные, электрохимические, ионообменные, мем-



бренные, дистилляционные и др. — являются дорогостоящими, требуют значительных капиталовложений и дополнительных производственных площадей и не решают кардинальным образом проблему снижения нагрузки на окружающую природную среду.

В шламах гальванического производства металлы чаще всего присутствуют в виде гидроксидов, оксидов, неорганических солей и органических комплексов. В последние годы их состав существенно усложнился вследствие применения способа очистки сточных вод методом электрокоагуляции с использованием стального скрапа в качестве растворимого анода. В результате образующиеся шламы содержат не только соединения металлов, используемых в гальваническом производстве, но и входящих в состав вышеупомянутого скрапа, т.е. по своему химическому составу и металлургическим свойствам близки к полиметаллическим рудам. Были проведены исследования с целью разработки принципиальной схемы переработки гальваношламов с применением пирометаллургических технологий. Исследованы пробы шламов гальванических производств следующих заводов г. Кургана: машиностроительного (КМЗ), сельскохозяйственных машин (КЗСМ), автобусного (КАЗ), приборного (КПЗ) (Приложение 8). По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Диапазон содержания отдельных элементов в гальваношламах очень широк, но в целом они очень близки к полиметаллическим цинковым рудам.

2. Фазовый состав исследованных шламов близок к фазовому составу портландцементов и цинковых полиметаллических руд. По гранулометрическому составу гальваношламы аналогичны пылеватым цинковым, медным и никелевым рудам и в основном находятся в виде фракции меньше 74 мкм.

3. Основные потери массы образцами гальваношламов происходят при температурах, соответствующих разложению гидроксидов некоторых металлов (например, железа, никеля и др.). В обезвоженном шламе количество гидратов и легковозгоняемых комплексов может достигать 80 % от массы образца.

4. Общая пористость исследованных гальваношламов находится в пределах 25...32 % объемн., а плотность 3,5...4,4 г/см<sup>3</sup>, что очень близко к аналогичным показателям для бурых железняков и медно-никелевых руд.

5. Сравнение кривых размягчения магнетитовых руд КМА и смеси гальваношламов позволяет сделать вывод о близости начальной и конечной температур их размягчения.

6. Степень восстановления смеси гальваношламов газообразным восстановителем в течение 45 мин, замеренная по потере массы может достигать 93 % отн.

В связи с тем что содержание некоторых элементов в гальваношламах превышает их содержание в промышленных полиметаллических рудах, они могут служить сырьевым источником черных металлов, а также дефицитных цветных и редких (например, Zn, Ni, Ga, Ge, Cu, Se). Как с точки зрения ресурсосбережения (содержание потенциально ценных элементов выше 10 % масс.), так и с точки зрения опасности для человека и окружающей природной среды (содержание потенциально ценных элементов – выше 6 % масс., особенно значимо содержание серы и фосфора) гальваношламы нецелесообразно использовать при производстве строительных материалов.

Переработка гальваношламов должна включать обязательное выделение, по крайней мере, 10–15 ценных металлов, а не 2–3, как это имеет место сейчас, даже при применении передовых технологий.

Поскольку применение мелкодисперсных материалов в большинстве пирометаллургических агрегатов требует их предварительной подготовки, были проведены опыты по возможности окускования гальваношламов методами брикетирования и агломерации. Брикеты из прокаленных при 700 °С в нейтральной атмосфере гальваношламов показали плохую прессуемость даже при высоких давлениях. Использование гальваношламов в качестве добавки к шихте для производства доменного агломерата (до 20 % масс.) не привело к значительным изменениям основных показателей процесса агломерации. Однако известно, что повышение доли гальваношламов в аглошихте приводит к увеличению содержания цинка и щелочей в агломерате, что неблагоприятно сказывается на протекании доменного процесса и других металлургических переделов. Таким образом, агломерация гальваношламов не решает в полной мере проблему их утилизации.

Наиболее целесообразной представляется следующая технологическая схема переработки гальваношламов пирометаллургическими методами (рис. 6.3).

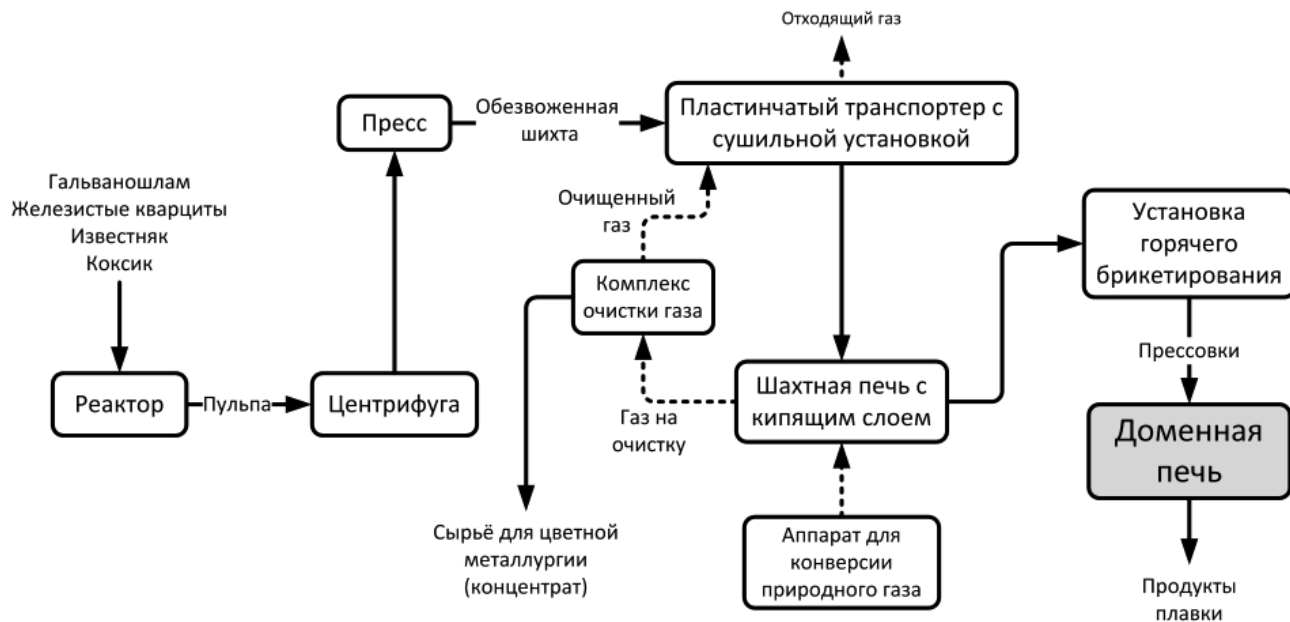


Рис. 6.3. Принципиальная схема комплексной переработки шламов гальванических производств на базе доменной печи

Сырой гальваношлам в виде пульпы собирается в реакторе и смешивается при необходимости с другими измельченными компонентами шихты: коксиком, железистыми кварцитами и известняком. После обработки в центрифуге с целью удаления влаги смесь гальваношлама (влажностью 20...30 %) с коксовой мелочью загружают в приемный бункер. Далее смесь обрабатывается с помощью пресса, обеспечивающего ее прохождение через насадку с отверстиями диаметром до 5 мм. Это дает возможность образования кипящего слоя в печи при температуре до 950...1000 °С.

Получаемые влажные брикеты попадают на ленту пластинчатого транспортера сушильной установки, проходя через которую подсушиваются отходящими газами из реактора с кипящим слоем до влажности 1...1,5 %. Подготовленные таким образом брикеты поступают в двухподовую установку с кипящим слоем. Металлизированные брикеты из печи с кипящим слоем подвергаются горячему прессованию, в результате чего получаемые «прессовки» можно использовать для выплавки легированных и специальных чугунов или лигатур. Железистый кварцит и известняк могут добавляться в исходную шихту для поддержания содержания железа в подготовленном для плавки продукте на уровне 24...35 % масс. и основности 1,0...1,3.

Поступающий в печь с кипящим слоем горячий восстановительный газ (с температурой около 1050 °С) обеспечивает температурный уровень процесса, при котором некоторые элементы возгоняются и переходят в газовую фазу. К легковозгоняемым элементам, входящим в состав гальваношлама, относятся германий, селен, мышьяк, натрий, калий, кадмий, свинец и цинк. Таким образом, в печи с кипящим слоем происходит не только восстановление и обогащение легковосстановимых оксидов и железа, но и селективное разделение элементов.

Лабораторные опыты по улавливанию вышеупомянутых возгонов позволяют сделать вывод о возможности их использования в качестве сырья для цветной металлургии в виде обогащенных соответствующими элементами концентратов.

Показатели доменного процесса с использованием прессовок из металлизированных гальваношламов определялись расчетным путем. Анализ полученных результатов показывает, что при использовании в доменной шихте до 60 % металлизированного продукта химический состав выплавляемого металла будет близок к некоторым маркам хро-

моникелевых чугунов ( $Ni \geq 0,5$ ,  $Cr \leq 3,5$ ,  $Si \geq 0,75$ ,  $Mn > 0,6$ ,  $P \leq 0,5$ ,  $S \leq 0,05$ ). При дальнейшем увеличении расхода металлизированного продукта, получаемого из смеси гальваношламов, химический состав выплавляемого в доменной печи металла аналогичен химическому составу чернового ферроникеля, получаемого в рудовосстановительных печах.

Исследования металлургических свойств шламов гальванических производств позволили разработать принципиальную схему их утилизации с помощью пирометаллургических технологий, в результате реализации которых получают продукты, являющиеся сырьем для цветной (извлечение Ge, Se, As, Cd, Pb, Zn) и черной металлургии (получение хромоникелевых чугунов или ферросплавов). Одновременно существенно снижается нагрузка на окружающую природную среду, так как в рамках этой технологической схемы удастся более чем на 90 % снизить количество всех видов выбросов гальванических производств.

## **6.5. Вагранки и решение проблемы утилизации цинксодержащих металлургических пылей**

***Цинксодержащие отходы в металлургии.*** Пыль, шламы, прокатная окалина и другие побочные продукты металлургических процессов на заводе с полным циклом большей частью утилизируются на агломерационных фабриках. Доля этого использования на крупных металлургических заводах Европы и Японии в настоящее время достигает 80 %. Как правило, не перерабатываются на агломерационных фабриках продукты, содержащие цинк, свинец, другие тяжелые металлы, щелочи, масла. Наибольшей трудоемкостью отличается обратное использование пыли и шламов с высоким содержанием цинка, выход которых в металлургическом производстве особенно велик.

Проблема утилизации пылей и шламов приобретает особое значение в связи с увеличением выплавки стали в дуговых печах с применением амортизационного металлолома. Его обратное использование сопровождается увеличением загрязнения стали такими цветными металлами, как медь, олово, хром, никель, мышьяк, сурьма, висмут и др. При этом цинк и свинец испаряются из металлической ванны и подвергаются повторному окислению в потоке отходящего газа [442–454].

Наибольшее количество пыли накапливается в аппаратах грубой очистки технологических газов. Даже на передовых электрометаллургических печах промышленно развитых стран выход уловленной пыли составляет не менее 12...15 кг на 1 т стали. Таким образом, в мире в целом образуется до 4 млн т пыли электродуговых печей ежегодно. Содержание некоторых элементов в пыли электродуговых печей Японии, Германии и США (по данным Организации экономического сотрудничества и развития), приведено ниже, % масс.:

Компонент. . . . .	Zn	Fe	Pb	C	Mn	Cr	Mo	Cu
Содержание. . .	18...30	25...36	2,2...3,5	3...4	2...3	0,6...1,0	0,2...0,4	0,1...0,2

Из приведенных данных следует, что в пыль ежегодно попадает около 1 млн т цинка. Это обусловлено тем, что в электродуговой печи происходит активная возгонка цинка как из твердого металлолома, так и из жидких материалов. При атмосферном давлении возгонка цинка начинается при 907 °С. В результате около 98 % цинка выходит из печи в виде возгонов (как принято считать, в виде ZnO или ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), около 2 % цинка попадает в жидкую сталь и не более 0,1 % переходит в шлак.

По данным японских и германских исследователей возгоны цинка конденсируются в улавливаемой пыли электродуговых печей практически полностью и поэтому их попадание в атмосферу минимально.

Содержание цинка в жидкой стали обычно превышает 80 г/т. Согласно данным фирмы Thyssen Stahl максимальное содержание цинка может достигать 2300 г/т. Этот уровень, однако, значительно увеличивается, если в шихте используется лом из оцинкованной стали.

В результате выполнения обширной экспериментальной программы, проводимой IRSID в рамках Проекта исследований ECSC (Европейское объединение угли и стали – ЕОУС), было показано, что «даже самый высокий уровень цинка не оказывает существенного влияния на какое-либо измеряемое свойство стали», однако в самих сталеплавильных цехах цинк может вызывать некоторые нежелательные явления:

- цинк испаряется, а затем окисляется с образованием белого дыма, состоящего из ZnO, при интенсивном перемешивании стали, например при выпуске плавки;
- цинк может вызывать кипение стали или приводить к образованию пор в процессе затвердевания, действуя вместе с другими рас-

творенными газами, включая азот, водород; возможны случаи, когда цинк действует аналогично монооксиду углерода CO, т.е. на фронте затвердевания происходит сегрегация и образование пузырьков газа.

Вакуумная обработка и ограничение поступления цинка в ванну жидкого металла посредством адекватного добавления чистого лома в шихту признаются западными специалистами в настоящее время наиболее эффективными методами снижения его содержания в готовом прокате.

Рециркуляция пыли электродуговых печей с извлечением цинка (а также свинца) является в настоящее время одним из самых актуальных направлений черной металлургии как с ресурсной, так и с экологической точки зрения. Ряд технологий переработки такой пыли внедрен в металлургическую практику в 90-х годах XX в., например, на заводе фирмы Nippon Steel в Явате. На этом предприятии ежегодно перерабатывается свыше 250 тыс. т металлургических пылей и извлекается 95 % цинка (от всего количества, поступающего на завод). Большое количество технологий в разных странах мира находятся в стадии разработки и опытно-промышленных испытаний. Большинство исследователей наиболее перспективными признаются технологии рециркуляции пыли электродуговых печей в шахтных агрегатах с коксовой насадкой, прежде всего – в ваграночных печах.

***Вагранки в современных условиях.*** Производство литейного и перепельного товарного чугуна в вагранках в индустриальных странах в настоящее время становится все более привлекательным. Хорошо зарекомендовавшие себя вагранки с горячим дутьем работают с производительностью до 100 т/ч. Вагранка OxiCup позволяет получать перепельный чугун из отходов металлургического производства (шламы и пыли) с применением «самовосстанавливающегося агломерата». Еще одним решением по переработке отходов в литейных цехах в вагранке, работающей на 100 % кислорода, является процесс KSK (Kreislaufgas – Sauerstoff – Kupolfen).

В вагранках можно перерабатывать большие количества цинка, которые получают от автомобильного лома или собственных отходов сталеплавильного производства. Низкая цена такого материала с повышенным содержанием цинка в сочетании с выгодой от продажи пыли, обогащенной цинком, на заводе по извлечению этого металла может, по мнению специалистов фирмы Kuttner, значительно повысить экономичность производства.

В последние годы были разработаны новые технологии, обеспечивающие рециклинг в вагранках разнообразных вторичных материалов. В основном это процессы вдувания сухих мелких гранулированных частиц (обычно пыли) и методы брикетирования сухих и влажных отходов. В настоящее время имеется несколько способов рециклинга пыли вдуванием через фурмы. В цехах с вагранками успешно применена система с использованием принципа отсасывания при помощи насадки Вентури. Чтобы избежать прилипания в подводящих трактах и в транспортирующем оборудовании, цинксодержащую пыль из системы газоочистки вагранки перед ее вдуванием обычно смешивают с коксовой мелочью или нефтекоксом. Этот мелкогранулированный коксик заменяет литейный кокс, что также повышает экономичность.

Типичным показателем является переработка 1600 кг/ч пыли и нефтекокса в вагранке с горячим дутьем для плавки лома производительностью 40 т/ч. Содержание цинка в пыли достигает при этом 40 %.

В качестве альтернативы для вдувания пыли были разработаны различные способы агломерации и брикетирования. Если необходимо подвергнуть рециклингу влажные остаточные материалы, например кек из фильтров мокрой системы газоочистки, наиболее подходящим способом считается компактирование. Однако в большинстве случаев для получения устойчивых брикетов используется связка, в качестве которой опробованы цемент, силикат натрия (жидкое стекло), меласса и некоторые другие вещества.

Большие количества окисленных вторичных материалов могут быть переработаны в вагранке в форме «самовосстанавливающихся» агломератов или «углеродистых» брикетов. Эти кусковые материалы могут содержать отходы сталеплавильных цехов, рудную мелочь и практически любые другие мелкодисперсные железосодержащие материалы. В компактированной порошковой смеси углеродистого брикета восстановление оксидов и окисление углерода происходят через промежуточные продукты реакции  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Исследования показывают, что общая степень восстановления оксидов железа определяется в первую очередь степенью окисления углерода в смесь  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , которая преобладает в порах между частицами. При 1400 °C наблюдается самая высокая скорость реакции.

**Вагранка OxiCup.** Технология OxiCup впервые реализована в промышленном масштабе на заводе ThyssenKrupp Stahl (TKS) в Дуйсбурге (Германия) в 1999 г.



В верхней части печи установлена дозирующая воронка для загрузки шихты, а под ней размещена кольцевая камера для выхода газа. При таком устройстве печь работает без отходящих газов в верхней части. Средняя часть печи предназначена для предварительного подогрева шихты и, в конечном счете, для расплавления компонентов, из которых образуются чугун и шлак. Нижняя часть представляет собой горн и разделитель чугуна и шлака.

Нижняя часть заполнена коксом (коксовая насадка). Горячее дутье температурой 500...600 °С и кислород вдувают через в коксовую насадку для получения высоких температур (выше 2000 °С), при которых происходят перегрев и науглероживание капель жидкого металла при их контакте с коксом.

В зависимости от состава отходов, качества кокса, заданного состава чугуна, состава шлака и потерь тепла при охлаждении фурм и корпуса требуется примерно 800 м<sup>3</sup> горячего дутья и 100 м<sup>3</sup> кислорода для сжигания 15...20 % кокса на 1 т шихты. Опыт применения данной технологии показывает, что одна шахтная печь OxіCup способна переработать практически все трудноутилизируемые отходы и побочные продукты одного комбината или ряда заводов. В такой печи можно перерабатывать материалы с высоким содержанием цинка из текущих и накопленных отходов металлургического производства или из автомобильного лома.

OxіCup позволяет также перерабатывать без дополнительной подготовки такие тяжеловесные материалы, как настыли или металлические фракции шлака десульфурации. Ограничения по размеру перерабатываемых материалов зависят от размеров печи и достигают 600...800 мм для настывей и 400×400×400 мм для пакетированных материалов (например, легковесного автолома).

Большие объемы пылевидных отходов можно перерабатывать в виде самовосстанавливающихся брикетов (с добавлением углерод-содержащего восстановителя). Отработка технологии приготовления брикетов во многом определила успех реализации технологии OxіCup в промышленном масштабе. Была доказана возможность переработки различных видов мелкофракционных текущих и отвалных металлургических отходов и работа печи полностью на брикетах.

В печи OxіCup восходящий из горячих зон в виде паров цинк окисляется, обеспечивая равновесие реакций окисления-восстановления, ко-

торые почти полностью прекращаются при температурах ниже 300 °С, преобладающих на уровне газоотводящего тракта. Частицы ZnO, образующиеся при окислении газообразного цинка в области низких температур, имеют небольшие размеры и уносятся из печи с пылью. В результате содержание цинка в колошниковой пыли составляет около 30 %, что делает ее товарным продуктом для дальнейшей переработки.

Возможен также дуплекс-процесс, при котором в печи OxiCup происходит концентрация цинка в возгонах в виде цинкита, а во втором специально сконструированном агрегате – получение металлического порошкового цинка (DECM – электрококсовая плавка пыли). Такая технологическая схема обеспечивает улучшение экономических показателей утилизации отходов за счет получения продукта более высокой степени переработки.

Опыт эксплуатации крупных вагранок OxiCup показал, что внутренний диаметр шахты печи для плавки брикетов нецелесообразно увеличивать более 3 м. Такая печь может перерабатывать в год до 520 тыс. т скрапа (настылей и т. п.) или 360 тыс. т брикетов. Смесь брикетов и скрапа характеризуется годовым объемом переработки в этих пределах в зависимости от пропорции компонентов в смеси.

Положительный опыт эксплуатации промышленного комплекса на TKS дал толчок развитию данной технологии. В 2009 г. подписан контракт на строительство трех комплексов OxiCup для компании TISCO, Китай (переработка отходов производства углеродистой и нержавеющей сталей и феррохрома). Определенные перспективы технология имеет и в России. Реализация подобного проекта может проходить по нескольким вариантам:

1. Создание комплекса для утилизации всех отходов крупного завода или комбината. В данном случае завод может свести к минимуму образование отходов, обеспечив практически полное вовлечение их в производственный процесс с извлечением ценных компонентов. Этот вариант наиболее подходящий для заводов мощностью не менее 4...5 млн т стали. Например, рассматривается вариант реализации проекта OxiCup для условий ЛПК и ВМЗ (оба – г. Выкса), входящих в состав Объединенной металлургической компании. В этих условиях возможна переработка всех текущих отходов (ежегодно до 300 тыс. т) с получением жидкого чугуна, который можно использовать в ДСП.

2. Создание регионального центра по переработке отходов. При наличии в отдельном регионе нескольких мини-заводов, когда строительство комплексов ОхуСир для каждого из них в отдельности экономически нецелесообразно, можно организовать региональный центр, использующий отходы отдельных предприятий (по типу завода DK Recycling, Германия). Например, Уральский центр мог бы использовать текущие отходы таких заводов, как Ревдинский (НСММЗ), Серовский, ПНТЗ, Синарский трубный завод, ЧТПЗ и др. а также переплавлять амортизационный лом с высоким содержанием примесей.

***Ваграночные процессы MR-OCF (multi role – oxygen cupola furnace) и KSK (Kreislaufgas-Sauerstoff-Kupolfen).*** Многоцелевая вагранка с кислородным дутьем представляет собой обогреваемую коксом шахтную печь, работающую на дутье из чистого кислорода. Колошниковый газ возвращают в процесс, а отходящие газы отводят из зоны с температурой 800...1000 °С. Отсутствие азотного балласта позволяет добиться высоко-го энергетического коэффициента полезного действия.

Отходы, опускающиеся в шахтную печь вместе с обычными шихтовыми материалами, нагреваются в восстановительной атмосфере в противотоке. При этом происходит разложение органических компонентов, вследствие чего газ в нижней части шахты обогащается продуктами газификации. Весь шахтный газ улавливается и вместе с кислородом снова подается в фурмы. При этом приходится мириться с тем, что в вагранку поступает подсасываемый через колошник атмосферный воздух. Отсос из шахты осуществляется в результате эжекции потоком кислорода, поступающего в специальные горелки с направленными соплами. В турбулентном потоке кислорода имеющиеся в циркулирующем газе продукты пиролиза сгорают практически полностью. Продукты сгорания разлагаются в примыкающей зоне восстановления в результате гетерогенных реакций, а продукты реакций снова оказываются в шахтном газе. Так как газ отсасывается в зоне, где разложение органических компонентов материалов, загружаемых через колошник, уже завершается, отходящие газы практически не содержат углеводородов и других органических соединений.

Таким образом, кислородная вагранка обеспечивает благоприятные условия для расплавления различных материалов, связанных или смешанных с ломом (например, промасленного или имеющего пластмассовое покрытие лома, лома с красочным, резиновым или цинковым

покрытием). Такую вагранку можно использовать и для экологически чистой переработки отходов других отраслей промышленности, например старых автомобильных шин, пыли из фильтров или высушенного шлама из осветлительных установок.

В результате циркуляции обезвоженного шлама из установок мокрой газоочистки, а также пыли с фильтровальной установки, концентрация ZnO в пыли достигает 40 %. Обогащение цинком поддерживается также вдуванием или эжекцией пыли из электропечей или загрузкой через колошник окатышей, изготовленных из пыли электросталеплавильных печей. Таким образом, в вагранке получают ценный материал для цинковой промышленности. Незначительное количество балластного азота в отходящих газах дает возможность усовершенствовать известный из доменного производства «энергетический контур циркуляции» (рис. 6.4).

Отходящие газы с теплотой сгорания до 7350 КДж/м<sup>3</sup> пригодны для перевода их энергии в электрическую. При этом получают такое количество электроэнергии, что ее хватает не только для удовлетворения потребностей ваграночного цеха, но и для снабжения энергией собственной кислородной установки. Таким образом, необходимый для процесса кислород получают за счет энергии отходящих газов установки.

Ваграночный процесс KSK представляет собой дальнейшее усовершенствование кислородной вагранки MR-OCF. Процесс KSK очень похож на технологию процесса в вагранке с горячим дутьем или в кислородной вагранке OxiCup; есть аналогия и в поведении цинка, и в рециклинге пыли. В дополнение к процессу переработки загрязненного лома здесь возможен процесс переработки и других промышленных отходов, например отслуживших автомобильных покрышек, пыли из фильтров и высушенного канализационного шлама.

**Процесс STAR.** STAR – процесс восстановительной плавки в плотно упакованном слое кокса – представляет собой разработку лаборатории производства чугуна фирмы Kawasaki Steel. Установка была запущена в эксплуатацию в 1994 г. Первоначально процесс был разработан с целью производства ферросплавов посредством плавления рудной мелочи без предварительного спекания. Однако в промышленном масштабе процесс STAR применили для рециркуляции пыли, образующейся в ходе кислородно-конвертерного производства коррозионностойких сталей. В настоящее время достигнут уровень производительности 150...160 т/сут.

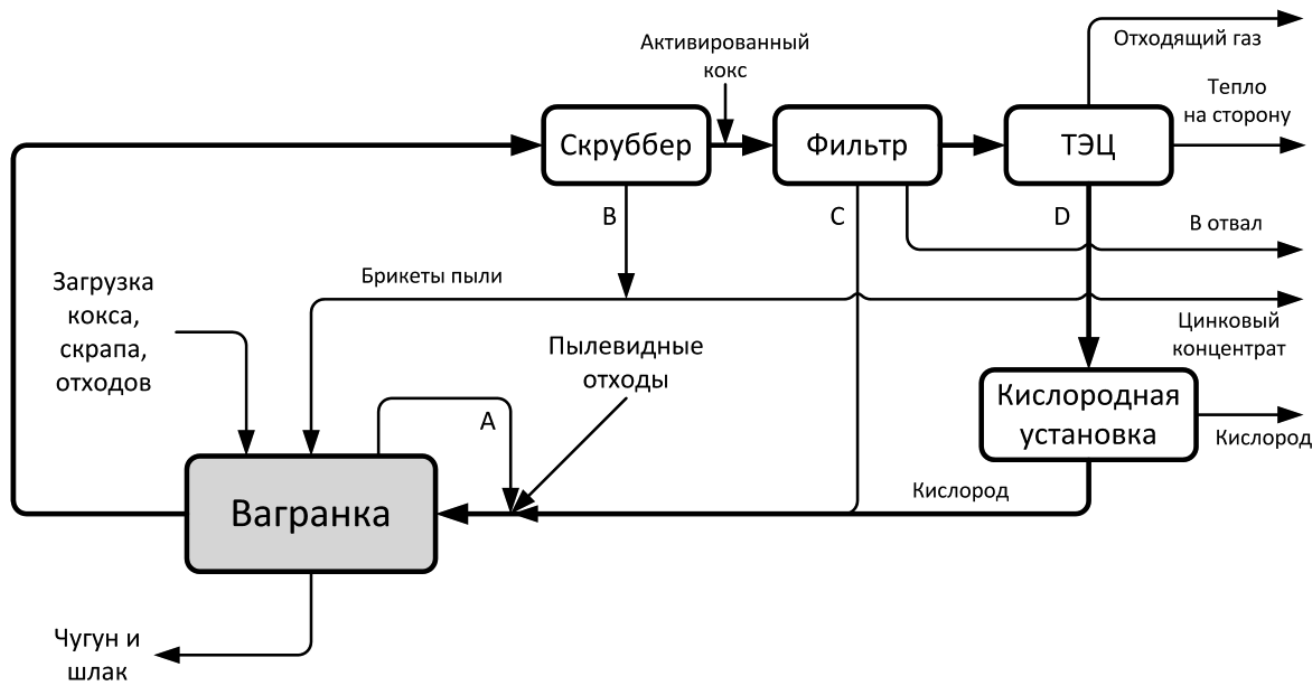


Рис. 6.4. Циркуляционный контур, формирующийся при работе на кислородной вагранке

STAR-процесс отличается следующими характерными особенностями:

- применение шахтной печи, заполненной плотноупакованным коксом;
- оснащение шахтной печи двухуровневыми фурмами;
- непосредственное использование тонкодисперсных сырьевых материалов без их предварительной агломерации.

Тонкодисперсный сырьевой материал вдувают через верхние фурмы, после чего он плавится непосредственно в зоне циркуляции кокса. В области между двумя уровнями фурм образуется высокотемпературная восстановительная зона, поскольку шахтная печь обеспечивает хороший теплообмен между восходящим потоком газа и опускающимся коксом. Жидкие оксиды сырьевого материала восстанавливаются до металла по мере того, как стекают через высокотемпературный плотноупакованный слой кокса. Восстановленный жидкий металл и шлак стекают по направлению к поду печи, а элементы с высоким давлением пара, включая цинк и свинец, испаряются и выносятся через колошник печи. В процессе восстановительной плавки используется мелкий кокс, обладающий низкой прочностью.

Для одновременной регенерации цинка и железа из пыли электродуговых печей на установке смонтирован один комплект двухуровневых фурм, через которые подают горячее дутье, обогащенное кислородом. Пыль электродуговых печей вдувают пневматически через верхнюю фурму вместе с флюсом, который применяется для регулирования состава шлака. Жидкий металл и шлак выпускают из горна.

Пары цинка, удаляемые вместе с отходящим газом, быстро охлаждаются водой, подаваемой из распылителя, с образованием цинкового шлама, который улавливается в скруббере Вентури. Из этого шлама регенерируют цинк. Колошниковый газ состоит главным образом из монооксида углерода и азота и используется в качестве топлива.

## **Глава 7. ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **7.1. Ванадий в продуктах нефтепереработки и золах ТЭС**

Все без исключения нефти наряду с основными составляющими их элементами (C, H, S, N, O) содержат некоторое количество микропримесей (от  $10^{-7}$  до  $10^{-2}$  %). К настоящему времени в нефти обнаружено присутствие более 50 микроэлементов. Микроэлементы в сырье для нефтепереработки вызывают отравление катализаторов и ухудшают селективность их действия. Они присутствуют во всех нефтяных фракциях, начиная с бензиновых, и количество их обычно возрастает с повышением температуры кипения фракции, достигая максимума в остатках [455, 456].

Использование мазутов, в которых обычно концентрируется основная часть микроэлементов, в качестве котельного топлива приводит к загрязнению окружающей среды тяжелыми металлами. Содержащиеся в газотурбинном, реактивном и котельном топливе примеси переходных металлов приводят к интенсивной газовой коррозии находящихся в рабочей зоне элементов двигателей и энергоустановок [456].

По микроэлементному составу нефти накоплен обширный материал [457, 458]. Гораздо меньше сведений имеется о том, в каких формах присутствуют в нефти эти элементы, какова структура содержащих их соединений. До сих пор достоверно не выяснена точная химическая структура ни одного содержащего микроэлемент нефтяного вещества, за исключением порфириновых комплексов ванадия (ванадилпорфиринов) и никеля [459].

Порфириновые соединения являются типичными хелатными внутримолекулярными комплексами. Круг металлов, которые могут содержаться в составе природных порфириновых систем, достаточно широк. Порфирины представляют собой широко распространенные в живой природе пигменты, в основе молекулы которых лежит порфин-структура из четырех колец пиррола. Природные порфирины различаются заместителями. Наиболее биологически важны комплексы порфирина с железом и магнием. Переносящие кислород красные пигменты крови и мышц – гемоглобин и миоглобин – содержат Fe-порфириновый комплекс, а зеленые пигменты растений хлорофил-

лы Mg-порфириновые комплексы. Порфирины обнаружены в нефти, битумах и ископаемых органических остатках [460, 461].

Преобладающая часть (иногда до 98 %) ванадия, присутствующего в сырой нефти, аккумулируется в получаемых после перегонки нефтяных остатках. Содержание ванадия в бензиново-керосиновых дистиллятах ( $T_{\text{нач. кип}} = 292\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) не превышает  $3 \cdot 10^{-4}\text{ } \%$ . Предположительно вынос ванадия в легкокипящие дистилляты частично обусловлен наличием в нефти летучих минеральных соединений типа  $\text{VOCl}_3$  (точка кипения  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{VOBr}_3$  (точка кипения  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или  $\text{VCl}_4$  (точка кипения  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [22]. Возможно, ванадий выносится в дистилляты в форме летучих металлоорганических комплексов, образующихся в результате термодеструкции более тяжелых компонентов нефти. В дистиллятах, кипящих выше  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ванадий обнаруживается регулярно, и концентрация его растет по мере повышения температуры отбора фракций [456–460].

Золы теплоэлектростанций – один из самых распространенных отходов современной цивилизации. За многие десятилетия работы на ТЭС были сожжены огромные количества органического топлива. Золы, остающиеся после сжигания, накапливаясь на территориях промышленных регионов, занимают значительные площади и создают опасность заражения окружающей среды содержащимися в них токсичными веществами и тяжелыми металлами. Одновременно они являются потенциальным техногенным сырьем для извлечения некоторых ценных компонентов. Особый интерес представляют золы, образующиеся при сжигании мазутов, которые содержат в значительных количествах такие металлы, как ванадий, никель, магний, а также серу. В конце XX в. были предприняты попытки использования зол ТЭС в металлургической промышленности для получения ванадий- и никельсодержащих лигатур и сплавов [456–464].

В некоторых странах ванадийсодержащие золошлаковые отходы (ВЗШО) ТЭС активно вовлекаются в производственную сферу. В Японии еще в 80-е годы около 20 % потребности ванадия покрывалось за счет переработки ЗШО ТЭС; в Канаде, США и Венесуэле ванадий, а также никель получают не только из нефти и битума, но и из ВЗШО, полученных в результате сжигания на ТЭС нефтепродуктов.

В 1 т нефти тяжелых сортов может содержаться до 300 г ванадия и около 40 г никеля. В битумах эти показатели в 7–10 раз выше. При сжигании или перегонке нефти и нефтепродуктов концентрация ванадия в кубовом остатке или золах возрастает в 100–1000 раз. Таким



образом, в нефти заключены значительные запасы этого металла, что уже в ближайшем будущем позволит расширить сырьевую базу его производства. По-видимому, наиболее заметную роль будет играть ванадийсодержащая нефть Венесуэлы, но и нефть некоторых месторождений Ирана, Кувейта и Саудовской Аравии содержит 20...180 г/т ванадия. По предварительным оценкам, разведанные в России запасы нефти содержат до 7...10 млн т ванадия [461–463].

В России переработка ванадийсодержащих отходов электростанций в промышленных масштабах до сих пор не освоена, хотя не вызывает сомнений ее экологическая целесообразность. В золошламонакопителях теплоэлектростанций (ЗШН ТЭС) страны накоплено около 370 тыс. т бедных по ванадию (менее 10 % масс.  $V_2O_5$ ) высокосернистых шламов. Ежегодно из золошламонакопителей вымывается и выветривается около 5 тыс. т ванадия и до 1,4 тыс. т никеля.

**Классификация ванадийсодержащих золошлаковых отходов (ВЗШО) ТЭС.** ВЗШО ТЭС представлены пятью основными видами с различными технологическими свойствами. Они отличаются фазовым составом, содержанием основных примесных элементов (никеля, серы и углерода), а также количеством водорастворимых соединений ванадия (ВРВ). Химический состав материалов, образующихся при сжигании нефтепродуктов, зависит от места их накопления и способа удаления из системы котлоагрегата (рис. 7.1).

В большинстве котлоагрегатов большая часть (около 80 %) ванадия уносится с дымовыми газами в составе бедной высокоуглеродистой золы. Это обусловлено приемами, применяющимися на ТЭС для повышения к.п.д. котлоагрегатов: прокалкой (временное повышение температуры газов), термоволновой очисткой (удаление золы микровзрывами), дробеочисткой (механическое удаление при обработке теплопередающих поверхностей металлической дробью) и др.

Твердые продукты от сгорания мазута распределяются по поверхностям нагрева в высокотемпературной и низкотемпературной зонах котлоагрегата, а также в газоходах. В период работы и при остановках котлоагрегатов на ремонт проводятся паровые обдувки и водные обмывки, предназначенные для удаления золы. Получающиеся при этом на ТЭС, не имеющих очистных сооружений, обмывочные воды сбрасываются в шламонакопители. На предприятиях, где действуют установки для нейтрализации и обезвреживания обмывочных вод, в зависимости от применяемого осадителя получают бедный (с содержанием менее 10 %

$V_2O_5$ ) или богатый (более 10 %  $V_2O_5$ ) шлам. При ремонтах котлоагрегатов часть зольных продуктов выводится механической очисткой.

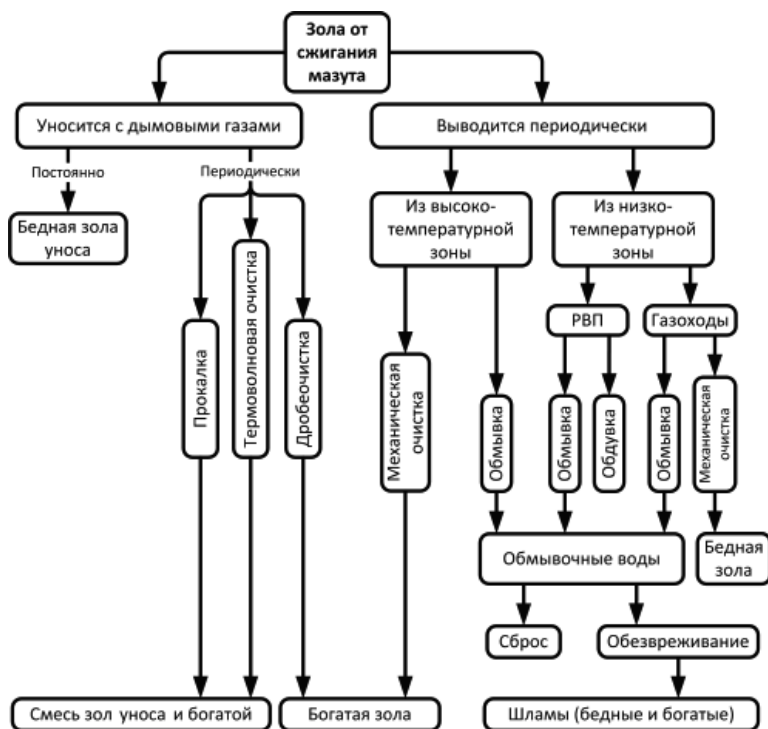


Рис. 7.1. Технологическая схема работы котлоагрегата

При сжигании мазута температура газов и зольных частиц изменяется в широком интервале температур от 1100 до 1500 °С. В связи с этим происходит образование различных соединений ванадия и никеля, в которых ванадий находится в оксидной форме при степенях окисления от  $V^{3+}$  до  $V^{5+}$ . Пятивалентный ванадий представлен ванадатами натрия, пентаоксидом ванадия, двойным натриймагний-вым ортованадатом, ванадатами никеля и другими соединениями. Четырехвалентный ванадий входит в состав сульфата ванадила. Кроме того, присутствуют натрийванадиевые соединения типа  $Na_xV_2O_5$  и  $Na_{2+2x}V_6O_{16}$ , в которых ванадий содержится в двух степенях окисления. В трехвалентном состоянии ванадий входит в состав фазы со

структурой шпинели  $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mg})^{2+}(\text{Fe}, \text{V}, \text{Al}, \text{Cr})_2^{3+}\text{O}_4$ , которая образуется в высокотемпературной зоне сгорания котлоагрегатов.

Золы, получающиеся при сжигании мазута, и шламы от нейтрализации обмывочных вод ТЭС условно делятся по содержанию  $\text{V}_2\text{O}_5$  на бедные (менее 10 %) и богатые (более 10 %). Бедная зола представлена двумя разновидностями. Основная доля ванадия сосредоточена в бедной высокоуглеродистой золе, называемой золой уноса. Она представляет собой сухие мелкодисперсные частицы, основной составляющей которых является углерод (табл. 7.1). Количество ВРВ в золе уноса составляет 18,0...28,0 % от его общего количества.

От сжигания мазута получается второй вид бедной золы, в которой сосредоточена небольшая часть ванадия, – зола, осаждающаяся в газоходах котлоагрегатов. В этой золе при содержании пентаоксида ванадия 3,5...7 % преобладают железо и сера, которые входят в сульфатную составляющую в виде солей железа, ванадия, никеля и натрия. Зола характеризуется наличием влаги (6...30,7 %), колебаниями количества потерь при прокаливании (ППП) 48,6...73,7 % при отсутствии зависимости их от общего содержания ванадия и выраженной кислой реакцией пульпы при обработке золы водой (рН 1,3...1,9).

Таблица 7.1

**Химический состав бедных зол уноса, % на сухую массу**

Содержание	$\text{V}_2\text{O}_5$	Ni	Fe	S	C	$\text{SiO}_2$	CaO	MgO	P	Na
<i>Зола уноса (ТЭЦ-4, г. Уфа)</i>										
Min	5,34	2,21	7,27	7,25	57,0	2,88	0,96	0,12	0,015	0,75
Max	6,67	2,25	6,16	6,04	59,0	3,84	1,72	0,21	0,015	1,10
<i>Зола из газоходов (ТЭЦ-5, г. Киев)</i>										
Min	3,52	1,50	14,80	11,10	18,50	6,74	1,15	0,13	0,02	0,69
Max	6,83	1,81	16,06	16,70	21,5	18,50	4,06	0,66	0,03	0,83

Ванадий в золе, извлеченной из газоходов, находится в основном в виде сульфата ванадила. Небольшая часть ванадия (около 3 %) находится в виде пентаоксида ванадия. В составе золы содержится от 2 до 5 % зерен кальцийникельванадиевого граната, состав которого описывается формулой  $\text{Ca}_5\text{Ni}_4(\text{VO}_4)_6$ . В силикатную составляющую входят кварц, альбит и  $\alpha$ -кристобалит; их доля составляет примерно 13 %.

Бедная зола уноса и зола, остающаяся в газоходах, характеризуются повышенным (до 88 %) содержанием углерода и более высоким (до 20 %), чем в богатой золе, содержанием серы.

Бедные шламы (менее 10 %  $V_2O_5$ ), в составе которых в настоящее время накоплено около 7000 т  $V_2O_5$ , выделяются из токсичных кислых обмывочных вод в результате их обработки известковым молоком.

В последней четверти прошедшего столетия структура европейского рынка энергоносителей существенно изменилась, что привело к накоплению значительных количеств нового ванадийсодержащего сырья – золы от сжигания нефтеводяных эмульсий. Эти эмульсии, поступающие из Венесуэлы, стали использоваться вместо традиционного мазута на многих европейских энергоустановках (табл. 7.2). Особенности химического состава золы от сжигания нефтеводяной эмульсии:

1) высокое значение соотношения  $MgO/CaO$ , объясняющееся тем, что водная фаза эмульсии представлена морской водой;

2) пониженное содержание  $Fe_{общ}$ ,  $SiO_2$  и  $Mn$ .

Переработка ВЗШО ТЭС на существующих в Западной Европе ванадиевых производствах осуществляется при некоторой модификации известных технологических схем с получением пентаоксида ванадия и никелевого концентрата, содержащего более 10 % никеля. Пентаоксид ванадия, полученный из золы от сжигания нефтеводяных эмульсий, как правило, содержит, %: 98,0  $V_2O_5$ ; 0,015 Ni; 0,30 MgO; <0,05 Fe; <0,02 CaO; 0,05  $SiO_2$ ; <0,01 Mn; <0,01 S; <0,01 P.

Таблица 7.2

Состав ванадийсодержащих зол, %

Исходное топливо	Регион	$V_2O_5$	NiO	MgO	$Fe_{общ}$	CaO	$SiO_2$	Mn	$SO_4^{2-}$
Мазут М-100	Россия	10...15	1,5...2,0	2,0.. 2,5	16,0.. 18,0	10,0.. 15,0	12,00.. 16,00	0,5.. 1,00	~3
Венесуэльская нефтеводяная эмульсия	Прибалтика	12...16	1,5...2,0	10,0.. 12,0	1,5...2,0	1,5...1,5	>1,00	0,05	~9
	Англия	25...27	1,0...1,5	4,5.. 5,0	0,5...1,0	2,5...3,0	0,12	0,01	~15

## 7.2. Технологии извлечения ванадия из техногенного сырья

Производство ванадиевых сплавов и материалов из техногенного сырья за рубежом в настоящее время включает переработку:

- ЗШО и обмывочных вод ТЭС;
- отработанных катализаторов сернокислотного производства;
- остатков нефтепереработки;

– зольной пыли битуминозных песчаников и доломитизированных сланцев;

– красных шламов переработки бокситов [243, 249, 250, 254, 255, 258].

Наиболее развито применение техногенного ванадийсодержащего сырья в Японии. Доля ванадийсодержащих нефтяных остатков, летучей золы, образующейся в топках, работающих на мазуте, и отработанных катализаторов в производстве феррованадия в Японии достигает 30 %. По схеме технологического процесса получения пентаоксида ванадия из летучей золы на заводе фирмы «Тайо коко» в г. Ие попутно получают никельсодержащие остатки с содержанием, %: 7,6 Ni; 0,3 Cr; 12,8 Fe; 0,8 S; 12,7 SiO<sub>2</sub>; 5,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,9 C; 6,5 Na<sub>2</sub>O; 3,6 CaO; 1,8 MgO. Производство пентаоксида ванадия из золы составляет 20 т/мес. Получение пентаоксида ванадия из отработанного катализатора нефтеперерабатывающего завода следующего химического состава, %: 6,0 V; 5,3 Mo; 31,8 Al; 8,0 S; 12,0 C; 1,6 Ni; 1,0 Co, освоено на заводе фирмы «Тайо коко» в г. Ако. Количество перерабатываемого катализатора на заводе в г. Ако составляет 4500 т/год. Наряду с пентаоксидом ванадия получают никельсодержащий остаток с содержанием, %: 3,3 Ni; 0,9 Fe; 2,6 SiO<sub>2</sub>; 1,4 MgO; 0,5 S; 0,1 C; 85,1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,01 P, который используют для получения никеля.

В качестве шихты для производства феррованадия на заводе в г. Ако используют чешуйчатый пентаоксид ванадия, импортируемый из ЮАР, а также полученный на заводе в г. Ие из летучей золы и отработанных катализаторов. В качестве восстановителя используют производимый на заводе в г. Ако гранулированный алюминий с содержанием, %: 99,7 Al; 0,15 Si; 0,2 Fe; <0,01 Cu; 0,02 Ti; 0,02 Mo, который смешивают с железосодержащим материалом состава, %: 0,15 C; 0,3 Si; 0,6 Mn; <0,06 P; 0,06 S; остальное – Fe.

Плавку ведут в цилиндрической металлотермической печи. Отходящие газы очищаются и выбрасываются в атмосферу. Продукты реакции охлаждают и отделяют металл от шлака. Феррованадий дробят, классифицируют и отгружают заказчику. Шлак с содержанием, %: 2,23 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 7,6 MgO; 0,14 SiO<sub>2</sub>; 0,33 FeO; 0,13 CaO; 0,77 Na<sub>2</sub>O; остальное – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дробят, частично используют на заводе в футеровке шахт печей, остальной реализуют потребителям. Сплав марки FeV2 содержит, %: 45...55 V; 0,2 C; 2,0 Si; 0,1 P; 0,10 S; 4,0 Al, а сплав марки FeV1 отличается высоким содержанием ванадия (75...85 %).

В лабораториях университета в г. Торонто (Канада) феррованадий и ферроникель получают из летучей золы тепловых электростанций, ра-

ботающих на мазуте, в плазменно-дуговом реакторе с удлиненной дугой косвенного нагрева. Реактор работает на переменном токе и оборудован тремя полыми графитовыми электродами ( $d = 37$  мм), через осевые отверстия которых ( $d = 1,6$  мм) вдувают аргон. Мощность реактора 100 кВт.

Характерной особенностью реактора является наличие трех отдельных зон: предварительного нагрева и частичного восстановления шихты (вращающаяся печь и реакционная колонна), плавления (зона плазменной дуги) и образования шлакового и металлического расплава (зона горна).

Золу смешивают с углеродистым восстановителем и подают со скоростью 25 кг/ч во вращающуюся печь, где шихта высушивается и нагревается до 800 °С в течение 3 мин. Обычная крупность обрабатываемого материала – класс минус 0,5 мм. Затем шихта проходит через реакционную колонну, где в потоке горячих восстановительных газов, образующихся в плазменной зоне реактора, происходит частичное восстановление никеля и железа и температура шихты достигает 1600 °С. В плазменной зоне температура частиц повышается до 2300 °С, и шихта плавится. Расплавленные металлическая и шлаковая фазы скапливаются в горне, где завершаются реакции восстановления и рафинирования, после чего расплав выпускают в чугунную изложницу. После затвердевания шлак и металл легко разделяются. Описанным способом получают ферроникель, содержащий 30...40 % Ni, и феррованадий с содержанием 50...60 % V. Извлечение железа и никеля составляло около 90 %, ванадия – около 85 %.

Фирма Vadnor enterprises (Канада) разработала технологию получения ванадия из зольной пыли, образующейся при переработке битуминозных песчаников. Извлечение ванадия из пыли составляет более 80 %. Два промышленных предприятия, работающих по этой технологии, введены в эксплуатацию в 1988 г. в районе Форт-Мак-Мюррей и Лак-ла-Биш. Сырье поступает с предприятия по получению искусственного топлива из битуминозных песчаников фирмы Sincruide Canada в Майлд-Ред-Лэйк.

Зольная пыль вместе с отработанными катализаторами для гидрокрекинга агломерируется, а несгоревший углерод отделяется. Затем агломерат вместе с солями подвергается высокотемпературному обжигу и охлаждается в воде. Соединения ванадия и молибдена выщелачиваются и загружаются в ионообменник для разделения ванадия и молибдена. Мощность предприятия – 817 т  $V_2O_5$  и 91 т  $MoO_3$ .

На заводе фирмы ГФЕ в г. Нюрнберге основными источниками сырья для производства ванадиевых сплавов являются ванадиевый шлак, нефтяные остатки, котельная зола и отработанные катализаторы. Основные стадии переработки ванадиевого сырья – сушка и измельчение, щелочной обжиг для перевода ванадия в водорастворимую форму (что раньше осуществлялось добавками карбоната и хлорида натрия), выщелачивание и осаждение ванадия в виде поливанадата аммония. Ранее это достигалось нейтрализацией раствора серной кислотой и последующим добавлением гидроксида аммония, однако при этом образовывалось большое количество сточных вод, насыщенных нейтральными солями. Частичная замена хлорида натрия сульфатом натрия на стадии выщелачивания и серной кислоты сульфатом аммония при непрерывном осаждении поливанадата аммония, а также регенерация сточных вод решили эту проблему. В результате качество пентаоксида ванадия (улучшилось за счет уменьшенного содержания щелочей). В настоящее время применяется технология получения из обмывочных вод ТЭС ванадиевого концентрата с содержанием от 20 до 40 %  $V_2O_5$  и не более 3% S. После отделения ванадиевого продукта осуществляют осаждение никелевого концентрата, содержащего до 3 % NiO и до 10 % S, что позволяет затем перерабатывать его и утилизировать серу.

***Перспективы использования золы теплоэлектростанций для производства ванадийсодержащих материалов.*** Широкое использование мазута и связанное с этим образование больших количеств токсичных золошлаковых отходов (ЗШО), содержание ванадия в которых может достигать 30...35 %, привело уже в 70 годы к интенсивному поиску технологий их утилизации [456–458].

Однако, несмотря на большое количество предложенных технических решений (только в СССР в период с 1970 по 1990 г. было выдано свыше 50 авторских свидетельств по этой проблеме), высокоэффективные способы извлечения ванадия из ЗШО, которые могли бы быть поставлены «на поток», не найдены. Неудачи этих разработок связаны в определяющей степени с тем, что ЗШО рассматриваются в качестве добавки (как правило, микродобавки) к шихте для производства черных или цветных металлов. Это связано с целым рядом неудобств в обращении с этим материалом, который отличается значительным разнообразием гранулометрического и химического состава. Кроме того, в этом случае решается проблема утилизации ЗШО, но не проблема про-

изводства ванадия (феррованадия или пентаоксида ванадия). В лучшем случае может быть получен продукт с низким содержанием ванадия (не более сотых долей процента). Данное обстоятельство противоречит основной тенденции развития мирового металлургического производства, заключающейся в получении высокочистых продуктов для последующей выработки готовых изделий заданного состава с определенными свойствами и характеристиками и существенно ограничивающей область применения низколегированных полупродуктов.

Следует иметь в виду также необходимость транспортировки ЗШО к местам переработки. Однако ЗШО в том состоянии, в котором они накапливаются на территории ТЭС, к транспортировке практически непригодны, поскольку представляют собой мелкодисперсную «легкоотекающую» массу, легко размываемую осадками и загрязняющую районы вблизи путепроводов. Кроме того, перевозить содержащиеся в отходах ( в сумме до 70 % масс.) углерод, серу и воду, которые надо будет затем удалять, экономически не выгодно. Важно отметить также то обстоятельство, что трансграничное перемещение ЗШО в необработанном виде запрещено соответствующими международными соглашениями.

### **7.3. Экспериментальные исследования ванадийсодержащих ЗШО**

Ванадийсодержащие ЗШО в качестве металлургического сырья вследствие специфических условий своего образования принципиально отличаются от природных рудных полезных ископаемых. Поэтому в ходе исследований [465–467] решались следующие задачи:

- определение полного химического состава ЗШО;
- изучение поведения ЗШО при нагреве, определение интервала температур плавления;
- изучение возможности окомкования или брикетирования ЗШО для облегчения условий транспортировки;
- определение влияния атмосферных осадков на прочность сырого и обожженного сырья;
- разработка технологии обессеривания ЗШО.

**Химический состав проб ЗШО.** Исследованные ЗШО европейских ТЭС, работавших на венесуэльской водонефтяной эмульсии, по гранулометрическому составу представляли собой либо порошок, либо ком-



ки неправильной формы размерами в среднем 20...70 мм. Химический состав проб партий ЗШО, поступивший на исследование, контролировался на 75 элементов. Всего было изучено 16 проб от четырех партий поступившей золы. Химический состав одного из образцов, который представлялся наиболее типичным, представлен в Приложении 9.

Установлено, что содержание ванадия в пробах в среднем колебалось в пределах 10...12 %. Помимо ванадия в золах содержатся в заметных количествах никель (3,2...4,0 %), сера (18...20 %), железо (до 1,0...1,5 %). Во всех пробах подтвердилось присущее ванадийсодержащей нефти соотношение  $V > Ni > Fe$ .

Содержание токсичных элементов ничтожно: мышьяк в среднем 0,002...0,006, кадмий – около 0,0003, уран – около 0,0002 % масс. Химический состав проб ЗШО различных партий и, следовательно, различных нефтяных месторождений, имел одинаковый набор элементов, незначительно отличаясь их количественным содержанием.

**Термическая обработка.** Нагрев ЗШО сопровождался интенсивным выделением газов с последовательно возрастающей потерей массы. Обжиг проводился при температурах 400, 600, 800, 850, 900 и 1000 °С. При этом происходила потеря массы от 30 % при 400 °С до 60 % по мере приближения к 1000 °С. Ей сопутствовало повышение содержания ванадия максимально до 36 %, никеля – с 4 до 7,8 %, железа – с 0,72 до 2,1 %. Одновременно содержание серы снижалось с 17 до 3...5 %. В интервале температур 400...800 °С «комки» оставались твердыми. Началом оплавления следует считать температуру около 850°С, полное же расплавление наблюдалось в интервале 950...1000 °С. В некоторых случаях ЗШО имели более высокий интервал температур плавления ~1100...1200 °С. Это не повышало степень обогащения по ванадию и никелю, но несколько снижало общее содержание серы (до 1,5...2,0 %).

Основой для построения схемы превращения веществ (табл. 7.3 и 7.4) послужили данные лабораторных термических испытаний, результаты химического, микропримесного и фазового анализов материала на различных стадиях его термообработки. В качестве гипотезы была принята версия о том, что источником магния в золе является морская вода и поэтому основным компонентом исходного материала «комков» является  $MgSO_4 \cdot nH_2O$  (где  $n \approx 1,15$ ), в котором часть атомов Mg может быть замещена атомами K, Na, Ca и др.

Таблица 7.3

## Баланс элементов ЗШО при термообработке при 850 °С

Содержание в исходном материале ЗШО, % масс.			Потеря массы при нагреве до ≈ 850 °С (% к исх.)	Материал после обжига при 850 °С, % масс.		
Элементов		Веществ		Расчетные параметры		Данные химического анализа
				% к исходному	% к обожженному	
Ванадий V	11,0	Сульфиды	Лабораторная – 53 2MgSO <sub>4</sub> + C → → 2MgO + + 2SO <sub>2</sub> ↑ + + CO <sub>2</sub> ↑ – 43 H <sub>2</sub> O↑ – 10,17 Итого потеря массы расчетная: 10,17 + 43 = 53,17	11	23,5	17,5
Никель Ni	4,0	и оксиды V,		4	8,54	3,9
Железо Fe	0,8	Ni, Fe – 22,68		0,8	1,71	0,8
Сера S	17,8	MgSO <sub>4</sub> – 60		1,8	3,84	3,4
Магний Mg	12,0			12	25,62	19,0
Кислород O	46,1	H <sub>2</sub> O – 10,17		13,08	27,93	–
Водород H	1,13			отсутствует		
Углерод C	4,6		1,6	3,42	3,8	
Кальций Ca	0,81	Входят в состав соединений магния				
Натрий Na	0,47					
Калий K	0,42					
Титан Ti	0,11		TiO <sub>2</sub> – 0,18			
Кремний Si	0,23		SiO <sub>2</sub> – 0,49			
Сумма макропримесей	2,37		2,37	5,06	–	
Li, Rb, Be, Al, P, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, Se, Sr, Mo, Ba, B, F, Cl, As, Sb, Sn						
Сумма микропримесей	0,18		0,18	0,38	–	

Приведенные данные подтверждают сформулированную гипотезу, что следует из высокой сходимости расчетных и практических данных:

## 1. По потере массы:

– для температуры термообработки  $\approx 850$  °С: расчетная – 53,17 % отн., практическая – 53 % отн.;

– для температур термообработки свыше 1000 °С: расчетная – 56,9 % отн., практическая  $\approx 60$  % отн.

## 2. По содержанию элементов:

– для температуры термообработки  $\approx 850$  °С: расчетное для S – 3,84 % масс., практическое – 3,4 % масс.; расчетное для C – 3,42 %, практическое – 3,8 % масс.;

– для температур термообработки свыше 1000 °С наблюдается высокая сходимость результатов для Ni, Fe, S, практически всех макро- и микропримесей.

Таблица 7.4

**Баланс элементов ЗШО при термообработке при 1000 °С**

Содержание в исходном материале (комки), % масс.		Потеря массы при нагреве до 1000 °С и выше, % к исх.	Материал после обжига при 1000 °С, % масс.		
Элементов	Веществ		Расчетные параметры		Данные химического анализа
			% к исходному	% к обожженному	
Ванадий V	11,0	Сульфиды и оксиды V, Ni, Fe – 22,68 MgSO <sub>4</sub> – 60 H <sub>2</sub> O – 10,17  Лабораторная – 60 Итого потеря массы: 53,17 + 3,73 = 56,9	11,0	25,52	36,0
Никель Ni	4,0		4,0	9,28	7,8
Железо Fe	0,8		0,8	1,86	2,1
Сера S	17,8		1,8	4,18	5,1
Магний Mg	12,0		12,0	27,84	2,0
Кислород O	46,1		10,95	25,40	–
Водород H	1,13		Отсутствует		
Углерод C	4,6		Отсутствует		
Кальций Ca	0,81	Входят в состав соединений магния TiO <sub>2</sub> – 0,18 SiO <sub>2</sub> – 0,49			
Натрий Na	0,47		0,47	1,09	
Калий K	0,42		0,42	0,97	
Титан Ti	0,11		0,11	0,26	
Кремний Si	0,23				
Сумма макропримесей	2,37		2,37	5,5	–
Li, Rb, Be, Al, P, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, Se, Sr, Mo, Ba, B, F, Cl, As, Sb, Sn			0,18	0,42	–
Сумма микропримесей	0,18				2,42*

\* Количество всех микропримесей возрастает в 2–3 раза (в среднем 2.42).

Таким образом, не обсуждая возможные превращения при минералообразовании, можно утверждать, что в интервале температур 100...850 °С происходит удаление гидратной влаги и разложение сульфатов с участием углерода органической части золы и выделением газов (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O). При дальнейшем нагреве вероятно восстановление части металлов (скорее всего ванадия и железа) из оксидов

оставшимся углеродом. Содержание ванадия в термообработанном продукте (с учетом возможных колебаний химического состава исходного материала золы) по расчетам составляет  $25 \pm 5$  % масс.

Отметим, что все исследованные ЗШО не отвечали классическому определению золы как несгораемого остатка в виде пыли, образующейся из минеральных примесей топлива при полном его сгорании», поскольку в них сохранялось значительное количество органической массы. На рис. 7.2 и 7.3 представлена микроструктура образцов ( $\times 200$ ) ЗШО, обожженных при температурах 600 и 850 °С [466].

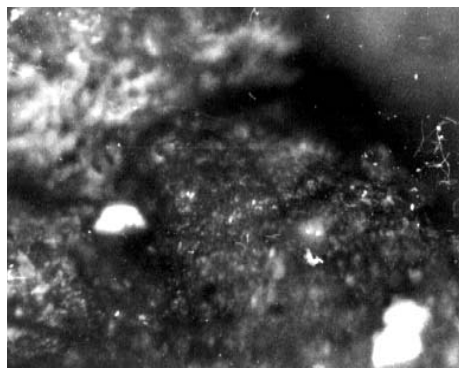


Рис. 7.2. Микроструктура образцов ЗШО, обожженных при температуре 600 °С.  $\times 200$

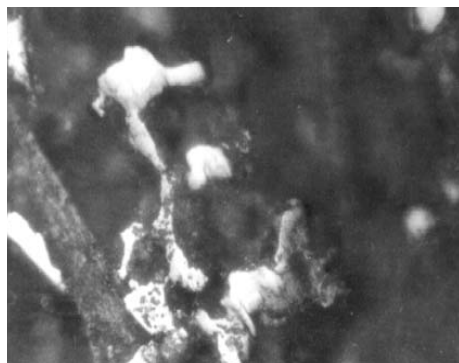


Рис. 7.3. Микроструктура образцов ЗШО, обожженных при температуре 850 °С.  $\times 200$

В первом случае на аншлифе практически не видно минеральных фазовых составляющих. Почти все поле заполнено темной органической массой с единичными проблесками мелких светлых ванадатов. При 800 °С ванадаты заметно укрупняются и количество их резко увеличивается.

**Окускование и брикетирование ЗШО.** На первом этапе исследования была предпринята попытка получения окатышей. Несмотря на добавку в шихту до 1,5 % бентонита, реализация различных режимов окомкования и сушки не позволила сохранить окатыши целыми. При сушке они либо вспучивались, принимая самые причудливые формы, либо большей частью просто разваливались.

На втором этапе был изучен процесс холодного прессования брикетов. Перед прессованием зола просушивалась при температуре 20...250 °С на воздухе; для этого ее насыпали тонким (не более 2 см) слоем на металлический поддон и выдерживали в проветриваемом лабораторном помещении в течение 3...4 ч. Просушенный материал перемешивался, дозировался и помещался в форму для прессования. Были исследованы различные режимы прессования для разных размеров и масс заготовок. Было установлено, что прочность прессовки, достаточная для перевозки материала в 100-кг полиэтиленовых мешках без разрушения может быть получена, если давление прессования составляет 0,5...1,5 МПа/см<sup>2</sup>. Оптимальной является цилиндрическая форма прессовки при отношении диаметра основания к образующей цилиндра 0,75...1,5 при массе прессовки до 0,5 кг. Достаточная прочность заготовок обеспечивается наличием в составе исходной золы пластического компонента, который позволяет проводить прессование без связующей добавки. Результаты лабораторных опытов были подтверждены промышленным экспериментом на производственном объединении «Полема» (г. Тула), в ходе которого было подготовлено около 200 кг прессовок из ванадийсодержащей золы ТЭС. По материалам исследования была подана заявка на изобретение и оформлен патент [467, 468].

**Влияние атмосферных осадков на прочность сырого и обожженного техногенного сырья.** Учитывая относительно высокие содержания в исследуемых партиях ЗШО таких элементов, как сера, магний и никель, нельзя было исключить наличие в золе сульфатов этих металлов. Поскольку эти соединения склонны к образова-

нию кристаллогидратов, решено было экспериментально проверить влияние атмосферных осадков на прочность сырых и обожженных «комков». Было проведено две серии опытов: первая, когда сырые и обожженные до температур ниже температур плавления комки помещались в стеклянный сосуд с водой. Несколько часов спустя комки теряли форму и на дне сосуда оставался бесформенный осадок. Во второй серии опытов две металлические тарелки с аналогичными пробами помещались на две недели на открытый воздух. За это время были зафиксированы осадки в виде дождя и снега. Результат тот же: полная потеря формы и прочности комков. Из этих опытов можно сделать важный для практики вывод: компактированные и обожженные ЗШО в твердом состоянии можно транспортировать только в полностью герметичной, влагоизолирующей упаковке.

**Обессеривание ЗШО.** Как отмечалось ранее, ЗШО всех партий содержат значительные количества воды и связанной серы. Поэтому при нагреве потеря массы образцов связана с обезвоживанием и обессериванием. Лабораторные опыты показали, что при нагреве и выдержке образцов ЗШО в области сравнительно невысоких температур (примерно до 400 °С) потеря массы составляет 30...40 %, что можно объяснить испарением основного количества гигроскопической влаги, содержащейся в ЗШО. Выдержка при температурах выше 500 °С показала что отделяющиеся газы имеют запах сернистых соединений. Это позволяет предположить, что начиная с 500°С происходят процессы обессеривания; об этом же свидетельствует увеличение потери массы. Интенсивное выделение газообразных соединений серы идет при всех температурах вплоть до температуры плавления ЗШО.

При температурах ниже 800 °С темп обессеривания невелик, снижение относительного содержания серы составляет от 20 до 40 %. Наиболее интенсивное снижение количества серы происходит в интервале 800...900 °С – практически в 3–5 раз от исходного. При более высоких температурах в твердом состоянии добиться более высокой степени обессеривания не удастся. Об этом свидетельствуют результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний. Кроме того, опыты показали, что полученные после обжига образцы имеют значительный разброс по содержанию серы. Это может объясняться как неоднородностью распределения серы в исходной золе, так и неодно-

родностью проработки образцов в процессе обжига, которая связана с наличием фракций различного размера, наличием или отсутствием пористости, различной толщиной слоя образцов и т.д.

При плавлении ЗШО идет дальнейшее обессеривание образцов. При выдержке в жидкой фазе при температурах, близких к температуре плавления, на воздухе в течение 1...2 ч содержание серы в золе падает до 0,5...1,0 % масс.

Лабораторные эксперименты показали, что существенную роль в процессах обессеривания играет кислородный потенциал атмосферы. Так, все вышеизложенные результаты были получены при обжиге на воздухе в нейтральных алундовых тиглях. Если обжиг проводился в графитовых тиглях (слабовосстановительные условия, кислородный потенциал ниже), обессеривание происходило более интенсивно. При этом тигель после обжига приобретал желтоватый оттенок, что указывает на образование в процессе обжига сероуглеродов.

Для исследования возможности глубокого обессеривания ЗШО в лабораторных условиях была проведена обработка образцов при температурах, на 100...150 °С превышающих температуру плавления. Образцы выдерживали в алундовых тиглях на воздухе, т.е. в окислительной атмосфере при температуре 1050...1100 °С. Толщина расплавленного слоя в опытах не превышала 5...10 мм. В результате 2-ч выдержки содержание серы упало до 0,03...0,05 %. Наличие такого количества серы даже при высоких температурах в расплаве можно объяснить присутствием в ЗШО стойких сульфатов типа  $MgSO_4$ , температура разложения которых составляет 1100...1200 °С.

Опыты по обессериванию свидетельствуют, что для достижения низкого содержания серы в ЗШО (не выше 0,1 %) необходимы:

- выдержка ЗШО в расплаве при температуре на 100...200 °С выше температуры плавления;
- обеспечение тонкого слоя расплава толщиной не более 10 мм;
- окислительная атмосфера; кроме того, при увеличении толщины слоя может потребоваться продувка расплава воздухом для лучшей «проработки» материала.

Проведенные исследования позволили предложить технологическую схему для переработки ЗШО с целью получения сырья для производства феррованадия или пентаоксида ванадия.

## **Глава 8. ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

### **8.1. Международный опыт организации авторециклинга**

Автомобилестроение является отраслью индустрии, в которой внедрение инновационных технологий осуществляется наиболее быстрыми темпами. В мире эксплуатируется более 800 млн автомобилей, около 8 % из них ежегодно выводятся из эксплуатации. В 2008 г. в мире было произведено 70,5 млн новых автотранспортных средств, в том числе легковых автомобилей – 52,6 млн единиц [470, 471].

Современный автомобиль имеет срок эксплуатации, который в первую очередь определяется моральным износом. Ежегодно примерно 50 млн автомобилей выводятся из сферы потребления. Также ежегодно в результате ремонта и технического обслуживания автомобилей образуется почти 50 млн т отходов и техногенных материалов. Наибольшие трудности для утилизации представляют неметаллические автомобильные компоненты. Это изделия из пластмассы, резины, стекла, обивка. Введенные в Европе и многих других странах мира законы и стандарты по экологической безопасности автомобилей распространяется и на стадию утилизации отслуживших автомобилей, их компонентов и материалов, требуя организации системы авторециклинга (см. гл. 1) [472, 473].

Утилизация старых автомобилей невозможна без развития инфраструктуры и законодательной базы для регламентации взаимодействия всех участников процесса и установления нормативно-правовых отношений. Наибольшие организационные проблемы вызывают первые шаги на пути утилизации отслуживших автомобилей – процессы оформления необходимых документов, передачи старых автомобилей в центры утилизации, сбор, транспортировка, проведение экологически безопасного демонтажа, слива эксплуатационных жидкостей. Чтобы система заработала, необходимо, чтобы владельцы старых автомобилей захотели их отдать, а центры приемки были готовы и заинтересованы их принять.

За последние 10–15 лет в большинстве промышленно развитых стран мира были организованы системы сбора и переработки изношенных автомобильных деталей и отслуживших автомобилей. В США, Канаде, Японии и Западной Европе ежегодно утилизирует-



ся около 35 млн автомобилей. Статистические данные европейских стран показывают, что общий объем ежегодно поступающих на переработку ВЭА в странах ЕС составляет более 10 млн т. Общеизвестно, что среди продукции массового производства легковые автомобили являются наиболее охваченными системой утилизации в конце жизненного цикла, несмотря на сложность конструкции и многообразие применяемых материалов (коэффициент вторичной переработки в некоторых странах достигает 85 % от массы автомобиля) [473–476].

Вместе с тем для России и многих других стран, не обладающих развитой системой авторециклинга, вышедшие из эксплуатации автомобили представляют серьезную экологическую проблему. В изношенном автомобиле содержатся: черные и цветные металлы, пластмассы и резинотехнические изделия, стекло и керамика, дерево и картон, текстильные и битумные материалы и др. Вышедшие из эксплуатации автомобили (ВЭА) сегодня представляют собой один из самых неблагоприятных факторов с точки зрения экологической, личной и общественной безопасности:

- ВЭА содержат опасные материалы и элементы: отработанные масла, свинец, кадмий, шестивалентный хром и т.п. Если автомобиль и его составные части не подвергаются переработке, эти компоненты попадают в почву, воду, и, следовательно, и в организм человека;

- брошенные автомобили могут использоваться террористами и психически больными людьми для закладывания в них взрывчатки или их поджога;

- известны случаи, когда ВЭА загораживали проезды к зданиям для машин скорой помощи, пожарных расчетов, что приводило к гибели людей;

- при горении ВЭА и автомобильных шин выделяются диоксины и фураны;

- оставленные на обочинах и во дворах ВЭА создают помехи механизированной уборке проезжей части, дорожному движению и приводят к ДТП;

- в крупных городах автотранспортные средства, подлежащие выведению из эксплуатации, используются под временные жилища бомжами, под стихийные помойки, что угрожает населению возникновением инфекционных заболеваний;

- брошенные разукomплектованные машины ухудшают архитектурный облик городов и являются настоящим бичом для российских мегаполисов [477–480].

Следует отметить, что в 90-х годах в Россию было ввезено огромное количество подержанных иномарок. В странах, где они производились, в цену автомобиля была заложена стоимость их переработки. В итоге эти деньги остались за рубежом, в то время как средства на переработку или захоронение автомобиля теперь должны изыскиваться в России.

В настоящее время индустриально развитые страны не только успешно зарабатывают на переработке отслуживших автомобилей, но и решают задачи по оздоровлению окружающей среды и экономии природных ресурсов планеты. Практически во всех экономически развитых странах на уровне правительств разработаны и действуют программы, которые включают мероприятия по квалифицированному обследованию (приемка, обработка) машин, демонтажу ВЭА на перерабатывающих предприятиях, повторному применению снятых деталей, переработке кузовов, захоронению неперабатываемых отходов (в основном пластика, ткани).

Обращение с ВЭА четко регламентируется нормативно-правовыми актами и контролируется государственными органами, регулируется экономически — предприятия несут ответственность за переработку выпущенной ими продукции. Необходимые средства на переработку отходов выделяются государством (за счет сбора налогов с владельцев автомобилей и фирм-импортеров) и аккумулируются в специальных экологических фондах на местном и федеральном уровне. На основании изучения опыта многих стран Европы можно сделать вывод о том, что передача отслужившего автомобиля на утилизацию должна осуществляться для его владельца бесплатно либо даже с использованием дополнительных стимулов (табл. 8.1) [470–476].

*Таблица 8.1*

**Примеры программ обновления автомобильного парка в странах Европы**

Страна	Стимул (субсидия), евро	Возраст ВЭА, лет, более	Условия применения субсидии к новым автомобилям
Австрия	1500	13	С нормами токсичности минимум «Евро-4»
Франция	до 5000	10	С эмиссией CO <sub>2</sub> не более 160 г/км
Германия	2500	9	С нормами токсичности минимум «Евро-4»
Португалия	1250	10 15	С эмиссией CO <sub>2</sub> не более 140 г/км
Люксембург	1750	10	С эмиссией CO <sub>2</sub> не более 120 г/км

Для снижения токсичности отходов все больше внимания при разборке автомобилей уделяют извлечению опасных химических материалов (например, тяжелых металлов, хлорсодержащих полимеров

и др.). Этому способствует соответствующая стандартизированная маркировка деталей на стадии их изготовления.

Особое внимание в последнее время уделяется переработке пластмасс, полипропилена, которые все больше используются в производстве автомобилей. Их переработка во вторичные материалы и использование с максимальной эффективностью возможны только после рассортировки по видам полимеров и по конкретным маркам пластмасс. Некоторые фирмы ввели с этой целью стандартизированную маркировку деталей из резины и пластмасс, позволяющую четко определить марку материала.

Специальные законы об авторециклинге приняты более чем в 50 странах мира. В 2008 г. мировая индустрия авторециклинга обеспечила занятость более 2 млн чел., а общая стоимость продукции авторециклинга превысила 200 млрд долл. В мире действует свыше 700 шредерных предприятий [470]. В Германии работает 47 шредеров, они перерабатывают в год 1,5 млн т материалов, в том числе до 900 тыс. т автомобильного лома. В США действует более двухсот подобных комплексов, которые перерабатывают 11 млн ВЭА. Авторециклинг позволяет возвращать в промышленность, %: около 98 стали, 98 чугуна, 95 алюминия, 95 свинца, 60 меди, 25 пластмасс [473–476].

**Законодательная база авторециклинга.** В Западной Европе за последние годы было принято множество постановлений и директив ЕС, национальных законов европейских стран, устанавливающих нормативы и требования по организации системы авторециклинга и обеспечения утилизации автомобильных компонентов и материалов. Основные европейские требования к обеспечению экологически безопасной утилизации автомобилей изложены в следующих документах:

- директива 2000/53/ЕС по утилизации отслуживших автомобилей;
- директива 2005/64/ЕС по одобрению типа транспортных средств в отношении их повторного использования, вторичной переработки и утилизации;
- постановление 2003/138/ЕС по маркировке автомобильных материалов и компонентов для целей утилизации;
- международный стандарт ISO22628 по проведению расчета коэффициентов рециклинга и утилизации автомобилей;
- постановления 2008/689/ЕС, 2005/673/ЕС, 2002/525/ЕС по запрету и ограничению применения тяжелых металлов (свинца, ртути,

кадмия и шестивалентного хрома) в автомобильных компонентах и материалах.

Многие положения носят унифицированный характер и обязательны для всех стран Евросоюза. Вместе с тем отдельные моменты по организации и финансированию системы авторециклинга индивидуальны для каждой страны. Значительная доля унифицированных требований и положений распространяется на производителей автомобилей, в том числе:

- выполнять установленные ограничения по применению регламентированных вредных веществ;
- предоставлять специальные каталоги для целей авторециклинга и руководства по сливу жидкостей и демонтажу компонентов отслужившего автомобиля;
- при одобрении типа нового автомобиля доказать, что обеспечен коэффициент утилизации минимум на 95 % массы автомобиля и коэффициент вторичной переработки (рециклинга) минимум на 85 % (без учета энергетической утилизации и сжигания).

**Опыт США.** В США принятый в 1976 г. Закон о борьбе с твердыми отходами (с поправками 1980 и 1984 гг.) устанавливает стандарты по обязательному минимальному содержанию вторичного сырья в товарной продукции. Наиболее важным экономическим стимулом переработки отходов во вторичное сырье является то обстоятельство, что утилизация становится в американских городах самым дешевым способом борьбы с отходами. В США запрещена организация новых открытых свалок, а захоронение и сжигание отходов с учетом соблюдения всех экологических норм оказывается в три раза дороже, чем переработка этих отходов во вторичное сырье. Во многих штатах приняты законы, согласно которым каждый округ под угрозой прекращения финансирования из фондов штата обязан к определенному сроку ввести рециклинг некоторой части отходов на своей территории. Повсеместно запрещено захоронение автомобильных аккумуляторов.

По данным Ассоциации переработчиков автомобилей США, рециклинг автомобилей с годовым оборотом свыше 5 млрд долл. занял 16-е место среди крупнейших отраслей промышленности Соединенных Штатов. Ежегодно в этой стране перерабатывается более 15 млн автотранспортных средств с общей массой более 20 млн т. Сбором, демонтажем, утилизацией занимается более 20 тыс. малых предприятий, после кото-

рых автомобильные остатки поступают на один из шредерных заводов, которых в стране более двухсот. Коэффициент вторичной переработки старых автомобилей в США в среднем составляет 82...83 % [470].

**Опыт Германии.** Парк автомобилей в Германии превышает 50 млн, из них более 43 млн – легковые автомобили. Автомобильная промышленность играет важную роль в экономике страны, составляя большой вклад в ВВП и обеспечение населения рабочими местами. В стране действует Федеральный закон «Об экономическом рециклинге Германии» (от 7 октября 1996). Данный закон сегодня многими экспертами признан образцом в вопросах организации авторециклинга. Основная идея заключается в том, что недостаточно сформировать правовые инструменты по проведению рециклинга, определить необходимые стандарты и нормы для установок, стоянок, способов маркировки деталей и обеспечить контроль потоков отходов к установкам по переработке и утилизации. Гораздо важнее обязать производителей уже на стадии разработки продукции добиваться уменьшения количества будущих отходов. В Законе особо отмечается, что преимущества вторичного использования перед уничтожением действуют не всегда. Поэтому материалы передаются на вторичную переработку только в том случае, если это возможно технически, а так же экономически и экологически оправдано. В противном случае отходы уничтожаются:

- когда их уничтожение является решением, более приемлемым с экологической точки зрения;
- когда стоимость переработки отходов оказывается гораздо больше стоимости конечной произведенной продукции или сырья.

Параграф 22 Закона возлагает существующую для реализации целей экономического рециклинга ответственность за продукцию на того, кто разрабатывает, изготавливает, обрабатывает, перерабатывает или реализует изделия. Законом определены механизмы отчетности о проведении процедуры уничтожения отходов; структура системы рециклинга; определены потоки отходов [473, 474].

В Германии действует система рециклинга шинного утиля Regulant-6000 – рациональная комбинация новейших технологий. Шинный утиль поставляет на перерабатывающий завод фирма, которая централизованно занимается сбором и транспортировкой этого сырья. Заказчиками являются промышленные предприятия, свалки, торговые фирмы, продающие автомобили.

В настоящее время специально сформированная проектная группа «Утилизация автомобилей» компании BMW разрабатывает всеобъемлющую концепцию вторичного использования деталей автомобилей после 2015 г. Концепция учитывает необходимость утилизации уже на стадии проектирования. Разбираемые модели автомобилей уже сейчас удастся использовать повторно почти на 95 %. Масло, антифриз, бензин идут на переработку или в качестве топлива на ТЭЦ. Демонтированные элементы, пригодные в качестве запчастей (стекла, двери, сиденья) продаются примерно вдвое дешевле новых. Разделенные по видам материала детали измельчаются, прессуются и идут в переплавку. Мелкие пластиковые детали, разборка которых трудоемка, используются в качестве топлива [474].

В настоящее время немецкая сеть по сбору и утилизации ВЭА состоит из более 15 000 пунктов приема, 1200 фирм разборки и демонтажа ВЭА и 47 шредерных предприятий.

Многие мировые производители автомобилей, имеющие небольшой объем продаж на территории Германии не создают собственную инфраструктуру по сбору и утилизации отслуживших автомобилей своих марок. Так, фирма LADA Automobile GmbH, являющаяся официальным импортером автомобилей LADA на территории Германии, заключила соглашение с компанией PAPE GmbH на проведение сбора и утилизации всех отслуживших автомобилей LADA, а также демонтированных при ремонтах деталей и упаковки от запчастей. Для этих целей LADA Automobile GmbH резервирует в соответствии с требованиями закона средства на оплату будущей утилизации автомобилей LADA в размере 100 евро на один автомобиль [473].

**Опыт Японии.** Парк автомобилей в Японии составляет около 80 млн единиц, количество ежегодно снимаемых с регистрации транспортных средств достигает 5 млн. Из них примерно 1 млн составляет экспорт поддержанных автомобилей в другие страны. До недавнего времени в сегменте демонтажа ВЭА в основном присутствовали маленькие фирмы с несколькими работниками, которые в среднем демонтировали примерно по 1 тыс. автомобилей в год. Однако в последние годы стали активно создаваться интегрированные компании [475, 476].

Принятый в 2002 г. закон о ВЭА вступил в силу с 1 января 2005 г. Закон установил следующие основные положения:

– производители автомобилей или импортеры обязаны забрать, обработать и переработать три основных компонента:

1) CFCs (фреоны), которые используются в системах кондиционирования и влияют на озоновый слой Земли при попадании в воздух;

2) надувные подушки безопасности, которые являются взрывоопасными;

3) шредерные остатки, которые в большом количестве остаются после переработки ВЭА;

– владельцы транспортных средств платят взносы, требуемые для рециклинга ВЭА, достаточные, чтобы демонтировать и переработать системы надувных подушек безопасности и фреоны, а также утилизировать шредерные остатки. Эти взносы собираются при покупке новых автомобилей или когда автомобили проходят обязательные периодические осмотры;

– после завершения эксплуатации автомобиля владельцы должны направить ВЭА в сертифицированные центры приема;

– производители автомобилей еще на стадии проектирования должны учитывать аспекты их последующей утилизации, в том числе разрабатывая и применяя новые конструкционные решения, компоненты и материалы автомобилей, чтобы сократить расходы на рециклинг.

Производители автомобилей обязаны также предоставлять подробную информацию компаниям-утилизаторам об автомобильных компонентах и материалах, чтобы облегчить их рециклинг.

Основой успешного выполнения закона стал специальный орган, сертифицированный Министерством экономики, торговли и промышленности и Министерством охраны окружающей среды. В соответствии с установленной Законом системой необходимая сумма для обеспечения утилизации ВЭА оплачивается покупателем при покупке нового автомобиля. Эта сумма в среднем составляет около 10...18 тыс. иен за автомобиль; ее конкретный размер устанавливается производителем (импортером) автомобиля, но должен согласовываться с контролирующими органами. Данный налог на утилизацию поступает в специальный фонд авторециклинга [475].

На первой стадии переработки ВЭА происходит их сбор и доставка на предприятия по демонтажу, где осуществляются оценка и сортировка, удаляются бензин, масла, жидкости и другие вредные вещества, которые запрещены для размещения на свалках. С ВЭА

демонтируются также компоненты, представляющие ценность или используемые как запчасти. В среднем около 20...25 % массы ВЭА демонтируется как запчасти для последующей продажи сразу или после восстановления, около 15 % массы демонтируется для вторичной переработки материалов, после чего эти и другие компоненты направляются на сертифицированные предприятия по утилизации. Оставшаяся часть ВЭА (в среднем 60...65 % массы автомобиля) поступает для измельчения и дальнейшей переработки на шредерные заводы. Образующиеся шредерные остатки подвергаются либо тепловому рециклингу (извлечение энергии), либо захоронению на свалках. Стоимость размещения 1 т таких отходов на свалках Японии высока и составляет 20...25 тыс. иен в зависимости от префектуры. Кроме того, существует проблема нехватки полигонов для размещения отходов, поэтому все большее развитие получают технологии вторичной переработки шредерных отходов.

Согласно технической документации, в 2008 г. на шредерные предприятия поступило приблизительно 4,7 млн транспортных средств. При их переработке было произведено 800 тыс. т шредерных отходов. Применение новых технологий в Японии повысило суммарную степень утилизации ВЭА до 96 % [470, 475, 476].

**Опыт Голландии.** Общеизвестно, что в Нидерландах удалось сформировать наиболее эффективную систему авторециклинга, которая позволила решить практически все вопросы, связанные с утилизацией отслуживших автомобилей. Коэффициент переработки ВЭА в этой стране – самый высокий в Европе (более 86 %), а главное – финансирование этой системы с каждым годом требует все меньше дополнительных ресурсов [473, 474].

Парк автомобилей, находящихся в эксплуатации в Голландии, в 2009 г. составил 8,4 млн (7,5 млн легковых автомобилей и 0,9 млн грузовиков). Средний возраст парка транспортных средств составляет 8,1 года.

В начале 90-х годов несколько организаций при участии правительства и автомобильной промышленности Нидерландов объединились, чтобы создать некоммерческий фонд Auto and Recycling Foundation и сформировать общенациональную систему переработки и утилизации отслуживших автомобилей. Для выполнения поставленных задач была создана компания Auto Recycling Nederland (ARN), 100 % акций



которой принадлежит фонду Auto and Recycling. Рециклинг всех ВЭА финансируется на основе установления единой оплаты за утилизацию любого автомобиля. Сумма взноса на утилизацию устанавливается сроком на три года и является одинаковой для любой марки и типа автомобиля, так как согласно данным ARN стоимость демонтажа и рециклинга ВЭА примерно одинакова для разных классов автомобилей и устанавливать дифференцированную оплату не имеет смысла [473].

Система авторециклинга в Нидерландах начала работать с 1 января 1995 г. В течение первого трехлетнего периода сумма взноса за утилизацию составляла 113 евро за автомобиль, второго периода – 68 евро. С 2000 г. до настоящего времени установленная сумма взноса остается на уровне 45 евро на автомобиль. Производители или импортеры платят взнос за утилизацию за каждый автомобиль, который впервые регистрируется в Нидерландах, независимо от марки или модели. В случае частного импорта автомобиля на территорию Нидерландов оплата производится непосредственно дилером или частным лицом. Все деньги, собранные в результате такой оплаты, депонируются в фонде Auto and Recycling Foundation.

Установленная сумма в 45 евро на автомобиль была основана на комплексном расчете. Наиболее важные слагаемые в расчетах – средний состав применяемых материалов в автомобиле, средняя стоимость демонтажа и рециклинга компонентов и материалов, ожидаемое число образующихся ВЭА и автомобилей, уходящих на экспорт за пределы страны, ожидаемое число новых автомобилей для регистрации в Нидерландах. Другая важная составляющая расчетов – степень, в какой ранее сформированные денежные запасы были использованы для выплаты существующих премий фирмам-партнерам. Например, расчеты, проведенные в 2000 г. при установлении новой суммы взноса за утилизацию автомобилей, показали, что общая стоимость затрат составляет около 87 евро на один ВЭА (71 евро – затраты на демонтаж компонентов; 13 евро – затраты на сбор и упаковку и 3 евро – затраты на рециклинг).

Постепенное сокращение налога на утилизацию было достигнуто в результате соблюдения со стороны ARN жестких принципов в организации системы авторециклинга, контроля за ее выполнением, сокращения расходов на сертификацию новых компаний-партнеров. Кроме того, в рассматриваемом периоде имело место значительное

превышение количества вновь регистрируемых автомобилей над количеством автомобилей, ежегодно поступающих на утилизацию, в том числе и в результате роста экспорта подержанных автомобилей. В результате налог на утилизацию в размере 45 евро на автомобиль в настоящее время является невысоким и составляет менее 0,25 % от средней цены нового транспортного средства. По данным проведенных в стране многочисленных социологических опросов никто из продавцов и покупателей в Нидерландах не считает такой налог несправедливым, поэтому в стране не существует ни организационных, ни моральных проблем с его сбором.

В 2006 г. Департамент дорожного транспорта Нидерландов снял с регистрации 484 тыс. автомобилей. В этом же г. взнос за утилизацию был оплачен для более 560 тыс. автомобилей и легких грузовиков. Из 234 тыс. ВЭА в Голландии в 2006 г. в системе, управляемой ARN, было демонтировано и утилизировано более 90 %.

Отмечая фактический успех формирования системы авторециклинга, достигнутый в Нидерландах, следует отметить, что ему способствовали следующие факторы:

- отсутствие взимания платы с владельца автомобиля при сдаче на утилизацию;
- взимание налога на утилизацию происходит на стадии продажи нового автомобиля, оплату производит официальный дилер автомобиля;
- организация эффективной системы мониторинга, основанной на применении компьютерных баз данных;
- наличие системы снятия с регистрации автомобилей, когда обязательным является представление либо сертификата об утилизации, либо сертификата об экспорте: владелец автомобиля не освобождается от оплаты налога на автомобиль, пока не представит один из данных документов;
- отсутствие преимуществ незарегистрированного экспорта автомобиля;
- управление и контроль системы авторециклинга в стране осуществляются специально созданным для этого органом, который также обеспечивает финансирование всех затратных операций при сборе и утилизации отслуживших автомобилей.

Всего за несколько лет Голландии удалось создать мощную индустрию авторециклинга; в настоящее время в этой стране работает

около 700 аккредитованных пунктов приема ВЭА и более 260 предприятий по их разборке, эксплуатируется 11 шредерных установок, что позволило создать много новых рабочих мест. Все участвующие в процессе утилизации ВЭА компании имеют лицензии и соблюдают требования законодательства в области охраны окружающей среды. Получаемые вторичные материалы повторно используются в производстве, происходит существенное уменьшение количества депонируемых отходов [473, 474].

## **8.2. Современная технологическая схема авторециклинга**

В развитых странах используется следующая принципиальная технологическая схема переработки амортизированных автомобилей:

- слив с помощью мобильных установок топливно-смазочных материалов, освобождение бензобаков, тормозной, отопительной, охлаждающей систем от взрывоопасных и токсичных жидких материалов;

- разукomплектование автомобилей с предварительной сортировкой на черные и цветные металлы, стекло, пластмассу, резину. Применяют мобильные прессы для прессования кузовов автомобилей на площадках их временного хранения для более эффективной загрузки автомобильного лома при транспортировке на перерабатывающие предприятия;

- измельчение непригодных для использования деталей автомобилей на шредерных установках роторного типа, очистка их от пыли и грязи, сортировка и отделение неметаллических частей;

- брикетирование вторичных материалов из амортизированных автомобилей с применением мобильных прессов;

- для переработки лома автомобилей, рама которых изготовлена из деформируемых алюминиевых сплавов, применяется процесс импульсного распыления. Он позволяет получать гранулы алюминиевого сплава размером 0,325...0,550 мм для последующей обработки методами порошковой металлургии [470, 473, 481].

**Шредирование.** Шредерная установка (рис. 8.1) состоит из загрузочного устройства; дробилки; комплекса оборудования для сортировки, включающего воздушный и магнитный сепаратор; системы конвейеров; электропривода и гидропривода; системы пылеулавливания;

пульта управления. Загрузочное устройство включает опрокидывающий лоток и подающие валки. Автомобиль краном ставится на пластинчатый транспортер, которым подается в загрузочное устройство. После переворачивания лотка автомобиль поступает на вход дробилки. На входе приводные валки захватывают кузов, сминают его и подают на дробление [481].

После шредирования получают фракции:

- шрот – крупные куски черных металлов;
- магнитную фракцию – мелкие куски черных металлов;
- легкую фракцию (неметаллические материалы с низкой плотностью);
- фракцию, в которую входят цветные металлы: алюминий, цинк, медь, и нержавеющая сталь.

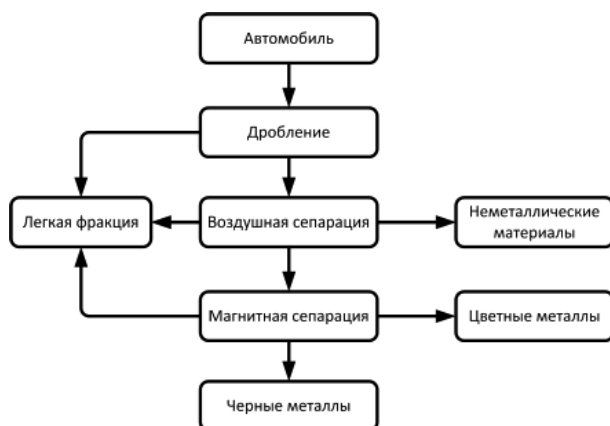


Рис. 8.1. Процессы и материалы шредерной переработки

При измельчении автомобиля образуется большое количество пыли полимерных и текстильных материалов, имеющих в машине, взрывоопасные смеси масел и остатков топлива, которые остаются после удаления их при подготовке автомобиля к утилизации. Для предотвращения возгорания и взрывов применяются защитные меры:

- подача инертных газов;
- подача воды в распыленном виде в рабочее пространство дробилки;
- использование в конструкции дробилки отсасывающих устройств.

Измельченные материалы кузова отводятся из дробилки вибрационным конвейером в шахту воздушного сепаратора для разделения металлической и неметаллической фракций. Очистка стального лома от небольших частиц цветных металлов и неметаллических примесей производится в барабанном сепараторе с помощью воздушного потока. После отделения более легких фракций в воздушном сепараторе тяжелые частицы вибрационным питателем подаются на ленточный конвейер, где с помощью магнитного сепаратора происходит отделение частиц черных металлов.

Очистка воздуха осуществляется сухим и мокрым способами. Воздух вначале очищается с помощью циклонов и мультициклонов со спиральными отводами воздуха. Дальнейшая очистка происходит в скрубберах. Пыль из циклона и шлам из скрубберов загружаются в контейнеры для дальнейшей переработки либо для захоронения.

Для разделения цветных металлов авторециклинга в промышленно развитых странах используются магнитные и магнитно-импульсные сепараторы. Их применение решает проблему извлечения цветных металлов с размерами частиц менее 50 мм при одновременном разделении меди и алюминия с эффективностью 97,0 % [482]. Шредерная пыль представляет собой фракцию размером до 3 мм. Как правило, легкая фракция, шредерная пыль и мусор утилизируются совместно под общим названием «легкая» фракция [483].

**Утилизация легких фракций шредирования вдуванием в доменную печь.** При переработке отслуживших автомобилей в шредерах около 25...30 % массы автомобиля выделяется в легкую фракцию. Она состоит из различных групп материалов: термопластов, полиуретана, поливинилхлорида, эластомеров, дерева, волокнистых материалов и материалов обшивки, а также стекла и керамики. Теплота сгорания – от 3,85 до 16 МДж/кг. Ниже приведен средний состав автомобиля по группам материалов, %:

Термопласты, не содержащие хлора, в основном полипропилен, полистирол, акрилбутадиенстирол, полиэтилен, полиамид . . . . .	15
Поливинилхлорид (в основном пленка, искусственная кожа, оболочка кабелей, защита дна пола кузова). . . . .	7
Полиуретан (вспененный) . . . . .	8
Другие термопласты. . . . .	4

Эластомеры (резина из матов, манжет и т.п.) . . . . .	9
Дерево и материалы на основе целлюлозы (дерево, картон, бумага и т.п.) . . . . .	5
Другие волокнистые материалы и материалы обшивки (текстильные волокна, стеклянные волокна, кожа и т.д.) . . . . .	7
Лаки . . . . .	4
Стекло и керамика . . . . .	15
Черные металлы . . . . .	13
Медь . . . . .	2
Алюминий . . . . .	4
Другие компоненты и посторонние материалы (песок, пыль, ржавчина и т.д.) . . . . .	7

Морфологический состав пыли шреддинг-установок характеризуется следующими данными, % масс.:

Пластмассы	
термопласты . . . . .	18...23
поливинилхлориды . . . . .	5...6
пены . . . . .	5...8
эластомеры . . . . .	17...20
Металлы	
черные . . . . .	10...15
цветные . . . . .	8...13
Другие материалы	
целлюлоза, дерево, картон . . . . .	3...4
текстиль, стекловолокно, кожа . . . . .	6...8
лаки . . . . .	до 3
стекло и керамика . . . . .	10...15

Химический состав легкой фракции из дезинтеграторов приведен ниже, % масс.:

Общая влага . . . . .	5...15
Остаток после прокаливания . . . . .	25...65
Углерод . . . . .	20...45
Водород . . . . .	2...6
Азот . . . . .	0,5...1,0
Сера . . . . .	0,4...0,7
Хлор . . . . .	0,5...3,0
Фтор . . . . .	0,03...0,05

Первые промышленные опыты по вдуванию в доменную печь легкой фракции шредирования в количестве до 150 кг/т чугуна были проведены в доменном цехе фирмы ЕКО Stahl GmbH в Айзенхюттенштадте при сотрудничестве Института технологии чугуна и стали Фрайбергской горной академии, фирм Stein Injection Technology (Гевельсберг) и Carbofer Verfahrenstechnik (Меербуш). При вдувании легкой фракции концентрация тяжелых металлов в сточных водах не превышала допустимых пределов, не было отмечено никакого повышения содержания диоксинов и фуранов.

В Японии для подготовки отходов шредирования к вдуванию в доменные печи специально разработан процесс Thermo-bath [484]. Он осуществляется в реакторе, наполненном маслом, которое получают из каменноугольной смолы коксохимического производства. По разнице в удельной массе отходы разделяются на легкие фракции (пластмассы) и осадок (металлы, стекло, песок); поливинилхлорид дехлорируется.

**Утилизация автомобильных шин.** В последние годы большое внимание уделяется проблеме использования изношенных шин, которые являются одним из самых многотажных отходов. Решение проблемы использования изношенных шин имеет важное экологическое значение, поскольку вышедшие из эксплуатации шины в огромных количествах накапливаются в местах их применения (в автохозяйствах, на аэродромах, промышленных и сельскохозяйственных предприятиях, горно-обогатительных комбинатах и т.д.). Вывозимые на свалки или рассеянные на окружающих территориях шины длительное время загрязняют окружающую среду вследствие высокой стойкости к воздействию внешних факторов (солнечного света, кислорода, озона, микробиологических воздействий). Места их скопления, особенно в регионах с жарким климатом, служат благоприятной средой обитания и размножения ряда грызунов и насекомых, являющихся разносчиками различных заболеваний. Кроме того, шины обладают высокой пожароопасностью, а продукты их неконтролируемого сжигания оказывают крайне вредное влияние на окружающую среду: почву, воду, воздушный бассейн [485–489].

Возвращение в производство продуктов переработки изношенных шин, содержащих большое количество армирующих текстильных и металлических материалов, а также резины, технические свойства ко-

торой близки к первоначальным свойствам, является источником экономии природных ресурсов. Среднестатистический состав типичной шины, %:

Смесь резины .....	86
Стальная проволока .....	10...15
Текстильное волокно .....	0,5...4

Сжигание изношенных шин признается энергетически неперспективным, так как для изготовления легкой шины требуется энергия, содержащаяся в 35 л нефти, а при ее сжигании возвращается энергия, эквивалентная лишь 8 л нефти. Однако сжигание шин в цементных печах снижает загрязнение окружающей среды и в ряде случаев экономически выгодно [485, 489].

Предложено много способов переработки автомобильных шин [486–488]. В промышленности нашли применение следующие:

- механическое дробление и измельчение резины;
- измельчение после предварительного замораживания резины (криогенное);
- тепловая переработка (пиролиз, термолиз);
- баромеханическое измельчение.

В результате механической переработки изношенных автопокрышек получают резиновый порошок, который используется для получения антикоррозионных мастик, гидроизоляционных материалов, герметиков для изготовления бесшовной кровли, эластичного наполнителя для строительства автомобильных дорог, основы для обуви, составляющей для новых автопокрышек, звукоизоляционной пористой плиты для домов.

Оборудование для различных способов механической переработки шин окупается в течение от года до трех лет [485, 488]. Несмотря на увеличение стоимости работ (от 10 до 100 %) резиноасфальт имеет большую износостойкость и морозостойкость, в 1,5–2 раза снижает шум и тормозной путь автомобиля. Билль о транспорте (США) поддерживал применение резиноасфальта, что позволило использовать до 30 % изношенных шин.

В странах ЕС восстанавливается около 15 % использованных шин для легковых машин. Зарубежные исследования показали, что шины практически не загрязняют воду и их прогнозируемая долговечность в спокойной воде достигает сотен лет, поэтому их применяют при соз-



дании искусственных нерестилищ для рыб, а во Франции – для усиления грунта. Кроме того, переработанные шины применяются:

- для гидроизоляции мостов и труб (в том числе при нефтедобыче);
- для защиты от эрозии почв и берегов;
- при строительстве мостов и водопропускных коллекторов в дорожной индустрии;
- для создания звукоизолирующих ограждений – экранов на автодорогах;
- для усиления слабых грунтов в инженерных сооружениях широкого профиля;
- при изготовлении транспортных лент, резиновых шпал для рельсовых путей в шахтах, изоляции электрических кабелей.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что, в передовых индустриально развитых странах развитие законодательства в области авторециклинга имеет приоритетный характер; автомобили как вторичные ресурсы рассматриваются отдельно от других видов техногенного сырья. Законодательство в области авторециклинга развивается очень интенсивно и содержит конкретные количественные параметры переработки различных видов материалов, используемых в автомобилестроении.

Шредерная переработка автомобильного лома кардинально решает проблему получения габаритного, готового к использованию в сталеплавильных агрегатах лома и является наиболее современным и пока единственным способом эффективной переработки автомобильного металлолома. Необходимо отметить большое количество шредерных установок в западных странах (которые используются главным образом для переработки отслуживших свой срок автомобилей). В странах Евросоюза число таких агрегатов составляет 40–50 шт., в США и Японии – 200 шт.

Опыт развитых стран показывает, что при грамотной организации авторециклинга свыше 85 % массы ВЭА возвращается в производство (не обязательно автомобильное), в том числе, %: почти 98 стали, чугуна, 95 алюминия, 60 меди, 25 пластиков, 30 материалов шин и эластиков, 40 стекла и керамики.

При рециклинге автомобильных отходов образуются «вторичные техногенные материалы», прежде всего пыли, содержащие тяжелые цветные металлы, утилизация которых представляет собой самостоятельную сложную проблему. Для ее решения, в частности, успешно применяются металлургические технологии, например вдувание в доменную печь пыли из дезинтеграторов.

В настоящее время во всем мире четко прослеживается тенденция увеличения в амортизационном ломе доли шрота от переработки ВЭА и ЭЭО. Доля автомобильного шрота в общих ресурсах амортизационного лома некоторых стран достигает 15...20 % и продолжает увеличиваться.

### 8.3. Оценка ресурсов авторециклинга в России

*Анализ состояния автомобильного парка РФ.* В последнее время на российском рынке наблюдался устойчивый рост объемов продаж новых легковых автомобилей. 2008 г. стал рекордным как с точки зрения относительных значений (рост 22,9 %) так и абсолютных – рынок вырос более чем на 330 тыс. машин. Всего в 2008 г. в России было продано 1 млн 772,5 тыс. легковых автомобилей. В этом же году количество автомобилей, изготовленных непосредственно в России, превысило 1,54 млн единиц. В том числе было собрано 1,17 млн легковых автомобилей (рост 9,8 %), 248,2 тыс. грузовых машин (рост 20,3 %) и 79,7 тыс. автобусов (рост 1,7 %) [490].

По состоянию на 1 января 2009 г. на учете в ГИБДД РФ числилось округленно 41,2 млн автотранспортных средств [490]. Примерно 11,6 % из них находится в собственности юридических лиц, остальная автомобильная техника принадлежит частным лицам. На долю легковых автомобилей приходится примерно 78 % от всего парка автомобилей, грузовые занимают около 13 % парка, доля автобусов составляет около 2 %, остальное – мототранспорт. Наиболее старыми в парке являются грузовые автомобили. На долю грузовиков старше 10 лет приходится более 60 %, легковых такого же возраста – 48,9 %. Структура автомобильного парка России представлена ниже:

	%	тыс. ед.
Легковые автомобили.....	78	32 200
Грузовые автомобили.....	13	5 350
Автобусы.....	2	894
Мототранспорт.....	7	2 940
Всего.....	100	41 200

Почти половина (48 %) легковых автомобилей в стране приходится на долю марки Lada. Парк легковых иномарок в России составляет 8,3 млн единиц. Прирост новых автомобилей идет значительно более

быстрыми темпами, нежели выбраковка (снятие с учета по состоянию непригодному для дальнейшей эксплуатации) старых. Соответственно, достаточно быстро меняется и возрастная структура парка. Так, если по состоянию на начало 2008 г. легковых автомобилей иностранных марок в возрасте до трех лет на территории России насчитывалось чуть более 2 млн шт. (30,2 %), то к концу года по оценке аналитического агентства их число выросло до 3,1 млн единиц (37,6 %).

Анализируя марочную структуру парка новых машин, можно выделить очень высокую долю тех марок, которые ранее не имели большой популярности в России, а начали активно продаваться именно в последнее время: Chevrolet (82,5 %), Hyundai (74,6 %), Kia (65,6 %), Citroen (64,4 %), Renault (56,8 %), Daewoo (51,1 %). Доля достаточно новых автомобилей по этим маркам превышает половину от общего количества. Практически 100 % парка автомобилей китайских марок находится в возрасте до трех лет.

Если рассмотреть марочную структуру старых машин (в возрасте старше 10 лет), на долю которых в России сейчас приходится около 30 % парка иномарок, то можно выделить следующие тенденции. Наиболее возрастным и соответственно изношенным является парк автомобилей европейских марок, популярных у российских автолюбителей в 90-е годы. Это в первую очередь немецкие модели Audi, среди которых в возрасте старше 10 лет насчитывается 63,3 % парка, а также Opel (58,4 %), Volkswagen (56,6 %), BMW (51,7 %) и Mercedes-Benz (49,9 %).

Велика в России доля старых автомобилей итальянской марки Fiat (61,3 %). Это объясняется отсутствием продаж новых автомобилей в последние несколько лет. Благодаря огромной популярности в середине 90-х годов машин шведской марки Volvo, более половины (52,6 %) парка этой марки находится сейчас в России в «престарелом» возрасте. Лидер российского иностранного автопарка – марка Toyota, половина автомобилей которой находится в возрасте старше 10 лет. В целом парк иномарок выглядит значительно более свежим, нежели парк отечественных машин. На начало 2009 г. его средний возраст составлял примерно 8,7 года [490].

В целом количество вышедших из употребления автомобилей в России в 2005–2008 гг. оценивается около 1,1 млн единиц в год (официальная статистика, естественно, отсутствует). В индустриально развитых странах количество ВЭА в это же время составляло: Евросоюз и США – около 12 млн, Япония – свыше 10 млн единиц в год. В табл. 8.2

приведено содержание материалов в типовых автомобилях, наиболее широко представленных в автопарке России [470, 473, 491].

Таблица 8.2

**Содержание материалов в типовых автомобилях,  
наиболее широко представленных в автопарке России, % масс.**

Материал	Типовой американский автомобиль	Типовой европейский автомобиль	Типовой японский автомобиль	BA3-2109
Черные металлы	67	65	72,2	64
Пластмассы	8	12	10,1	9,7
Стекло, керамика	2,8	2,5	2,8	3,4
Резина	4,2	6	3,1	6,7
Масла и смазки	6	2,5	3,4	5,1
Цветные металлы	8	8	6,2	6,0
Другие материалы	4	4	2,2	5,1
Масса, кг	1438	1210	1270	952

**Оценка основных вторичных ресурсов авторециклинга.** Определим количество ресурсов, которые может дать авторециклинг в России по состоянию на начало 2010 г. Примем следующие исходные данные:

– коэффициент сбора автомобилей для утилизации составляет 80...85 % (для дальнейших расчетов принимаем 85 %);

– шины, аккумуляторы и другие легкодемонтируемые узлы и агрегаты изнашиваются и заменяются новыми на протяжении всего жизненного цикла автомобиля (аккумуляторы – 4 шт. за время эксплуатации, покрышки 16);

– потери металлов в результате истирания и коррозии составляют 5 %.

При принятых исходных данных и допущениях количество потенциальных ресурсов авторециклинга для условий 2009 г. составляет примерно 1270 тыс. т:

	Доля от общей массы ВЭА, % масс.	Количество, тыс. т/год
Черные металлы . . . . .	68,0	863,6
В том числе:		
сталь углеродистая . . . . .	–	388,6
сталь нержавеющая . . . . .	–	302,3
чугун . . . . .	–	172,7
Цветные металлы . . . . .	7,0	88,9
В том числе:		

алюминий . . . . .	—	36,5
медь . . . . .	—	19,6
хром . . . . .	—	6,2
цинк . . . . .	—	5,3
Пластмассы . . . . .	10,0	127,0
Резина . . . . .	9,0	114,3
Стекло . . . . .	4,0	50,8
Прочие материалы . . . . .	2,0	25,4
И т о г о . . . . .	100	1270

Предположим, что собранные ВЭА подвергаются переработке с помощью технологий шредирования, апробированных в передовых промышленных странах. В этом случае, в результате шредирования будут получены вторичные материалы в количестве приведенном ниже, тыс. т:

Поступает на переработку, всего . . . . .	1290
В том числе:	
демонтируемые детали (аккумуляторы, покрышки, двери, крышки капота и багажника, колеса, трансмиссия, бампер) . .	170
мусор . . . . .	20
Поступает в шредер . . . . .	1100
Получается в результате шредирования:	
шредерный лом (шрот) . . . . .	532
в том числе:	
черные металлы . . . . .	510
цветные металлы . . . . .	20
неметаллические материалы . . . . .	2
цветной лом . . . . .	190
В том числе:	
цветные металлы . . . . .	178,5
черные металлы . . . . .	10
неметаллические материалы . . . . .	1,5
Легкая фракция . . . . .	301
В том числе:	
неметаллические материалы . . . . .	293
черные металлы . . . . .	3
цветные металлы . . . . .	5
Уловленная пыль и мусор . . . . .	69
Неуловленная пыль . . . . .	8

С учетом современного состояния и динамики развития автомобильного парка России, при сборе 85 % ВЭА к 2025 г. образование

лома черных металлов от авторециклинга достигнет 42 млн т, цветных – 3,9 млн т (рис. 8.2) [492, 493].

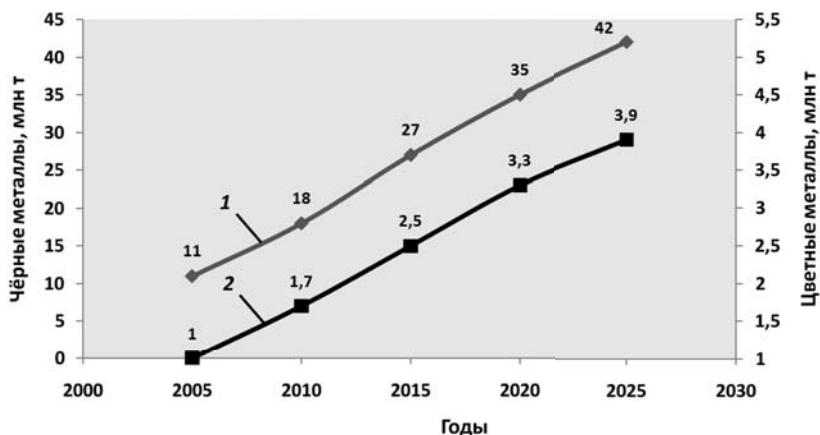


Рис. 8.2. Динамика увеличения техногенных запасов черных (1) и цветных (2) металлов, содержащихся в автомобильном ломе

Примем, что объем экспорта металлолома из РФ не изменится и поэтому не повлияет на баланс вновь образующегося автомобильного лома. Тогда все вновь образующиеся техногенные материалы должны быть подвергнуты рециклингу на территории РФ с использованием существующих производственных мощностей. Оценим производственные мощности черной металлургии РФ по состоянию на конец 2009 г., а затем, с учетом требований, предъявляемых к стальному прокату (табл. 8.3), оценим годовую потребность в металлоломе черных металлов вообще, и в автомобильном ломе в частности. Результаты расчета приведены в табл. 8.3.

Таким образом, если производственные мощности черной металлургии не изменятся, к 2025 г. образуется около 100 млн т неутилизированного автомобильного лома черных металлов [492, 493].

Прогноз образования и потребления автомобильного лома в Российской Федерации приведен ниже, млн т:

	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2025 г.
Невостребованный автолом. ....	12	21	29	36
Автолом металлошихты. ....	6	6	6	6
Накопление невостребованного автолома ...	12	33	62	98

Таблица 8.3

**Требования, предъявляемые к содержанию примесей в стали, % масс.**

Стальная продукция	Максимальное содержание					
	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Итого
Сталь для глубокой вытяжки	0,06	0,10	0,07	0,02	0,01	0,26
Листовая и рулонная сталь	0,10	0,10	0,07	0,03	0,02	0,32
Катанка низкоуглеродистая	0,12	0,08	0,07	0,02	0,01	0,30
Пружинная сталь	0,20	0,10	0,10	0,03	0,02	0,45
Катанка из специальной стали	0,25	0,12	0,12	0,03	0,03	0,55
Сортовой и профильный прокат	0,35	0,15	0,15	0,04	0,03	0,72

Таблица 8.4

**Прогноз производства стали и потребления металлолома  
предприятиями черной металлургии РФ в случае  
полной загрузки производственных мощностей**

Способ производства стали	Максимальный объем производства стали, млн т	Доля в общем объеме, %	Общая потребность в металлоломе, млн т	Возможность использования автомобильного лома, млн т
Конвертерный	41,0	58,0	10,2	2,0
Электросталеплавильный	18,6	26,4	14,9	3,0
Мартеновский	11,1	15,7	5,5	1,1
Итого	70,7	100,0	30,7	6,1

Из вышеизложенного следует, что для реализации концепции авторециклинга необходимо увеличить производственные мощности по переработке черного автомобильного лома, что крайне маловероятно исходя из существующих тенденций развития электросталеплавильных мини-заводов. С учетом реалий отечественной черной металлургии для реализации концепции авторециклинга наиболее целесообразным представляется не строительство новых производственных площадок, а целенаправленное (в рамках государственных программ) увеличение производственных мощностей уже существующих металлургических предприятий с выбором оптимальных технологических решений для каждого из них.

С точки зрения административно-территориального деления и экономического районирования Российской Федерации большинство центров концентрации автомобилей находятся на одной административной территории с крупными металлургическими предприятиями. В России в настоящее время функционируют только 5 шредерных

установок: две в Московской области, Санкт-Петербурге, поселке Афиппский (Краснодарский край) и городе Старый Оскол [494]. При производительности шредера 50 т металлолома в час и работе в две смены по 8 ч каждая в месяц он будет перерабатывать около 24 000 т металлолома. С учетом замены и ремонта оборудования в год он будет работать около 320 сут, и его годовая производительность составит около 256 000 т/год.

Как указывалось выше, количество автомобилей, которое потенциально можно переработать в рамках авторециклинга, на начало 2009 г. составляло около 1270 тыс. т, следовательно, для полной переработки этого количества материалов требуется полностью загрузить работой все шредеры России и дополнительно запустить еще 2–3 установки. Особенно это актуально для Уральского региона, Дальнего Востока и Сибири, поскольку транспортировка автомобилей из этих регионов в центральные регионы России экономически невыгодна [494, 495].

С учетом тенденции роста числа автомобилей, вышедших из употребления, количество шредеров в России должно к 2025 г. составлять не менее 15 установок.

Проблема переработки побочных продуктов шреддирования – легкой фракции, пыли и мусора может быть решена по аналогии с передовым мировым опытом утилизацией в доменных печах. Ниже приведен усредненный состав техногенных материалов, образующихся в результате шредирования: легкой фракции, мелкодисперсного мусора и уловленной пыли, тыс. т:

Всего .....	370,00
Неметаллические материалы .....	325,96
В том числе:	
пластмассы .....	132,66
резина .....	141,79
стекло .....	2,97
текстиль .....	9,39
бумага .....	12,39
дерево .....	12,39
технические жидкости, масла и остатки топлива .....	0,32
керамика .....	14,05
Черные металлы .....	8.18
Из них:	
сталь углеродистая .....	3.27
сталь нержавеющая .....	2,45



сталь низколегированная . . . . .	0,82
чугун . . . . .	1,64
Цветные металлы . . . . .	35,86
Из них:	
алюминий . . . . .	19,65
медь . . . . .	5,37
хром . . . . .	2,05
никель . . . . .	2,05
цинк . . . . .	1,75
свинец . . . . .	2,97
титан . . . . .	1,19
тугоплавкие металлы . . . . .	0,48
прочие металлы. . . . .	0,35

Для переработки 370 тыс. т материалов приведенного выше состава достаточно задействовать доменные печи общей производительностью около 2 млн т чугуна/год. При этом расход легкой фракции составит 175 кг/т чугуна (табл. 8.5).

Таблица 8.5

**Основные параметры доменной плавки при различном расходе легкой фракции в условиях Европейской части России**

Показатели	Базовый вариант	Расчетные варианты		
		№ 1	№ 2	№ 3
Расход агломерата, кг/т чугуна	1825	1823	1820	1817
Расход кокса, кг/т чугуна	529	484	442	378
Расход легкой фракции, кг/т чугуна	0	50	100	175
Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин	2188	2210	2232	2259
Температура дутья, °С	1100	1100	1100	1100
Содержание кислорода в дутье, %	21	21,75	22,5	23,5
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /т	1750	1769	1795	1836
Температура колошникового газа, °С	168	173	179	187
Содержание в колошниковом газе, %:				
CO	24,28	24,15	24,02	23,8
CO <sub>2</sub>	20,48	20,16	19,8	19,29
Выход шлака, кг/т чугуна	495	495	495	494
Основность шлака (CaO+MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,10	1,10	1,10	1,09
Производительность печи, т/сут	2599	2626	2639	2651

Отметим, что опробована и технология использования в качестве дополнительного топлива при выплавке чугуна отработанных авто-

мобильных масел (ОАМ) [496]. По своим характеристикам ОАМ не уступают таким традиционным заменителям кокса, как природный газ, мазут или пылеугольное топливо, при этом коэффициент замены кокса достигает 0,93. При вдувании в фурмы доменной печи ОАМ в количестве 160 кг/т чугуна на предприятиях с годовым производством чугуна на уровне 33,4 млн т можно будет утилизировать до 5,4 млн т автомасел и сэкономить свыше 5 млн т кокса.

С использованием методологии элементопотоков было определено распределение основных элементов – металлов в результате авторециклинга для условий 2009 г. Результаты расчетов приведены в Приложении.

Выполненные расчеты показывают, что для переработки ВЭА в ближайшие 3–5 лет достаточно организации 7–8 специализированных шредерных предприятий мощностью от 100 до 300 тыс. т/год. Легкая фракция от шредирования, мусор и уловленная пыль могут быть полностью переработаны в доменном цехе металлургического завода производительностью около 2 млн т чугуна в год. При расходе 175 кг/т чугуна восстановительной добавки к доменному дутью, состоящей из легкой фракции, мусора и пыли, расход кокса для условий Европейской части России уменьшается с 530 до 380 кг/т чугуна. Это позволяет экономить до 300 тыс. т кокса в год.

Ситуация с автомобильным ломом гораздо менее обнадеживающая – его не удастся переработать даже при самом благоприятном прогнозе. Очевидно, что проблема ВЭА лежит не только в законодательной, но и в профессиональной и социальной сфере. Отметим особо, что автомобильный лом – только один из видов амортизационного лома общества потребления, который требует деликатного профессионального подхода – существуют еще проблемы лома электробытового и электронного, упаковки и металлоконструкций. Опыт ЕС, Японии и США показывает, что законодательные акты по упомянутым видам вторичных ресурсов принимались синхронно. Ситуация требует комплексного подхода с учетом всех заинтересованных сторон, включая заготовителей лома и металлургов.

Прежде чем законодательно закрепить какой-либо порядок обращения с ВЭА, следует оценить объемы образующихся вторичных материалов, а также существующие производственные мощности по их рециклингу и в случае необходимости предусмотреть ввод в эксплуатацию новых производственных мощностей по предполагаемым к внедрению существующим или перспективным технологиям переработки автомобильного лома.

## 8.4. Электронные и электробытовые отходы

**История вопроса и терминология.** Активный рост потребления населением электротехнических и электронных приборов начался вскоре после окончания Второй мировой войны. В этот период было освоено массовое производство новых видов техники: телевизионных и малогабаритных радиоприемников, звуко- и видеозаписывающей аппаратуры. Был налажен массовый выпуск приборов и машин для облегчения ведения домашнего хозяйства: холодильников, стиральных машин, различного кухонного электромеханического оборудования.

Естественно, что спустя некоторое время стала формироваться принципиально новая для индустриального общества проблема: что делать с отходами, состоящими из тысяч компонентов и материалов? Причем эти материалы, как правило, не подвергаются естественному разложению (вследствие чего не могут длительно храниться на общих свалках-полигонах отходов), представляют опасность для природной среды и здоровья населения. Новый вид техногенных материалов получил название «E-Waste» (в специальной русскоязычной литературе – ЭЭО – электротехнические и электронные отходы) [497–500].

В настоящее время уже невозможно представить себе отрасли потребления, в которых в той или иной мере не использовались бы электрические и электронные приборы. Одновременно с расширением сферы применения электрического и электронного оборудования происходит непрерывное насыщение этого сектора индустрии новыми технологиями, заставляющими все чаще обновлять аппаратуру. В результате имеет место соответствующий рост объемов отработавшей электрики и электроники, которые в настоящее время являются самой быстрорастущей фракцией бытовых отходов. Их утилизация превращается в одну из самых серьезных глобальных проблем современной индустриальной цивилизации.

**Количественная оценка образования ЭЭО.** Точная оценка совокупного объема образования ЭЭО затруднена, поскольку в разных странах учитываются разные типы оборудования (а во многих государствах третьего мира учет вообще отсутствует). По оценкам ЮНЕП (специальная программа ООН по защите окружающей среды) в 2008 г. объем электробытового и электронного мусора на нашей планете в целом превысил 50 млн т. В последнее десятилетие количество ЭЭО растет в среднем в три раза быстрее, чем объемы любых других муниципальных отходов [497, 498].

По прогнозу Международной ассоциации утилизации электронной продукции в 2010 г. устарело и перешло в разряд ЭЭО только персональных компьютеров свыше 300 млн (что составило более 10 млн т). Между тем, в настоящее время перерабатывается лишь около 15 % этого вида отходов и примерно столько же безопасно депонируется в развитых странах. Данное обстоятельство тем более удивительно, поскольку ЭЭО содержат как потенциально ценные, так и токсичные компоненты. Только в последние годы утилизация этих отходов стала приоритетным направлением в политике стран ОЭСР (прежде всего в Японии и Европе) [498, 501, 502].

**Опасные компоненты ЭЭО.** В состав типичных ЭЭО входят сенсоры, кабели, провода и катушки, выключатели и прерыватели, аккумуляторы и батареи, конденсаторы, предохранители и реле. Часто в ЭЭО присутствуют дисплеи, печатные платы и накопители информации. В них содержатся вещества, представляющие опасность для окружающей среды и здоровья людей [498, 501]:

- тяжелые металлы (ртуть, свинец, кадмий, кобальт, медь, олово, никель, ванадий и хром);
- галогенные ароматические соединения (хлорфторкарбоны, или фреоны, полихлорированные бифенилы, бромосодержащие антипирены);
- соединения мышьяка, сурьмы, селена и бериллия;
- асбест и поливинилхлорид.

**Ценные компоненты.** ЭЭО содержат большое количество материалов, пригодных для вторичного использования. Это стекло, пластмассы и металлы: сталь, алюминий, медь, свинец, цинк. Особый интерес представляют редкие драгоценные металлы: золото, палладий, платина, серебро. Некоторые электронные изделия содержат даже индий, используемый в телевизорах с плоским экраном, или рутений, применяемый в производстве резисторов.

В состав среднего современного компьютера входят, % масс.: пластмасса – 22, сталь – 20, алюминий – 14, медь – 7, свинец – 6, цинк – 2, соединения кремния – около 1. В количествах менее 0,1 % присутствуют бериллий, ванадий, европий, золото, иридий, иттрий, кадмий, кобальт, магний, мышьяк, никель, ниобий, олово, платина, ртуть, селен, серебро, тантал, титан, хром [498–501].

**Законодательство.** Проблема ЭЭО начала отчетливо проявляться в конце XX в. и привела к подписанию международной Базель-

ской конвенции, которая вступила в действие в 1989 г. Конвенция по контролю трансграничной перевозки опасных отходов подписана 166 странами. В Российской Федерации она вступила в силу 1 мая 1995 г. [497, 502].

Базельская конвенция запрещает экспорт электронного скрапа даже в целях его утилизации. Государство, ратифицировавшее конвенцию, не может импортировать опасные отходы, перечисленные в Приложении VIII Базельской конвенции, из других стран, которые также ее ратифицировали. Однако Конвенция не ограничивает импорт опасных отходов из стран, не ратифицировавших Конвенцию. В частности, не ратифицировали Конвенцию Соединенные Штаты. Более того, они противостоят попыткам запретить экспорт ЭЭО из богатых стран в бедные. Являясь единственной промышленно развитой страной в мире, не ратифицировавшей Базельскую конвенцию, США до сих пор не располагают единой государственной системой контроля экспорта вредных отходов. Вместе с тем в США в вопросах контроля распространения отходов традиционно велика роль общественных организаций. Например, предотвратить глобальный кризис токсичных электронных отходов активно пытается авторитетная Базельская сеть действия – общественная организация со штаб-квартирой в американском городе Сиэтле.

В Европейском союзе были приняты две основополагающие директивы, направленные на предотвращение загрязнения окружающей среды ЭЭО:

- Директива 2002/96/ЕС Европейского парламента и Совета от 27 января 2003 г. «Об отработавшем электрическом и электронном оборудовании» (WEEE) [503];

- Директива 2002/95/ЕС Европейского парламента и Совета от 27 января 2003 г. «Об ограничении использования некоторых веществ в электрическом и электронном оборудовании» (RoHS) [504].

Директива WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) регламентирует принципы хранения, отдельного сбора и переработки ЭЭО. Она устанавливает принцип ответственности производителей и распространителей (дистрибьюторов) электрического и электронного оборудования за сбор, переработку и утилизацию этого оборудования в конце его жизненного цикла, т.е. на стадии его превращения в отход. В соответствии с требованиями Директивы WEEE государства – члены ЕС обязаны создавать и контролировать системы сбора ЭЭО. Про-

изводители несут («продленную») ответственность за восстановление и вторичную переработку своей продукции после окончания срока ее службы, а дистрибьюторы обязаны бесплатно собирать изношенное оборудование. В 2004 г. данная директива была воплощена в национальном законодательстве государств – членов ЕС.

В директиве WEEE определены 10 категорий ЭЭО:

1. Крупные бытовые приборы: холодильники, стиральные машины, кондиционеры, нагревательные приборы, в том числе микроволновые, и т.д.

2. Мелкие бытовые приборы: пылесосы, тостеры, кофеварки, утюги, часы и т.д.

3. Оборудование для IT и телекоммуникации: компьютеры, периферия, телефоны, АТС, калькуляторы и т.д.

4. Потребительская электроника: радио, телевизоры, плееры, музыкальные инструменты, цифровые фото- и видеокамеры и т.д.

5. Осветительное оборудование: люминесцентные и флуоресцентные, т.ч. компактные, натриевые лампы.

6. Электрические и электронные инструменты, исключая крупногабаритное стационарное промышленное оборудование: электромеханические приборы, электроизмерительные приборы и т.д.

7. Игрушки, оборудование для отдыха и спорта, в том числе игровые автоматы и видеоигры, спортивное снаряжение с электроникой.

8. Медицинские приборы.

9. Средства мониторинга и управления: пожарные датчики, терморегуляторы и т.д.

10. Раздаточные автоматы для продажи еды, напитков, билетов и т.д.

Директива RoHS (Restriction of Hazardous Substances) ограничивает использование опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании. Согласно требованиям этой директивы с 1 июля 2006 г. в новом электрическом и электронном оборудовании запрещено использование шести видов токсичных веществ: ртути, хрома IV, кадмия, свинца, полибромированных дифениловых эфиров (PBDE) и полибромированных бифенилов (PBB).

Требования обеих директив базируются на внедрении принципа «загрязнитель платит», т.е. гражданское общество несет ответственность за загрязнение окружающей среды, имея возможность исправить ситуацию. На практике это означает, что производители обязаны

собирают определенное минимальное количество старого оборудования и покрывать расходы на его утилизацию. С помощью упомянутых Директив формируются отношения между производителями оборудования и организациями, занятыми в сфере обращения с отходами. Финансовая ответственность дает производителям серьезный экономический стимул для модернизации оборудования в целях облегчения его утилизации. Однако, с другой стороны, это приводит к убыткам производителей и дистрибьюторов электрического и электронного оборудования, которые вынуждены применять затратные технологии производства легкоутилизируемого и экологически безопасного электрического и электронного оборудования.

***Современное состояние обращения с ЭЭО.*** Около 80% ЭЭО ЕС образуется в пяти странах – Великобритании, Германии, Франции, Испании и Италии. Применение Директив WEEE и RoHS приводит к заметному повышению действенности стандартов ЕС при обращении с опасными отходами и ЭЭО. Эти документы имеют отчасти характер законов прямого действия, содержат конкретные рекомендации относительно сроков введения ограничений и запретов на использование опасных веществ (с 2006 г.) и согласование уровней (70...80 %) вовлечения в повторное использование утилизируемых компонентов отслужившего электрического и электронного оборудования [501, 502].

В США проблема сбора и утилизации электронного скрапа стоит очень остро [501]. Если 15 лет тому назад в США средний срок жизни персонального компьютера составлял 4,5 года, то в настоящее время он не превышает двух лет. Ежегодно в США выводится из эксплуатации до 20 млн устаревших компьютеров. При этом по оценке Управления ТБО и экстренного реагирования Агентства по охране окружающей среды США на свалки страны попадает лишь около 3 млн единиц отработавшего компьютерного оборудования. Такая же ситуация имеет место и с телевизорами: жидкокристаллические и плазменные экраны пришли на смену экранам с электронно-лучевой трубкой. Каждые полгода обновляются десятки моделей мобильных телефонов. Вся эта отработавшая бытовая электроника стала динамично растущей фракцией твердых отходов.

В США сформирована оригинальная система сбора ЭЭО [501]. Наиболее развита система сбора ЭЭО у юридических лиц. В ней задействовано свыше 1500 предприятий по рециклингу электроники, каждое из которых обслуживает до 300 компаний. Достаточно вызвать представи-

телей службы переработки мусора, которые приедут и заберут электронный скрап. Как правило, подобное предприятие уничтожает жесткие диски и сортирует прочие детали для повторного использования или рециклинга. Тем не менее восемь из десяти компьютеров утилизируются за пределами США. Подавляющее количество электронного скрапа вывозится за пределы страны для сжигания или переработки. Традиционно, вплоть до 2003 г. он вывозился в азиатские страны, такие как Китай или Индия, однако принятие более суровых законов в этом регионе привело к тому, что теперь электронику везут в Африку. При этом 75 % содержимого прибывающих туда контейнеров не подлежит ни повторному использованию, ни ремонту, ни перепродаже. Оно поступает на свалки, где его, как правило, сжигают в целях экономии места.

В последнее десятилетие во «всемирную мастерскую» по производству многих видов бытовых товаров широкого потребления превратился Китай [501, 502]. Среди них одно из важнейших мест занимает электронное и бытовое электротехническое оборудование. Одновременно с ростом производства и экспортом произведенных товаров в Китае растет и внутреннее потребление. Огромная численность населения при крайней ограниченности территориальных ресурсов приводит к тому, что возникшие вследствие экономического роста проблемы с отходами за короткий период достигают в Китае критического состояния. Прогноз на 2010 г. дает свыше 100 млн единиц отработавших свой срок и ставших отходами электронных или электрических приборов и оборудования. Таким образом, за семь лет произойдет удвоение количества ЭЭО из сферы собственно китайского потребления. Однако количество ЭЭО в Китае не ограничивается их собственной внутренней генерацией в результате растущего потребления населения. В Китай идет мощный экспортный поток ЭЭО (что мы наблюдаем и в России на примере ввоза изношенных автомобилей или самолетов). В 2002 г. 80 % образовавшихся в США ЭЭО были экспортированы в азиатские страны, в том числе 90 % – в Китай. Обеспечивая этим правительство Китая ввело запрет на ввоз ЭЭО. Тем не менее для многих провинций Китая в целом эта проблема остается острой, поскольку отходы ввозятся под видом «поношенных товаров» или смешанного вторичного металла. Таким путем обходятся, в частности, положения Базельской конвенции о запрете ввоза-вывоза опасных отходов.



До сих пор Китай остается страной, принимающей значительные объемы отработавшего электронного и электрического оборудования (примерно 70 % мирового объема). Если не удастся переломить данную тенденцию, то страна станет крупнейшей мировой свалкой компьютерного мусора, представляющей опасность для здоровья людей и окружающей среды. В Китае по-прежнему целые регионы живут тем, что перерабатывают электронный мусор, как поступающий с внутреннего рынка, так и импортируемый из-за рубежа. В них можно увидеть картины, когда рядом с поселками вырастают многометровые горы ЭЭО. Для получения сплавов драгоценных металлов пережигаются ты неразборных узлов, травятся кислотой электронные платы. Плавают токсичную изоляцию проводов, чтобы извлечь из них медь. Затем металлический лом продается. При этом у работников нет ни необходимых навыков, ни специального оборудования. По прогнозу специалистов через 10–15 лет в Китае наступит «бум электронных отходов». Масштабы ущерба среде обитания при этом будут огромными, так как переработка отходов производится методами, вредными для здоровья людей и окружающей среды.

В России общегосударственные программы по системному сбору и утилизации отработавшего электронного и электрического оборудования практически отсутствуют. Кардинальные меры в данном направлении начинают предприниматься в отдельных регионах. Например, в соответствии с распоряжением правительства Москвы «О создании городской системы сбора, переработки и утилизации отходов электроники и электротехники» от 4 апреля 2007 г. № 602-РП в настоящее время определяются земельные участки, на которых разместятся предприятия по переработке электротехнических отходов. Функции заказчика по разработке технико-экономического обоснования (ТЭО) инвестиционного проекта создания городской системы сбора, переработки и утилизации электротехнических отходов возложены на Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции Москвы.

**Передовая мировая практика** первичной переработки ЭЭО, сложного лома и смешанных отходов цветных металлов [498–502] ориентирована на высокую степень разборки и сортировки. Общая схема работ по утилизации ЭЭО включает ручную разборку с целью извлечения разъемов, радиодеталей, контактных устройств и плат. Выделенные компоненты подвергаются переработке на специализированных предприятиях. Тем не менее только в странах Евросоюза

ежегодно образуется более 1 млн т сложного лома и смешанных отходов цветных металлов, которые не могут быть переработаны в рамках сложившейся организационно-технологической практики.

Современные центры рециклинга, которые функционируют во многих регионах мира, в том числе в Китае и Индии, перерабатывают не более 10 % ЭЭО. В них широко применяется ручной труд, но основу технологии составляют обработка на автоматизированных линиях, переработка при температуре ниже нуля и CRT-рециклинг.

Обработка на автоматизированных линиях начинается с сухой механической сепарации, которая подходит для рециклинга печатных плат и другого комплексного скрапа. Технология включает три стадии: измельчение, сканирование и разделение по плотности. Для разделения используются следующие процессы:

- флотация (при этом выделяются две твердые фракции: металлы и пластик);
- разделение вихревыми токами: материал проходит через горизонтальную колонну фильтров, которая вибрирует под действием проходящего через нее тока, в результате чего черные металлы отделяются от цветных;
- разделение переменным током: этим методом разделяются цветные металлы. Способ основан на комбинированном действии переменного тока и магнитного поля.

*Технология обработки при температуре ниже нуля.* Этот процесс используется для выделения драгоценных металлов (прежде всего золота и платины) из печатных плат, микросхем, игловок, гнезд и т.д. Драгоценные металлы извлекаются с помощью соляной кислоты и соли при отрицательной температуре (что заменяет концентрированную азотную кислоту).

*CRT-рециклинг.* В этом процессе используется сепаратор с алмазными режущими дисками. Он спроектирован для безопасной переработки катодно-лучевых трубок (CRT) от телевизоров и компьютерных мониторов. Трубка последовательно в три этапа разбирается на различные фракции. Алмазная пила отделяет панель от стеклянной части. Стекло отправляется на вакуумную очистку, где с него удаляется «тенивая масса» и флюоресцентное напыление.

Японский опыт переработки ЭЭО является уникальным, поскольку ориентируется на крупные предприятия черной металлургии. В

апреле 2001 г. в Японии вступил в силу «Закон о рециклинге электро-бытовых приборов» (закон № 97 от 5 июня 1998 г.). Для предпринимательства в этой сфере фирмы NKK (ныне входит в JFE Steel), Mitsui Bussan и San'yo Denki создали компанию NKK Trinikence (в настоящее время – JGE Urban Recycle) [498].

JGE Urban Recycle на территории Восточно-Японского металлургического комбината построен и в 2001 г. введен в действие цех по переработке ЭЭО четырех типов (телевизоры, стиральные машины, кондиционеры воздуха, холодильники) общей годовой мощностью 800 тыс. единиц. В структуре материалов этих четырех типов изделий в среднем более 80 % приходится на пластик, черные и цветные металлы (табл. 8.6).

Таблица 8.6

**Средний состав основных видов ЭЭО по данным завода МЕТЕС  
компании Panasonic по переработке бытовой техники [498]**

Вид ЭЭО	Средняя масса	Содержание основных компонентов, кг				
		Сталь	Медь	Алюминий	Пластмассы	Прочее
Холодильник	79,3	38,5	3,1	2,3	33,1	2,3
Кондиционер	30,0	16,5	5,1	2,1	3,3	3,0
Стиральная машина	60,0	31,8	2,4	1,8	21,6	2,4
Телевизор*	29,4	2,8	0,9	0,3	8,1	1,4

\*Для телевизора также стекло – 15,9 кг.

Участок ручного демонтажа оснащен подъемно-транспортными устройствами для извлечения использованных электробытовых приборов из специальных контейнеров и переноса на рабочие места для ручной разборки. На участке измельчения и сортировки расположены шредер, воздушный сепаратор, магнитный сепаратор, сепаратор цветных металлов, оборудование для переработки уретана и извлечения фреона.

При переработке телевизоров снимают кабели, извлекают из корпуса кинескоп. Пластмассовый корпус перерабатывают в сырье для доменной плавки. Из кинескопов извлекают материалы для изготовления новых кинескопов. При ручной разборке холодильников и кондиционеров воздуха снимают как и с телевизоров пластмассовые и другие детали и, кроме того, удаляют холодильный агент. То, что остается после ручного демонтажа, загружают в шредер и подвергают механической сортировке. В воздушном сепараторе отделяется теплоизоляционный материал (уретан), который затем прессуют для сокращения объема и используют как

доменное сырье. В теплоизоляторе в качестве вспенивающего агента используются фреон и другие вещества, поэтому на стадии измельчения и сокращения объема отходящий газ подвергают адсорбционной очистке активированным углем. Уловленный фреон и другие вещества передают на переработку сторонней организации. В магнитном сепараторе отделяют черные металлы, а в сепараторе цветных металлов – цветные; металл утилизируют в производстве чугуна.

Важной особенностью описанной технологии, которая в настоящее время применяется во всех металлургических центрах Японии, является использование большинства извлеченных вторичных ресурсов в металлургических процессах. В частности, пластик полностью используется в качестве сырья для доменной плавки.

**Перспектива.** Эксперты отмечают, что свыше 90 % деталей компьютеров можно использовать вторично, вместо того чтобы отправлять их на дорогостоящую переработку с соблюдением всех природоохранных требований [498–501].

В марте 2007 г. представители комитета по охране окружающей среды ООН заявили, что в ближайшее время выработают единые стандарты, которые позволят обезопасить природу от электронного мусора. Проект получил название «StEP» (Solving the E-waste Problem – решение проблемы электронного мусора). StEP – совместная инициатива университета ООН (UNU), программы по окружающей среде ООН (UNEP) и конференции ООН по торговле и развитию (UNCTAD). В программе также участвуют 16 крупнейших мировых компаний – производителей электронного и электротехнического оборудования, в числе которых Dell, Ericsson, Hewlett-Packard и др.

Проект StEP призван сформировать общие международные принципы обращения с ЭЭО. В первую очередь предполагается внедрить эффективную, в значительной степени унифицированную промышленную переработку ЭЭО, а затем обязать производителей вносить при проектировании изменения в конструкцию электротехнических и электронных изделий, позволяющие облегчить их последующую утилизацию на стадии завершения жизненного цикла.

Предполагается, что повсеместное использование экологически чистой электроники начнется к 2015 г. Для простых пользователей ее внедрение грозит дополнительными расходами. Производители планируют закладывать затраты на сложную утилизацию в себестои-

мость, и цена бытовой техники неизбежно возрастет. В итоге расходы по сохранению природы в значительной степени будут переложены на простых потребителей.

Оценка образования ЭЭО, выполненная для условий Российской Федерации по аналогии с приведенным выше анализом ресурсов авторециклинга, показывает, что к 2020 г. в стране будет накоплено около 15 млн ед. переработанной вышедшей из употребления электро-бытовой и электронной техники (рис. 8.3).

Для технологов – металлургов и переработчиков лома особую актуальность и научный интерес представляют вопросы промышленной переработки накопленных ЭЭО в соответствии с принципами экологически чистого производства, с учетом миграции в его составе загрязняющих металл элементов – вагантов. Это, в частности, потребует разработки новых принципов управления потоками лома как черных, так и цветных металлов.

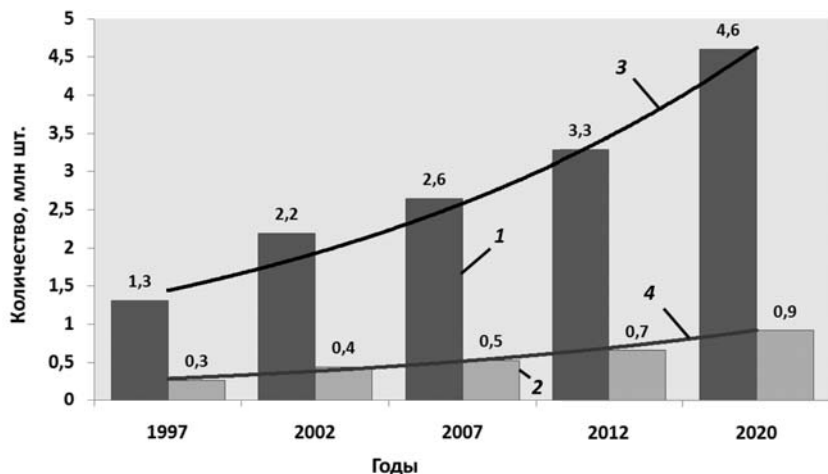


Рис. 8.3. Прогноз накопления ресурсов ЭЭО при 25 и 85%-ном уровнях переработки:  
1, 3 – количество переработанных ЭЭО при 20%-ной утилизации;  
2, 4 – то же при 85%-ной утилизации

## **Глава 9. ПРОГНОЗНЫЕ СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И РЕЦИКЛИНГА ЖЕЛЕЗА В ТЕХНОСФЕРЕ**

Организация глобального рециклинга и управление движением вторичных ресурсов металлов является основополагающим фактором построения индустриального общества нового типа – «общества рециклинга». Разработка критериев управления рециклингом и принципов оптимизации использования природных и вторичных ресурсов призвана обеспечить грамотное перспективное развитие всего металлургического комплекса как отдельных регионов и стран, так и мировой металлургической индустрии в целом. В связи с этим главными задачами проводимых исследований являются:

- разработка комплексной модели использования природных, вторичных и техногенных ресурсов металлов, позволяющей прогнозировать экологические сценарии устойчивого развития металлургической индустрии, обеспечивающие минимизацию затрат природных ресурсов и выбросов в окружающую среду при максимальной доле рециклинга вторичных ресурсов металлов;
- получение новых научных и технических результатов для регулирования процесса рециклинга, что позволит обеспечить необходимый (с точки зрения концепции ESID) уровень потребления металлопродукции на душу населения и соблюдение ее качественных характеристик.

### **9.1 Развитие моделей, описывающих потребление металлолома в черной металлургии**

Анализ использования вторичных ресурсов железа, как, впрочем, и других металлов, производился начиная с первых научных работ в области металлургии (например, Eisenhüttenkunde К.И.Б. Карстена). Во второй половине XIX в. появились первые специальные исследования на эту тему. Общий смысл исследований сводился к обоснованию целесообразности максимального использования «свежих» вторичных материалов (т.е. текущих отходов или оборотного лома) и возможности переработки отвалов металлургических материалов, которые были накоплены за предыдущие периоды работы предприятий (т.е. материалов техногенных месторождений или «отложенного» ре-

циклинга). В целом сложившиеся представления (как в нашей стране, так и за рубежом) мало менялись вплоть до последнего десятилетия XX века, и их содержание в полной мере характеризует фундаментальная работа Л.Л. Зусмана [505], многие положения которой практически совпадают с более ранней аргументацией Стоугтона, Эккеля, Манлова и Виккерса [506–509].

В соответствии с основными положениями упомянутых работ, в процессе переработки на металлургическом предприятии полного цикла железо из вторичных материалов (отходов) распределяется между годной продукцией, вновь образующимися вторичными материалами (вторичными отходами) и безвозвратными потерями. «При последующем цикле кругооборота оставшихся отходов содержащееся в них железо вновь распределяется по тем же трем направлениям, но так как с повторными циклами кругооборота абсолютное количество остатка первоначальных отходов уменьшается, то и остаток железа последовательно уменьшается и стремится к нулевому значению. Таким образом, кругооборот железа внутри металлургического производства приводит к окончательному распределению железа между годной продукцией и безвозвратными потерями» [505, 507, 508].

Согласно данным анализа [505] «железо, содержащееся в весовой единице первичного металла, распределилось в 1958 г. в процессе металлургического производства следующим образом: 0,709 перешло в годную металлопродукцию; 0,251 – в отходы; 0,040 безвозвратно потеряно. При повторном цикле полученные в предыдущем цикле отходы подвергаются регенерации. При этом 0,251 т в виде текущих отходов возвратятся в металлургический передел и после регенерации вновь будут переработаны в годную продукцию».

По мнению Л.Л. Зусмана, при упомянутых коэффициентах распределения железа относительные величины безвозвратных потерь и годной металлопродукции будут стремиться к некоторым постоянным значениям. Если обозначить относительную величину безвозвратных потерь железа при единичном обороте  $a_0$  и относительную величину отходов  $a_1$ , то сумма безвозвратных потерь  $\sum a_0$  при неограниченном количестве оборотов составит:

$$\sum a_0 = a_0 + a_0 a_1 + a_0 a_1^2 + \dots + a_0 a_1^n,$$

откуда

$$\sum a_0 = a_0 \frac{1}{1 - a_1} = \frac{a_0}{1 - a_1}.$$

При значении  $a_0 = 0,040$  (на основе данных распределения железа в металлургическом производстве за 1958 г.) и  $a_1 = 0,251$  сумма безвозвратных потерь железа в металлургическом производстве будет стремиться к некоторому пределу:

$$0,040:(1 - 0,251) = 0,053.$$

Общая относительная величина перехода железа в годную продукцию составит

$$\sum a_0 = a_0 (1 + a_1 + a_1^2 + a_1^3 + \dots + a_1^n) = \frac{a}{1 - a_1},$$

и относительная величина перехода железа в годную металлопродукцию в результате неограниченного числа оборота отходов в металлургическом производстве составит

$$\frac{a}{1 - a_1} = \frac{0,709}{1 - 0,251} = 0,947.$$

Таким образом, согласно [505] из 1 т первичного металла, переработанного в металлургическом производстве, 0,947 т перейдет в годную металлопродукцию и 0,053 г потеряется безвозвратно, т.е. в результате регенерации железа из отходов уровень использования его в металлургическом производстве повышается с 0,709 до 0,947 т.

«Приведенные выше формулы применимы и к образующемуся в процессах металлообработки и потребления металлоизделий оборотному и амортизационному лому» [505]. Этот цикл кругооборота металла отличается от цикла кругооборота его внутри металлургического производства как в пространственном отношении, так и по времени. Металлоотходы, образующиеся в процессе металлообработки и потребления, поступают в металлургические производства для переплава. В свою очередь, годная металлопродукция, получаемая из этих отходов, вновь возвращается в процесс металлопотребления. Сумма безвозвратных потерь металла по отношению к первоначально поступившему в процесс потребления металлу складывается из трех слагаемых:

— суммы безвозвратных потерь в процессе потребления первоначально поступившего металла;



- суммы безвозвратных потерь при регенерации в металлургическом производстве отходов от потребления первоначально поступившего металла;

- суммы безвозвратных потерь в процессе потребления регенерированного металла.

Таким образом, по мнению авторов [505–509], при повторении циклов кругооборота железа относительное количество металла отходов должно последовательно сокращаться; соответственно должно сокращаться относительное количество безвозвратных потерь металла при неограниченном количестве оборотов и в итоге стремиться к нулю.

К сожалению, рассуждения, приведенные выше, не учитывают ряд очевидных факторов: во-первых, при переработке вторичных материалов имеют место совершенно другие коэффициенты распределения железа между готовой продукцией, материалами рециклинга и безвозвратными потерями; во-вторых, если «абсолютное количество остатка первоначальных отходов уменьшается», то общее количество отходов в текущем технологическом цикле может увеличиваться. Поэтому итоговый коэффициент перехода железа в готовую продукцию будет определяться не количеством циклов переработки вторичных материалов, а технологическими параметрами переработки. Аналогично количество железа амортизационного лома, переработанного в готовую металлопродукцию, в реальных условиях зависит от технологий обращения с металлоломом и структуры его потребления на интегрированных предприятиях и специализированных заводах, перерабатывающих металлолом. В действительности, в течение второй половины XX в. доля железа, подвергаемого рециклингу, не превышала 70 % от его количества, поступающего в сферу потребления, несмотря на постоянный рост производства стальных изделий и повышение степени извлечения железа в готовую продукцию на интегрированных предприятиях.

Принципиальные изменения в структуре сырьевой базы сталеплавильного производства, связанные с существенным повышением материального к.п.д. технологий черной металлургии, выразились в значительном уменьшении количества оборотного лома и лома металлообработки. Это потребовало новых подходов к оценке вторичных ресурсов железного лома. Характерным примером является работа

доктора Г. Винерта, руководителя исследовательской группы Рейнско-Вестфальдского института экономики (Эссен, Германия) [510–512].

**Модель Винерта.** В работах Винерта обосновывается необходимость перехода на принципиально новую структуру сырьевой базы черной металлургии: ресурсы амортизационного лома (у Винерта – «старого лома») должны стать основным видом сырья, а природные железные и полиметаллические руды – дополнительным источником железа, «подпитывающим» основной цикл потребления стальных изделий [512]. «Вследствие значительных затрат энергии производство чугуна и губчатого железа является в принципе дорогостоящим «первичным переделом», в то время как переплав скрапа ... можно рассматривать как базирующийся на утилизации отходов (рециклинге) сравнительно дешевый «вторичный передел». Поэтому уровень вторичного передела определяется, в конечном счете, возможностями получения достаточного количества скрапа, а первичный передел по производительности «подгоняют в виде остаточного потребления» [512].

Таким образом, грамотная оценка будущих запасов всех видов металлолома становится определяющим фактором для выбора стратегии развития производственных мощностей по чугуну, губчатому железу и переработке амортизационного лома. Для корректного анализа будущего потребления лома Г. Винерт обосновывает необходимость предварительного анализа использования лома в прошлом, т.е. составления, так называемого ретропрогноза потребления ресурсов в черной металлургии. В работе изложена модель для определения мировых запасов скрапа за период 1950–1993 гг. Методика также позволяет рассчитать параметры работы «подгоняемых» к этому количеству скрапа технологических структур производства стали. «Путем варьирования отдельных параметров модели можно просчитывать сценарии будущего развития отрасли» [510–512].

Исходным пунктом расчета потребления скрапа является потребность в железе для мирового производства стальной продукции. Из суммарного потребления железа вычитают железо чугуна и продуктов прямого восстановления, которые определяются статистически или по надежным экспертным оценкам. В результате получается дефицит железа, который покрывается металлоломом (скрапом). Предложение скрапа складывается из трех источников:

- оборотный металлолом (скрап);

- лом металлообработки (новый скрап из металлообрабатывающей промышленности);
- амортизационный металлолом (старый скрап).

Количество оборотного скрапа зависит от применяемой технологии и степени совершенства ее освоения. Поэтому выход оборотного скрапа представляет собой разность между количеством выплавленной нерафинированной стали и расчетным количеством проката (что соответствует гипотезе безотходной технологии), причем при разливке в слитки расход жидкой стали на 1 т проката принимается равным 1,35 т, а при непрерывном литье этот коэффициент снижается до 1,10. Выход нового скрапа в металлообрабатывающей промышленности зависит от выхода годного вырубаемых, штампуемых, прессованных и т.д. деталей из 1 т проката. Качество нового скрапа вследствие обычно используемых в промышленности сталей ценных марок является высоким и поэтому в сталеплавильных цехах стараются получить этот скрап у крупных переработчиков, работая с ними в замкнутом цикле. Выход нового скрапа в 1950 г. оценивался примерно в 20 % по отношению к расчетным объемам проката. Впоследствии он непрерывно снижался и составил в 1993 г. 10 %. Если вычесть рассчитанное по этим параметрам количество нового скрапа из расчетного производства проката, то получится масса произведенных из стального проката изделий, которую можно считать «потенциальным старым скрапом».

«Выход старого скрапа зависит от «жизненного цикла» продукции, содержащей сталь, и степени ее рециклинга; последний, в свою очередь, зависит от природных условий, организационных, правовых и прочих рамочных условий рынка, а также от цены скрапа. Качество старого скрапа ограничено естественными условиями, однако его можно улучшить путем применения подготовки, которая иногда обходится очень дорого». Суммарный расход скрапа на выплавку 1 т стали на металлургических заводах мира (т.е. не считая литейных цехов) снижался в среднем на 0,5 % в год примерно с 580 кг в 1950 г. до 465 кг в 1993 г. Главной причиной этого снижения до 1965 г. было уменьшающееся удельное поступление скрапа металлообработки. С 1965 г. это связано с широким внедрением технологии непрерывного литья, что повлекло снижение удельного поступления оборотного скрапа [510–513].

В абсолютных значениях поступление оборотного скрапа с середины 70-х годов постоянно снижалось, а выход нового скрапа остается примерно на одном и том же уровне. Так как поступление старого скрапа за то же время значительно возросло, доли различных сортов скрапа в его общем поступлении существенно сместились. До начала 70-х годов доля оборотного скрапа достигла 50 % (вследствие резкого повышения производства стали в слитках), но к 1993 г. она снизилась до 30 %, в то же время доля старого скрапа возросла с 27 до 50 %.

Для непосредственного определения длительности оборота стального изделия «нормы возврата» (т.е. периода, за который изготовленное изделие становится металлоломом и возвращается на переплавку) было применено линейное уравнение без постоянного члена. Значение запаздывания согласно проверенному на степень определенности «оптимальному» уравнению составило девять лет. При таком запаздывании параметр регрессии составил 0,33 (т.е. норма рециклинга составляет одну треть) (рис. 9.1).

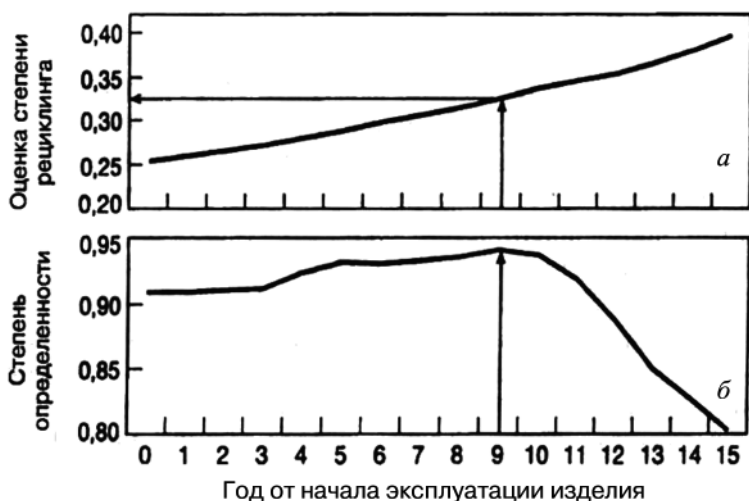


Рис. 9.1. Степень рециклинга (а) и оптимальные сроки возврата скрапа на переплавку (б)

Таким образом, согласно исследованиям Винерта, длительность периода эксплуатации стального изделия в среднем составила 9 лет, а

уровень сбора амортизационного лома 33 %. Анализируя полученные данные, автор пришел к выводу о том, что «средняя длительность оборота представляет собой вымышленный параметр, который вообще может быть поставлен под сомнение». По его мнению, фактический возврат старого скрапа является результатом различных, специфических для каждого вида продукции норм оборота. «Например, упаковочные материалы из стального листа имеют значительно более короткий срок оборота и намного меньшую норму рециклинга, чем автомобили, а конструкционные стали обладают во многих случаях «ожидаемой длительностью жизни» практически до бесконечности».

Следующая попытка оценить длительность периода эксплуатации стального изделия и уровень сбора амортизационного лома с помощью составления глобального ретропрогноза производства и потребления стальных изделий была предпринята в работе [514].

*Модель Тарди.* В 70-х годах XX в. общий объем оборотного скрапа в мире оценивался в 200 млн т, но уже в 90-е годы это количество сократилось до 70...90 млн т, т.е. составило 9...11 % к уровню производства нерафинированной литой стали. В связи с принципиальным изменением структуры потребления металлолома на интегрированных предприятиях в исследованиях [514] была предпринята попытка «уменьшить степень неопределенности оценки образования и потребления различных видов железного металлолома». Количество оборотного скрапа определялось как разница между объемами производства нерафинированной стали и стального проката. Предполагалось, что производство и потребление конечной металлопродукции не меняется на протяжении усредненных трехлетних периодов (объем на складах считался в среднем постоянным). Это позволило определить объем оборотного скрапа «простым вычитанием, используя данные из официальных статистических таблиц USE» [514].

При определении количества скрапа металлообработки приходилось учитывать большое число факторов: масштабы потребления металлопродукции различными отраслями, уровень технологий металлообработки, долю сегментов потребления (промышленное, бытовое, капитальное строительство и т.п.). Было отмечено, что определение объема скрапа металлообработки на основании данных официальной статистики является существенно более сложной задачей по сравнению с определением объема оборотного скрапа. Это связано с тем, что

первый лишь частично выкупается металлургической компанией – поставщиком металлопродукции, а оставшаяся часть – независимыми сборщиками и переработчиками скрапа; данные по этим показателям не позволяют отделить скрап металлообработки от амортизационного металлолома. В некоторых исследованиях [515, 516] объем скрапа металлообработки оценивался в 12...14 % от объема потребляемой готовой стальной продукции.

Авторы [514] отмечают: «чтобы иметь возможность оценить объем амортизационного лома, необходимо знать срок службы объектов, содержащих стальные компоненты». Этот «диапазон довольно широк: сталь может превратиться в скрап уже несколько месяцев от начала эксплуатации изделия, в то время как срок службы некоторых мостов превышает 100 лет. Точной методики расчета не существует, поэтому в литературных источниках делаются попытки решить эту задачу, усредняя сроки службы, которые по данным различных исследований составляют 15–35 лет».

Для оценки срока службы (периода эксплуатации) использовался метод составления ретропрогноза. Например, если в 2000 г. общее потребление скрапа составило 380 млн т, из этого объема 85 млн т пришлось на оборотный скрап и 105 млн т – на лом металлообработки, то объем амортизационного лома составил 190 млн т. Структура мирового потребления железного металлолома в 2000 г. характеризуется следующими данными:

	Млн т	%
Лом амортизационный (глобальный рециклинг) . . . . .	190	50,0
Лом оборотный (производственный рециклинг). . . . .	105	27,6
Лом металлообработки (межотраслевой рециклинг) . . .	85	22,4
Итого проплавлено лома: . . . . .	380	100

Этот объем сравнивался со статистическими данными по потенциальным источникам образования амортизационного лома 15-, 25- и 35-летней давности. Затем наиболее подходящий набор данных анализировался и сравнивался с фактическим потреблением скрапа. Теоретическая эффективность ( $H_{\text{эф}}$ ) сбора амортизационного лома определялась как соотношение его объема, использованного в черной металлургии (т.е. собранного для нужд предприятий черной металлургии), и расчетного объема из различных источников. Теоретиче-

ская эффективность сбора амортизационного лома в зависимости от срока амортизации металлопродукции представлена ниже:

Продолжительность срока службы, лет	Теоретическая эффективность сбора амортизационного лома ( $H_{\text{eff}}$ ), %
15	35
25	39
35	62

Наилучшая корреляция была характерна для первого случая: 15-летнего срока службы и теоретической эффективности сбора скрапа 35 % ( $H_{\text{eff}} = 35$  %). В результате был сделан вывод о том, что «объем стали, поступившей в эксплуатацию 15 лет тому назад, оказывает основное влияние на объем скрапа, который используется в настоящее время» [514]. Более объемное исследование позволило сделать аналогичные выводы. Был также построен общемировой баланс металлолома для 2003 г. и сформулированы перспективы развития сталеплавильных процессов на ближайшую (до середины XXI в.) перспективу. Общемировой баланс скрапа, используемого в черной металлургии, представлен ниже, кг/т жидкой стали:

Статья баланса	Количество лома, кг/т жидкой стали
Лом оборотный . . . . .	90...110
Лом металлообработки . . . . .	80...140
Лом амортизационный (собранный). . . . .	250...400
И т о г о . . . . .	420...650
Может быть проплавлено в электропечах . . . . .	350...570

Поскольку удельная потребность в скрапе для кислородно-конвертерного процесса составляет 100...300 кг/т, то он, по мнению авторов, является «скрапообразующим»; наоборот, в электросталеплавильных процессах потребляется больше скрапа (примерно 1150 кг/т), чем образуется. Это означает, что ресурсы металлолома для электросталеплавильных процессов обеспечиваются за счет кислородно-конвертерного процесса. Выплавка стали в электродуговых печах невозможна без существования конвертеров. Два способа находятся в равновесии, когда в электросталеплавильных процессах используется излишек скрапа, образующегося в кислородно-конвертерном производстве.

Для долговременного прогноза структуры производства стали была предложена следующая система уравнений:

$$S_{circ} = 0,1 \text{ } Prod, S_{proc} = 0,12 \text{ } Cons = 0,11 \text{ } Prod;$$

$$S_{cap} = 0,88 \text{ } Cons_{(-15)} \text{ } 0,35 = 0,31 \text{ } Cons_{(-15)} = 0,28 \text{ } Prod_{(-15)};$$

$$\begin{aligned} S_{total} &= 0,1 \text{ } Prod + 0,11 \text{ } Prod + 0,28 \text{ } Prod_{(-15)} = \\ &= Prod (0,21 + 0,28 \text{ } Prod_{(-15)} / Prod), \end{aligned}$$

где  $S_{circ}$ ,  $S_{proc}$ ,  $S_{cap}$ ,  $S_{total}$  – соответственно объем оборотного лома, лома металлообработки, амортизационного лома и общий объем металлолома для конкретного года;

$Prod$  – объем производства нерафинированной стали в конкретном г.;

$Cons$  – объем производства готовой стальной продукции в конкретном году;

индекс  $(-15)$  означает данные по объемам производства 15 лет тому назад по отношению к рассматриваемому году.

Если доля скрапа в шихте соответствует примерно 45 % от объема произведенной нерафинированной стали, то  $S_{total} = 0,45 \text{ } Prod$ , а величина соотношения  $Prod_{(-15)} / Prod$  равна 0,85. Это означает, что если принять параметры, используемые в расчетах, то объем амортизационного лома, необходимый для сохранения существующего на сегодняшний день соотношения по скрапу, будет доступен в том случае, если объем производства стали 15-летней давности (относительно конкретно взятого года) составит не менее 85 % от объема производства в конкретно взятом году.

Авторы подчеркивают, что значения коэффициентов, используемых в расчетах, могут быть оспорены (в литературных источниках приводятся и другие цифры [515, 516]). Однако это не меняет сути дела: по их мнению, в долгосрочной перспективе объемы амортизационного будут возрастать медленнее, чем потребление и производство стали. Следовательно, исходя из того что способы выплавки стали останутся неизменными, рано или поздно неизбежно будет возникать дефицит скрапа.

Итак, особое внимание металлолому как перспективному вторичному сырью стали уделять на рубеже XXI в. Обширные исследова-



ния, продолжавшиеся более 10 лет, были выполнены фирмой Usinor (Arcelor) в рамках программ «Лом и рециклинг» и «Цикл железа». Непосредственным исполнителем работ была группа специалистов Французского исследовательского института черной металлургии (Arcelor-Irsid, Мезьер-ле-Мец, Франция) под руководством технического директора Irsid доктора Ж.-П. Бира. Результаты исследований обобщены в цикле статей и докладах на конференциях мирового уровня [291, 292, 517–522].

**Модель Бира.** Для характеристики процесса образования амортизационного лома и структуры его сбора и потребления были специально разработаны концепция капитализированной стали (термин «капитализированная сталь» практически соответствует устоявшемуся в отечественной литературе понятию «металлофонд») и понятие «металлогенезис лома», которое, по сути, очень близко к получившему широкое распространение в настоящее время понятию ретропрогноза.

По оценке специалистов Irsid [517–522], металлофонд промышленно развитых стран очень велик, и если сравнить его с уровнем потребления амортизационного лома за год, то окажется, что доля лома составляет всего 2...3 % «капитализированной стали». В настоящее время для индустриально развитых стран характерен период стабилизации металлофонда. Металлофонд промышленно развитых стран составляет:

США .....	3,5
Япония .....	1,3
Германия .....	около 0,7
Франция .....	около 0,35
Великобритания .....	около 0,35

Ретропрогнозы формирования металлофонда показывают, что потребление стали в определяющей степени зависит от состояния базовых отраслей экономики. По-существу, уровень экономического развития является почти синонимом потребления стали [523–525]. В связи с этим такие страны, как США, Германия, Великобритания и Япония, могут рассматриваться как страны с развитой экономикой, где потребление стали возрастает до максимума, после чего уменьшается, а затем стремится к стагнации.

Если нанести на график нормализованное потребление стали (отношение фактического потребления к пиковой величине потребления) в зависимости от нормализованного времени пикового потребления (отношения количества лет, которое прошло с определенного года до года, в котором достигается пиковое потребление), то получится характерная кривая (рис. 9.2).

Аналогичный вид имеет S-образная кривая (рис. 9.3), которая отражает взаимозависимость душевого потребления стальной продукции и показателя национального богатства, выражаемого ВВП на душу населения. Резкий подъем в ходе кривой начинается в точке, где душевое потребление составляет 200 кг, а ВВП на душу населения составляет 5000 долл.

В США, Японии, Германии, Франции, Швеции и других индустриально развитых странах с экономикой, ориентированной на экспорт, потребление стали «выходит на насыщение» или даже снижается. В этих развитых странах стоимость рабочей силы выше, и промышленные товары, в которых присутствует сталь, все больше импортируются из стран, где издержки ниже. В Китае, Бразилии, Индии в настоящее время наступает «второй этап развития», на котором происходит рост национального богатства, что стимулирует потребление стали. Это критический период роста промышленности и урбанизации, когда потребление стали обычно возрастает до 500...600 кг на душу населения. Поэтому объемы производства стали наращиваются (увеличивая общемировые показатели) именно в развивающихся странах с молодой растущей экономикой. Таким образом, на современном этапе развития черной металлургии имеют место различные национальные, региональные и прочие модели производства и потребления стальных изделий. Оптимизация потребления ресурсов, и особенно вторичных ресурсов, железа превращается в сложную многофакторную научную задачу [517–526].

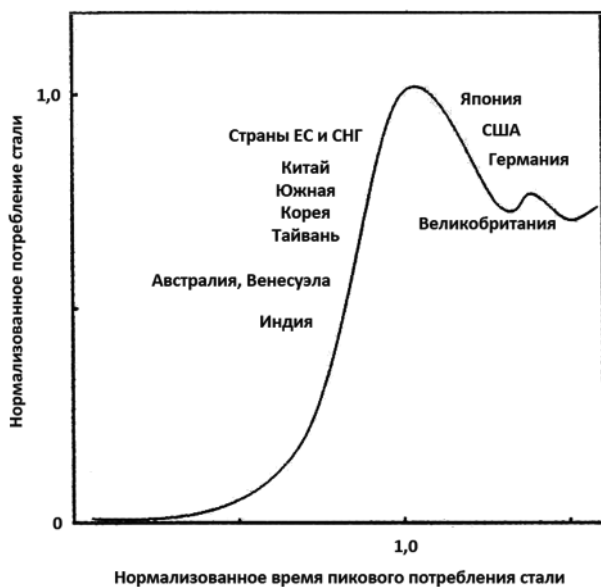


Рис. 9.2. Потенциальное потребление стали в развитых и развивающихся странах

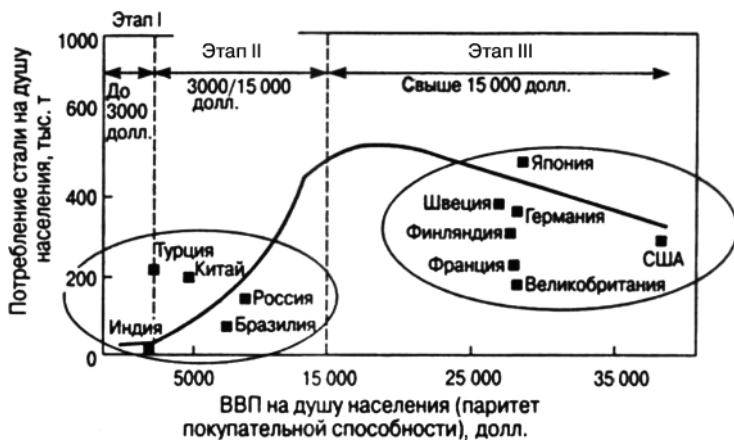


Рис. 9.3. Динамика потребления стали

В частности, для структуры черной металлургии Франции в 1990–2001 гг. было характерно постоянное увеличение доли лома в шихте сталеплавильных агрегатов (с 37 до 54 %). Это сопровождалось активным развитием электросталеплавильного производства. В итоге его доля в общем объеме выплавки стали в 2001 г. составила 42 % (8,02 млн т) при доле конвертерного производства 58 % (11, 08 млн т). Структура потребления лома во Франции приведена ниже, %:

Оборотный лом предприятий .....	17
Лом металлообработки .....	17
Амортизационный лом, всего .....	66
В том числе:	
механическое оборудование .....	23
промышленные конструкции .....	22
гражданское строительство .....	2
автомобили .....	14
бытовое оборудование .....	3
упаковка .....	2

Для характеристики уровня сбора амортизационного лома в разных странах, находящихся на близких участках приведенных кривых, был предложен критерий: «Металлофонд/Площадь страны» – плотность лома на один квадратный километр территории, что по мнению исследователей [518–520], в некотором смысле дает представление о количестве лома, полученного от бывшего в употреблении оборудования. Такая плотность лома намного больше, например, в Германии, чем во Франции, а в Японии больше, чем в США, что объясняет различные нормы сбора. Однако данный критерий не получил признания, и сами авторы согласились с тем, что социальная политика государств, включающая экологическое просвещение и разумные законодательные инициативы имеет значительно большее влияние на эффективность сбора вторичных ресурсов железного лома, чем размеры страны.

Следующий шаг в оценке образования лома состоял в расчете количества железа стальных изделий, которые потенциально превращаются в металлолом каждый год, когда они достигают конца срока своей службы [517, 521, 522]. Для такого расчета японской фирмой Tetsugenkyokai и французской фирмой Usinor были разработаны эконометрические модели интенсивности образования металлолома и

сроков службы большинства потребительских и промышленных товаров.

По модели фирмы Usinor расчеты были выполнены для 12 стран Европейского Союза за период, охватывающий 70 лет. Примененная методология (представляющая собой вариант ретропрогноза) основана на проверке прогнозируемых параметров задним числом по сравнению с фактической статистикой образования лома [522].

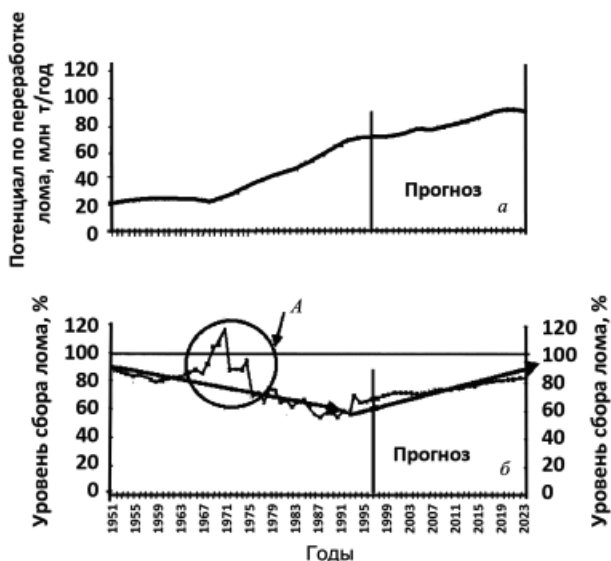


Рис. 9.4. Развитие во времени потенциала по переработке лома в 12 странах Европейского Союза (а) и уровня сбора лома (б) с 1950 до 2020 г. (А – наличие спроса дает возможность повышать процент переработки до уровня свыше 100 %)

Анализ полученных результатов показал, что количество собранного амортизационного лома с 1950 г. до начала 80-х годов XX в. снижалась. Это было обусловлено «индустриализацией» в бизнесе сбора лома, когда небольшими ресурсами лома пренебрегали, чтобы снизить издержки на его сбор. Последующий подъем кривой связан с «социальным давлением» на рециклинг и привлечением потребителей для сбора лома без дополнительных затрат для маршрута переработки лома. При этом наблюдались такие периоды, когда степень сбора лома превышала

100 %. Так, в конце 60-х и начале 70-х годов XX в. спрос на лом был настолько велик, что это вынуждало предприятия по переработке использовать лом, накопленный в предыдущие годы.

До настоящего времени спрос на лом всегда рос медленнее, чем его капитализация, что стало причиной того, что его нехватка, регулярно предсказываемая, фактически никогда не наблюдалась. Таким образом, баланс между технологиями с конвертером и дуговой сталеплавильной печью корректировался предложением лома. Экспорт и импорт лома за пределы и из-за пределов европейского региона иногда нарушали этот баланс, но эффект был непродолжительным. В будущем для сохранения устойчивого положения в отрасли рост спроса на металлолом должен контролироваться стратегией капиталовложений, одобренной всеми европейскими производителями стали.

При этом надо иметь в виду, что наилучшие решения с точки зрения наименьшей стоимости и наилучших экологических характеристик не обязательно будут теми решениями, которые наиболее широко применяются в настоящее время. Это связано с тем, что наилучшие решения требуют оптимизации всей перерабатывающей цепочки, нарушая границы отраслей производства, а этого не просто добиться в условиях рыночной экономики, которая предполагает создание более локальных оптимальных условий.

Основные выводы из вышесказанного следующие:

1. Лом черных металлов представляет собой сырьевой материал, для которого в перспективе практически отсутствуют ограничения в образовании, что может быть отражено термином «устойчивый ресурс»;
2. Амортизационный лом представляет собой особый вид вторичного ресурса, который можно определить термином «социальный вторичный ресурс»;
3. Прогнозы о масштабах промышленного использования амортизационного лома пока еще нельзя составлять строго научно.

На основе полученных результатов и разработанных методик специалистами Irsid сделаны два долгосрочных прогноза развития черной металлургии. Первый касается перспектив производства товаров бытового назначения, прежде всего – электронной и электробытовой техники и автомобилей.

Единственное решение, которое сделает возможным выполнение Директивы 3R, заключается в том, чтобы использовать больше ме-

талла на этапе проектирования потребительских товаров, принять это как строгое правило при подходе к проектированию с точки зрения возможности переработки. Содержание металла в изделиях такого рода должно быть равно как минимум 78 %.

Второй прогноз связан с общими тенденциями развития интегрированных предприятий и мини-заводов. В 2050 г. мир будет иметь численность населения 9 млрд человек. При этом производство стали достигнет 2300 млн т, если она будет продолжать играть свою роль и сопровождать повышение уровня жизни в Китае, на Индийском субконтиненте, в Индонезии, России и в Южной Америке. Значительное увеличение производства стали создаст настолько большое количество лома, что его придется подвергать рециклингу на высоком уровне (и по объему, и по качеству). В результате отношение лома к руде повысится до 60 %. Лом пойдет в модернизированный вариант электропечей, но будет также широко применяться и в кислородных конвертерах, которые сохранятся и к 2050 г., так как сталь в больших количествах будет выплавляться из передельного чугуна [292, 527].

Фундаментальные исследования в области оптимизации использования вторичных ресурсов ведутся в последние годы в Японии. В работе [100] особо отмечается важность разработки научно обоснованной методики управления потоками вторичных материалов в «Обществе рециклинга». «В области технического управления в настоящее время практически все методы имеют лишь качественный характер, а в количественной оценке велика доля рыночного фактора. С точки зрения глобальной технической стратегии в области вторичных ресурсов очень важно сформировать методологию, пользуясь которой, специалист, хорошо знакомый с технологией, смог бы сделать объективную оценку ее перспективности исходя из результатов выполненных ранее исследований и разработок».

Продукцию черной металлургии в Японии производят в больших объемах, в том числе до 40 % на экспорт, и в значительной степени используют в оборотном цикле. Однако рециклинг стального лома приводит к загрязнению стали нежелательными примесями. Поэтому в ближайшем будущем можно ожидать ограничений в использовании амортизационного стального лома, что, в свою очередь, может привести в Японии к увеличению выплавки стали из первичного сырья.

Оригинальная модель разработана в Токийском университете [528, 529]. Авторы этого исследования поставили целью разработку модели для оценки оборотного использования лома черных металлов с учетом перспективного уровня спроса и предложения на металлопродукцию, количества и качества поставляемого лома. Они разработали динамическую модель для оценки максимальной доли амортизационного стального лома, пригодной для рециклинга. Она основана на методологии баланса популяции и «методе ограничения» (pinch method) в сочетании с анализом жизненного цикла [528–532]. Применение модели позволило оценить количество стального лома и содержание в нем примесей за период 1990–2030 гг.

В схеме потока железа оборотный лом предприятий и отходы металлообработки рассматриваются как лом, образующийся в один год с производством металлопродукции. Поэтому эту массу за каждый год определяют, используя параметры производства нерафинированной стали и потребления металлопродукции, умножением на процент выхода лома и суммированием. В отличие от этого амортизационный лом образуется спустя несколько лет или несколько десятков лет после производства металлопродукции, когда завершается цикл эксплуатации изделий. Массу амортизационного лома, который образуется в экономике в каком-либо году, рассчитывали на основе данных производства за предшествующие годы и распределения показателей эксплуатационной долговечности изделий, пользуясь моделью баланса популяции (Population balance model – PBM). Умножением массы образующегося лома на процент сбора и вычитанием объема экспорта получали величину ресурсов лома в стране в рассматриваемом году.

В целом порядок расчетов был следующим:

1. Производство нерафинированной стали разделили на конвертерное и электросталеплавильное. Металлическим сырьем считали передельный чугуны и лом. Считали, что при выплавке электростали чугуны не используются.

2. На основе данных о массе лома в стране, определяемой согласно модели баланса популяции, и содержании примесей в ломе строили «граничную кривую источника» в системе координат, где по горизонтальной оси отложена масса образующегося лома в стране, а по вертикальной оси – общее содержание элемента-примеси.

3. По данным спроса на нерафинированную электросталь и допустимому содержанию примеси строили «граничную кривую стока» в координатах, где по оси абсцисс отложен спрос на нерафинирован-



ную электросталь, а по оси ординат – общее содержание меди. Проверяли граничные кривые источника и стока на пересечение (наличие или отсутствие точки схождения – pinch-point).

4. Считали, что если масса лома в стране превышает потребление для выплавки в дуговых печах, то лом перерабатывают и в конвертерах. При этом учитывали, что при производстве конвертерной стали, к качеству которой обычно предъявляют высокие требования, использование низкокачественного лома невозможно. Поэтому в конвертерном производстве предполагали использование лома высших сортов, с хорошо контролируемым происхождением. При таком условии строили граничные кривые источника и стока и определяли максимальную массу пригодного для использования лома. Если на граничной кривой для электростали обнаруживается точка схождения, это указывает на образование в стране лома, который не пригоден к использованию вследствие высокого содержания меди в амортизационном ломе.

5. Определяли массу передельного чугуна, необходимого для удовлетворения спроса на нерафинированную конвертерную сталь.

Выполнение расчетов потребовало большого объема предварительных исследований для формирования соответствующей базы данных и корректного выбора граничных условий. Была разработана классификация металлопродукции по длительности нахождения в сфере потребления, определены объемы ее производства по всем видам и сроки эксплуатации. Были учтены объемы экспорта и импорта металлопродукции и амортизационного металлолома. Данные по концентрации в металлопродукции нежелательной примеси (меди) получили из проведенных ранее исследований и систематизировали по видам и назначению продукции [533–537].

Были рассчитаны и проанализированы три предположительных сценария будущего развития черной металлургии Японии на период до 2030 г.:

- при сохранении существующих уровней переработки лома, объема экспорта и спроса на продукцию черной металлургии;
- при экспорте высокосортного лома;
- при увеличении срока службы строительных конструкций.

Для всех сценариев было определено количества накапливающегося не пригодного для использования амортизационного лома и параметры воздействия на окружающую среду (выбросы  $\text{CO}_2$ ).

В настоящее время методология анализа развития черной металлургии на базе расчета возможных экологических сценариев потребления

вторичных ресурсов и выбросов в окружающую среду признается специалистами наиболее обоснованной и перспективной [538, 539].

## **9.2. Проблема учета в экобалансе стадии рециклинга металлолома**

Как уже отмечалось, в наступившем тысячелетии металлический лом стал рассматриваться в качестве важнейшего вторичного (техногенного) ресурса современной цивилизации. Лом благородных и редких металлов уже более ста лет в индустриально развитых странах мира считается национальным стратегическим резервом. Из амортизационного лома в настоящее время производится свыше 50 % всего получаемого в мире свинца и до 25 % алюминия. Однако особое значение имеет стальной металлолом. Рециклинг черных металлов в виде стального лома достигает почти 70 % от уровня их производства в качестве готовой продукции [8, 103, 540–546].

Металлолом принято подразделять на оборотный, амортизационный и лом металлообработки. Оборотный лом образуется на металлургических предприятиях в виде отходов при производстве стального проката и других видов стальных полупродуктов. Он практически полностью утилизируется в рамках производственного рециклинга, его количество непрерывно уменьшается за счет внедрения новых способов производства стальной продукции. Наиболее значительное снижение образования оборотного лома (в среднем с 250 до 100 кг лома/т проката) было достигнуто в результате активного внедрения в 1960–1980 гг. технологии непрерывного литья стальных заготовок для прокатки. Лом металлообработки образуется в процессах переработки стального проката в готовый продукт (потребительский товар). Объем образования этого вида лома также непрерывно снижается за счет совершенствования технологий металлообработки. Амортизационный лом состоит из стальных, чугунных, железных продуктов, выработавших срок эксплуатации (списанных после окончания срока службы). Спектр амортизационного лома чрезвычайно широк, он включает в себя металлические приборы, автомобили, металлическую тару, электроприборы и т.д. Химический состав амортизационного лома сильно разнится в зависимости от его происхождения и способа обработки. Средний срок службы стальных конструкций в развитых индустриальных странах постоянно уменьшается и оценивается в настоящее время в 15 лет, а автомобилей и электрооборудования в 3–5 лет. Поэтому количество амортизационного лома непрерывно возрастает [8, 542–549].

Современные конвертерный и электропечной способы выплавки стали ориентированы на 100 %-ную непрерывную ее разливку, что значительно сокращает ресурсы оборотного лома, получаемого при производстве черных металлов. Переход на непрерывную разливку способствует уменьшению тяжеловесной обрезки и повышению доли легковесных отходов. В этом же направлении действует увеличение производства мелкосортного проката и катанки, тонколистового и холоднокатаного проката. В настоящее время потребности черной металлургии в ресурсах лома практически в два раза превышают объем внутривозвратного оборота лома. Поэтому рост потребности металлургии в покупном ломе, получаемом от заводов других отраслей и предприятий по заготовке металлолома, в последние годы стал определяющим для экономичной и стабильной работы сталеплавильных цехов и агрегатов [103, 546, 548, 549].

Под металлофондом понимается общее количество конкретного металла, накопленного на территории государства в виде изделий, машин, устройств, зданий, сооружений, коммуникаций и т.п. Совместно с металлом, накопленным в техногенных грунтах горнометаллургических регионов, металлофонд представляет собой техногенные ресурсы металла. Основными причинами уменьшения металлофонда являются безвозвратные потери металла в результате процессов коррозии (ржавления) и истирания металлических деталей в процессе эксплуатации, а также диссипации из техногенных месторождений в результате процессов выветривания, вымывания и т.п. [8, 103, 540–550].

Техногенные ресурсы железа можно подразделить на «активную часть», которая может быть использована и используется с минимальными затратами на подготовку, и потенциальные ресурсы, использовать которые будет возможно только в будущем с применением новых технологий извлечения железа [8, 543]. К активной части техногенных ресурсов железа принято относить:

- собственно металлолом, накопленный в хранилищах и на полигонах;
- машины, агрегаты, бытовые приборы и т.п.;
- легкодемонтируемые железные строительные конструкции.

Потенциальные ресурсы железа включают:

- железные составляющие специальных строительных конструкций (например, железо в железобетонных конструкциях);
- техногенные железосодержащие грунты в горнометаллургических регионах, содержание железа в которых находится ниже уровня, позволяющего в настоящее время производить его экономически целесообразное извлечение.

Важнейшей проблемой, с которой сталкивается современная металлургия, является проблема присутствия в амортизационном ломе примесных микроэлементов. Результаты последних исследований, проведенных в индустриально развитых странах, показывают, что между количеством микропримесей в металлоломе, уровнем образования амортизационного лома и жизненным циклом стальных изделий существует сложная взаимосвязь [540–545].

Японскими учеными была обработана статистическая информация за период 1967–1997 г. Согласно их прогнозу при современном уровне загрязнения металлолома примесными микроэлементами к 2015 г. будет накоплено до 300 млн т амортизационного стального лома, который нельзя будет переработать в товарную продукцию при сохранении существующего уровня требований к качеству изделий из железа. Такой металлолом перейдет в категорию потенциальных техногенных ресурсов. Для аккумуляирования упомянутого металлолома необходимо либо существенно повысить степень извлечения из него меди, хрома, никеля и олова, либо разработать новые технологии производства качественной продукции из железа с высоким содержанием примесных микроэлементов [540, 541, 544].

Принципиально новые проблемы создает переработка все больших количеств таких специфических видов лома, как автомобильный, электронный и электротехнический (см. гл. 8). Главным способом переработки ВЭА и ЭЭО является шредирование. Ценность шредированного лома для электроплавильных производств очевидна. Металлические компоненты, составляющие основную часть автомобиля, перерабатываются как лом черных металлов, но из-за широкого использования в конструкции автомобилей оцинкованной листовой стали и из-за примешивания к стальному лому цветных металлов продуктом его переработки на электрометаллургических заводах является сортовой прокат низкокачественных сталей [551–554].

Постоянно увеличивающееся применение лома для производства длинномерной и тонколистовой продукции на мини-заводах заставляет проводить интенсивные работы по исследованию влияния содержания элементов-примесей и элементов-следов, что сопровождается регулярным обновлением действующих стандартов. Например, в странах Европейского Союза в 2002 г. приняты технические условия на стальной лом (табл. 9.1). В них указаны желательные концентрации микроэлементов-примесей. При выплавке специальных марок стали применяется стандарт, учитывающий максимально допустимое содержание элементов в чугунах и ломе (табл. 9.2) [555].

Таблица 9.1

**Классификация стального лома, принятая в ЕС в 2002 г.**

Категория	Вид лома	Обозначение	Крупность, мм	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Желательное содержание примесных элементов, % масс.		
					Cu	Sn	Cr, Ni, Mo в сумме
Амортизационный старый лом	Тяжеловесный №1 Тяжеловесный №2	E3	> 6	> 0,6	< 0,25	< 0,01	< 0,250
		E1	> 6	> 0,6	< 0,40	< 0,02	< 0,300
Новый лом с пониженным содержанием микропримесей	Мелкая обрезь	E2 E8	> 3 < 3	> 0,6 > 0,4	< 0,3 (Cu, Sn, Cr, Ni, Mo в сумме)		
	Пакетирование	E6	< 3	> 1,0			
Шредер-лом	Дробленый	E40	–	> 0,9	< 0,25	< 0,02	–
	Дробленый, термически обработанный	E46	–	> 0,8	< 0,50	< 0,07	–
Стружка	Однородная	E5H	–	–	–	–	–
	Смешанная	E5M	–	–	< 0,40	< 0,03	< 1,0
Лом с высоким содержанием микропримесей	Арматурный прутки	EHRB	–	> 0,5	< 0,45	< 0,03	< 1,5
	Детали машин	EHRM	–	> 0,6	< 0,40	< 0,03	< 0,7

Таблица 9.2

**Нормативы ЕС на максимальное содержание микроэлементов-примесей в основных видах проката и шихтовых сталеплавильных материалах**

Прокатная заготовка	Состав шихты, %	Вид проката	Металлургический материал	Содержание микропримесей				
				Cu	Cr	Ni	Mo	Cu + Cr + Ni + Mo
Слябы	Чугун <sup>1</sup> 80, лом 20	Тонкий лист	Сталь	0,04	0,04	0,04	0,01	0,13
			Лом	0,16	0,08	0,20	0,05	0,49
		Толстый лист, трубы	Сталь	0,10	0,03	0,03	0,08	0,35
			Лом	0,46	0,03	0,15	0,40	1,05
Сортовая заготовка	Лом 100	Арматура	Сталь	0,40	0,20	0,20	0,05	0,80
			Лом	0,40	0,20	0,20	0,05	0,80
	Губчатое железо <sup>2</sup> 65 Лом 35	Корд	Сталь	0,05	0,05	0,05	0,01	0,10
			Лом	0,12	0,12	0,14	0,028	0,248
		Улучшаемые стали	Сталь	0,10	0,10	0,08	0,01	0,20
			Лом	0,26	0,26	0,22	0,028	0,53

<sup>1</sup> Максимальное содержание в чугунах: меди – 0,01 %; хрома – 0,03 %.<sup>2</sup> Максимальное содержание в губчатом железе: меди – 0,01 %; хрома – 0,01 %.

***Современные представления о роли микроэлементов в металлургии железа.*** Технологические и потребительские свойства сталей (особенно специальных) в основном зависят от химического состава, параметров изготовления и термической обработки. Некоторые элементы уже при самых незначительных содержаниях вызывают заметные изменения свойств. В работе [556] дается следующее определение: «...термином «элемент-примесь» обозначаются элементы, которые не добавляются в сталь специально, но неизбежно в ней присутствуют». Содержание элемента-примеси в специальных сталях обычно колеблется в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  % масс. Знание механизма действия элементов-примесей является предпосылкой для организации целенаправленного управления металлургическими процессами, получения высокого уровня технологических свойств и снижения воздействия на окружающую среду [543, 544, 556–559].

В последние 15–20 лет на фоне изменившегося содержания элементов-примесей в сырье, особенно в связи с ухудшением качества лома и нежелательным обогащением примесями в оборотной системе сталь – лом – сталь, вопросы влияния элементов-примесей на свойства стали приобрели особую актуальность.

Определение характера влияния каждого элемента-примеси затрудняется в связи с тем, что в сталях их присутствует несколько, и они вступают во взаимодействие между собой и с легирующими элементами. Вредное воздействие элементов-примесей основывается на местном обогащении при ликвации и (или) образовании новых выделяющихся фаз. Элементы-примеси активно воздействуют на диффузионные процессы, изменяют условия зародышеобразования, нарушают термодинамическое равновесие на границах зерен.

В зависимости от химического и минералогического состава и предыстории термообработки исходных шихтовых материалов и продуктов металлургических переделов микроэлементы могут присутствовать в чугунах и сталях в твердом растворе, в виде продуктов ликвации, кристаллизации из расплава или выделений из твердого раствора и т.п. Как правило, существенное влияние микропримесей на свойства металла связано с их присутствием на границах зерен, определяемым протеканием процессов межкристаллической ликвации. Хотя равновесная концентрация микроэлементов в стали или чугуне чрезвычайно мала, в результате ликвации на межзеренных и межфазных границах она может оказаться в несколько

десятков, сотен и даже тысяч раз выше. Теоретически при диаметре кристаллического зерна 30 мкм и концентрации примесного микроэлемента 10 г/т может оказаться перекрытой вся граница зерна слоем толщиной в один атом. Если учитывать процессы макроликвации, то нельзя считать безопасной даже концентрацию 1 г/т. Общеизвестно, что границы зерен служат препятствием для развития деформации и трещин, придают прочность и вязкость, но, с другой стороны, они же составляют самое слабое место структуры материала в целом. Поэтому межкристаллическая ликвация является причиной «охрупчивания» границ зерен, межкристаллической коррозии и, как следствие, снижения прочности изделия.

Особое значение имеет проблема так называемых бродячих элементов. Металлургический термин «бродячие элементы» пришел из американского сленга (бесцельно скитающиеся бродяги всегда были нежеланными гостями). В отечественной специальной литературе иногда используется термин «циркулирующие элементы». Наиболее важными бродячими элементами считаются Cu, Sn, Zn, Pb, Bi, Sb, Ni, Cr, Mo, V. В общем случае элемент-примесь может быть либо микролегирующим, либо бродячим, что определяется его содержанием и общим составом производимого металла. В литературе нет специального разделения на бродячие, микропримесные и следовые элементы. Распространено мнение, что следовые элементы присутствуют в металлах в столь низких концентрациях и в таких формах, что они не оказывают вредного влияния на качество стали. В отличие от них бродячие элементы не только оказывают вредное воздействие на качество металла, но и не могут быть легко удалены из него и поэтому постоянно аккумулируются во время кругооборота сталь – металлолом – сталь.

Для современного амортизационного лома черных металлов типично повышенное содержание хрома, меди, никеля, олова и мышьяка. Для меди, хрома и никеля в последнее десятилетие утвердилась специальная общепринятая аббревиатура «CCN». Считается, что на эти элементы-примеси металлургическими способами повлиять практически невозможно. Поэтому регламентированные в стандартах значения могут быть выдержаны только при селективном подборе лома [53].

Наличие вышеупомянутых элементов в стальном прокате значительно ухудшает показатели прочности, пластичности и вязкости, что приводит к появлению поверхностных дефектов на готовых изделиях (табл. 9.3).

Таблица 9.3

**Типичные элементы-примеси и механизм их влияния на свойства стали**

Свойства	Элементы-примеси	Механизм влияния
Поведение при превращениях и прокаливаемость	Хром, молибден, марганец, никель, медь, олово, бор, кобальт, ванадий, титан	Задержка феррито-перлитного превращения в пользу образования мартенсита или бейнита
Величина зерна	Алюминий, титан, ниобий, азот	Образование нитридов, приводящее к уменьшению подвижности границ зерен и затруднению их роста
Прочность	Хром, молибден, марганец, медь, олово, ниобий, вольфрам, алюминий, ванадий, титан, кремний	Образование карбидов или нитридов, блокирующих дислокации
Вязкость и отпуская хрупкость	Медь, олово, мышьяк, сурьма, фосфор, сера	Сегрегация на границах зерен, приводящая к межкристаллитному охрупчиванию при нагружении
Износостойкость	Алюминий, кислород, кальций, кремний, титан	Усиление напряженного состояния, приводящее к образованию усталостных трещин
Разливаемость и горячая деформируемость	Алюминий, азот, медь, олово, сурьма, никель, фосфор, свинец, висмут, теллур, бор, титан, ниобий	Образование легкоплавких фаз или твердых выделений (нитридов, карбидов), вызывающих охрупчивание, снижение вязкости и горячеломкость
Стойкость к образованию окалины	Хром, молибден, никель, медь, олово, мышьяк, сурьма	Образование компактных слоев окалины, усиливающее ее сцепление с металлом
Холодная деформируемость	Алюминий, азот, молибден, никель, медь, кремний	Образование твердых растворов, приводящее к повышению условного предела текучести при мягком отжиге
Обрабатываемость резанием	Алюминий, свинец, сера, теллур, кальций, кремний, кислород	Абразивное воздействие твердых оксидных включений

Опробовано большое количество методов подготовки лома:

1) механическая разделка, основными видами которой являются криогенное дробление, автоматизированная сортировка, удаление органических веществ, хлорное выщелачивание, электролитическое и химическое удаление покрытий;

2) удаление загрязняющих веществ в ходе термообработки лома, которая позволяет удалить компоненты с низкой температурой плавления и некоторые сульфиды;

3) селективное плавление или испарение, включая окисление и сульфурирование;



4) испарение примесей в вакууме.

В настоящее время необходимость удаления загрязняющих элементов еще не обострилась до такой степени, чтобы заставить реализовать перечисленные процессы. Вместе с тем можно констатировать, что экономически эффективные и экологически безопасные методы удаления загрязняющих элементов на промышленном уровне пока не разработаны. Поэтому в настоящее время проблема примесей цветных металлов решается двумя способами:

- подбором шихты и способом производства;
- разбавлением, т.е. использованием в шихте помимо лома чистых первородных материалов (чугуна, металлizedованного сырья, карбида железа).

Однако существенные изменения в последние годы происходят и в индустрии добычи природного сырья – железных руд. Железорудная база индустриально развитых стран в основном формируется богатыми месторождениями Бразилии, Австралии, Канады, Швеции, ЮАР и Северо-Западной Африки (Мавритания и Либерия). Запасы железной руды на действующих рудниках уменьшаются. При этом большинство разрабатываемых в настоящее время железорудных месторождений располагается в непосредственной близости к другим железорудным месторождениям, и многие добывающие предприятия увеличивают срок своей деятельности и объем добычи руды путем перехода к эксплуатации соседних месторождений.

Владельцы большинства горных предприятий указывают на большие запасы железной руды в уже освоенных районах и в дальнейшем предполагают производить железорудную продукцию в количестве, удовлетворяющем спрос на нее в течение многих лет, но у специалистов есть основания полагать, что эта железорудная продукция не будет удовлетворять ряду важнейших требований. В частности, четко обозначилась тенденция к тому, что с течением времени руда, добываемая на этих предприятиях, становится мелкокусовой, возрастает количество рудной мелочи. Особо следует отметить, что в переработку идет руда с высоким содержанием фосфора, серы и примесных микроэлементов.

Поскольку примесным микроэлементам большое значение стали уделять лишь в последние годы, на многих рудниках не систематизировали сведения, полученные при прежней геологической разведке, или эти сведения анализировали с совершенно иной точки зрения. Поэтому геологам и работникам, занимающимся планированием, еще недоста-

точно хорошо известно, как распределяются микроэлементы в объеме рудного пласта, как они связаны между собой или с минералами и т. д. Для получения этих данных необходимо проведение масштабных дополнительных геостатистических и минералогических исследований.

Новый взгляд на проблему микроэлементов в изделиях из железа сформировался совсем недавно. В процессе исследований, связанных с разработкой новых технологий рафинирования стали и чугуна (в стремлении к повышению чистоты металла), обратили внимание на возможность рационального использования для повышения качества металлургических изделий композиций микропримесей, которые ранее считались вредными. К таким композициям относятся, например, сульфиды, оксиды, фосфиды, нитриды, бориды, галогениды, арсениды, карбиды. В последнее время были доказаны:

- целесообразность присутствия в никельхроммолибденовых сталях сульфидов марганца (MnS) и микропримесей (Ti, Zr и редкоземельных элементов);

- полезность связывания в конвертерной стали микропримесей бора в нитриды, что обеспечивается присутствием в металле азота в количестве не менее 50 г/т металла, хотя многими сертификатами рекомендуется содержание азота в стали менее 40 и даже менее 20 г/т;

- эффективность микролегирования медьсодержащих сталей фосфором с целью замедления процессов поверхностного расслаивания и т.д.

В результате исследовательская работа получила новое направление: достижение равномерного распределения микроэлементов в металле и поиск композиций микроэлементов, повышающих качественные характеристики изделий. В XXI в. практически на всех предприятиях черной металлургии индустриально развитых стран введен мониторинг 8–10 примесных микроэлементов по всему производственному циклу получения стальной металлопродукции. На повестке дня одним из главных становится вопрос об управлении потоками микроэлементов, особенно микропримесей циркулирующих в рамках производственного и глобального рециклинга металлургических материалов и продукции [560–563].

***Сравнительная оценка выплавки стали в конвертере и в дуговой печи с позиции удаления нежелательных примесей.*** В кислородно-конвертерном и электросталеплавильном производстве возможно использование чугуна и лома в широком диапазоне их соотношения

в шихте [564, 565]. В конвертерном процессе обычно используется 70...90 % жидкого чугуна и 10...30 % лома. Плавка в современной дуговой печи возможна с использованием до 60 % жидкого чугуна, однако в обычных условиях дуговые печи работают на 100 % лома [566].

Таким образом, два сталеплавильных процесса в своей современной форме сильно различаются по количеству используемого металлолома, который привносит в сталеплавильный процесс загрязняющие и легирующие элементы. Плавка и в кислородном конвертере, и в дуговой печи проходит в окислительной среде. Самое низкое химическое сродство к кислороду при 1600 °С имеет медь, далее следуют никель, мышьяк, сурьма, олово, молибден, фосфор, железо, цинк и хром. Если избавиться от примесей посредством окисления с образованием соответствующих оксидов невозможно, применяется технология удаления их под вакуумом. Однако даже в вакууме невозможно снизить содержание мышьяка, сурьмы и свинца до уровней ниже 0,1 %. Медь и олово вообще невозможно удалить вакуумированием расплава. Микропримеси можно подразделить на три группы: неудаляемые; ограниченно удаляемые; легко удаляемые микропримеси (таблицы 9.4–9.7). Сравнительный анализ показывает, что большинство микропримесей вносится с металлоломом.

Таблица 9.4

#### Неудаляемые микропримеси

Источник поступления	Элементы					
	Вольфрам	Медь	Молибден	Висмут	Никель	Кобальт
Предшествующая плавка	+		+		+	
Лом	+	+	+	+	+	+
Чугун		+			+	

Таблица 9.5

#### Ограниченно удаляемые примеси

Источник поступления	Элементы					
	Мышьяк	Олово	Сурьма	Хром	Фосфор	Азот
Атмосфера						+
Газ для перемешивания						+
Предшествующая плавка	+			+		
Руда	+		+			
Лом	+	+	+	+	+	+
Чугун	+		+	+	+	+
Добавки					+	
Легирующие				+		

Таблица 9.6

**Легкоудаляемые примеси, поступающие из руды и предшествующей плавки**

Источник поступления	Элементы					
	Водород	Сера	Кислород	Свинец	Цинк	Титан
Атмосфера	+		+			
Огнеупоры	+		+			
Предшествующая плавка				+		+
Руда			+			
Лом		+		+	+	+
Чугун		+				
Шлак			+			
Добавки	+	+	+			
Легирующие		+				+

Таблица 9.7

**Легкоудаляемые примеси**

Источник поступления	Элементы					
	Ниобий	Ванадий	Бор	Кремний	Алюминий	Кальций
Огнеупоры				+		+
Лом	+	+	+	+		
Чугун				+		
Шлак						+
Добавки				+		+
Раскислители					+	
Легирующие			+	+	+	

В целом процесс в дуговой печи имеет ряд недостатков по сравнению с кислородно-конвертерным с точки зрения достижения низкого содержания неудаляемых микропримесей. При прочих равных условиях содержание вольфрама, меди, молибдена, никеля и кобальта в электростали выше, чем в кислородно-конвертерной стали. Кроме того, сталь из дуговой печи имеет более высокое содержание олова, мышьяка и сурьмы, чем конвертерная. По мнению большинства специалистов, образование и накопление вредных микропримесей в жизненном цикле стальных изделий будет существенно ухудшать ситуацию в будущем [555, 560–566].

### **9.3. «Имитационная модель рециклинга» вторичных ресурсов черной металлургии в Обществе рециклинга**

Из вышеизложенного следует, что грамотный прогноз количества образования и структуры амортизационного металлолома становится

существенным определяющим фактором в формирующейся системе государственного регулирования потребления вторичных ресурсов железа. Подобный прогноз, как показывают результаты последних исследований (п. 9.1), не может опираться на привычные параметры «норма сбора лома» и «средний срок эксплуатации стальных изделий». Он должен строиться исходя из современной методологии исследований, которую активно разрабатывают в передовых индустриально развитых странах. Этим требованиям соответствует «Методика определения параметров элементопотоков металлов в техносфере» [275, 567]. Методика базируется на принципе оптимизации сценариев производства и эксплуатации металлургического экопродукта и реализована в виде математического описания «Рециклинг – имитационная модель» (Приложение 12). При выполнении расчетов и составлении прогнозов стальные изделия, находящиеся в сфере потребления, подразделяются на группы в зависимости от длительности периода эксплуатации (как правило, три группы, соответствующие кратко-, средне- и долгосрочному временному интервалу).

Каждый поток характеризуется коэффициентами и функциями, описывающими распространение железа и примесных элементов в природной среде, накопление их в техногенных месторождениях, фондах и других элементах техносферы в зависимости от длительности рассматриваемого сценария и исходного (накопленного) количества железа в сфере потребления (металлофонде). Обратный лом предприятий и отходы металлообработки рассматриваются как вторичные материалы, образующиеся в один год с производством металлопродукции. Амортизационный лом образуется спустя несколько лет или несколько десятков лет после производства и использования металлопродукции в готовых изделиях. Количество амортизационного лома, которое образуется в некотором году, рассчитывается на основе данных производства за предшествующие годы и показателей эксплуатационной долговечности изделий с использованием модели баланса популяции.

Расчетной (оптимизационной) задачей является определение «сценария», при котором достигается определенный уровень потребления стальной (железной) продукции по конкретным сферам потребления при минимальных затратах природных ресурсов, выбросах, уровне накопления примесных микроэлементов в процессе рециклинга

и максимальной доле использования вторичных ресурсов железа. К управляющим воздействиям относятся: распределение металлолома по маршрутам (конвертерному или электросталеплавильному), длительность пребывания металлопродукции в различных сегментах сферы потребления, распределение металлопродукции между различными сегментами сферы потребления, уровень сбора металлолома, наличие экспорта или импорта металлопродукции, использование ресурсов депонирования, степень перехода железа в готовую продукцию по конвертерному и электросталеплавильному маршрутам.

#### *Анализ движения железа в экономике Японии в 1958–2008 гг.*

Для оценки корректности разработанной модели рециклинга вторичных ресурсов железа были выполнены расчеты параметров движения железа в экономике Японии. Выбор объекта исследований обусловлен наличием необходимой официальной информации об объемах производства и потребления стальной продукции в этой стране, а также тем обстоятельством, что именно для условий Японии была построена методика оценки вторичных ресурсов черной металлургии, аналогичная разработанной. При выборе исходной информации были использованы источники [568–578], наиболее важные данные приведены в Приложении 13.

Основные результаты расчетов представлены на рис. 9.5–9.7. На рис. 9.5 показано изменение объема и структуры металлофонда железа Японии. Результаты очень хорошо коррелируются с данными официальной статистики и оценками специалистов [568, 570, 572, 574, 575].

Обращает на себя внимание характерный вид кривой общего количества железа в металлофонде индустриально развитой страны. Как указывалось выше, Япония относится к странам, которые уже прошли максимум в развитии производственных мощностей черной металлургии, ориентированных на использование природных ресурсов. Накопленный металлофонд железа позволяет этой стране перейти на модель черной металлургии, ориентированную на вторичные ресурсы железа (даже при сохранении высокого уровня экспорта металлопродукции и металлолома) [572–577].

Следует отметить особенность кривых, иллюстрирующих изменение отдельных составляющих металлофонда. Максимальный объем металлофонда изделий краткосрочного потребления, т.е. товаров, обе-

спечаивающих быт, был достигнут к началу 80-х годов XX в., максимум для продукции среднесрочного потребления (оборудования, приборов, легкодемонтируемых конструкций и т.п.) приходится на конец 80-х годов, и, наконец, максимальное насыщение долгосрочной сферы (капитальное строительство и инфраструктура) отмечается в начале 90-х годов. Подобное изменение структуры металлофонда характерно для всех стран Запада, долгое время ориентировавшихся в своем развитии на модель общества потребления [574–578].

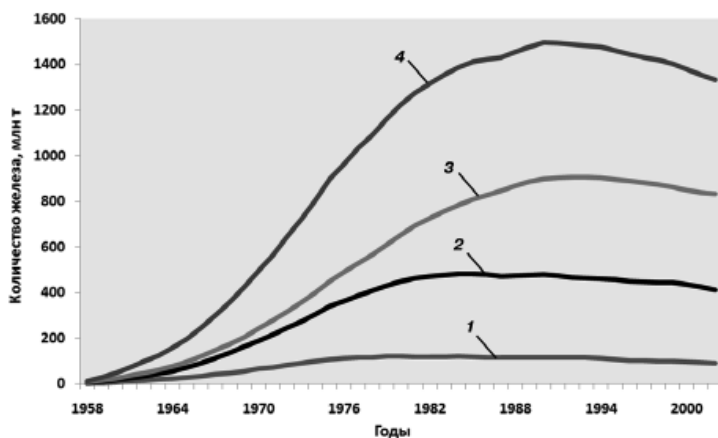


Рис. 9.5. Изменение объема и структуры металлофонда железа Японии в 1958–2008 гг.:

- 1 —  $Fe_{кр}$  — количество железа в изделиях краткосрочного потребления;
- 2 —  $Fe_{ср}$  — количество железа в изделиях среднесрочного потребления;
- 3 —  $Fe_{дл}$  — количество железа в изделиях долгосрочного потребления;
- 4 —  $Fe_{общ}$  — общее количество железа в сфере потребления

Данные, приведенные на рис. 9.6, наглядно демонстрируют, что главной составляющей в потерях железа вплоть до настоящего времени, остаются потери, связанные с обращением с вторичными ресурсами железа. Лишь после принятия в 2000 г. соответствующих мер по принципиальному изменению структуры потребления ресурсов металлов в рамках построения Общества рециклинга, наметилась тенденция к уменьшению потерь металла, снижению выбросов в окружающую среду и уменьшению масштабов накопления железа в составе техногенных месторождений.

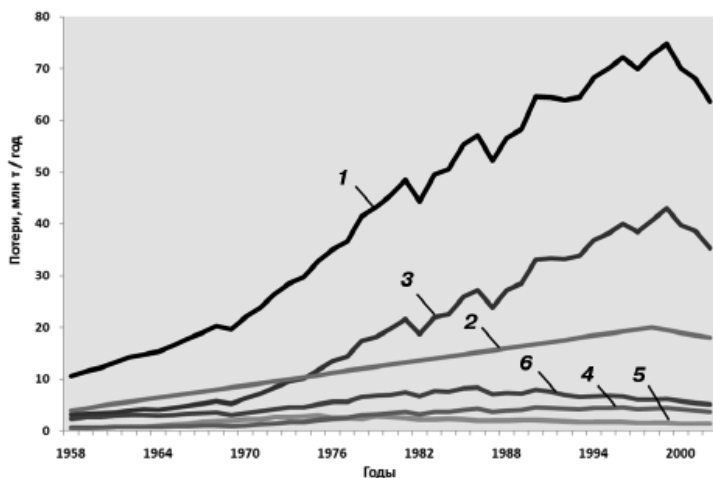


Рис. 9.6. Потери железа на основных стадиях производства и потребления продукции и обращения с вторичными ресурсами:  
 1 – общие потери; 2 – при подготовке металлолома к металлургическому переделу;  
 3 – при сборе металлолома; 4 – в сфере эксплуатации; 5 – при металлообработке;  
 6 – при производстве стального проката

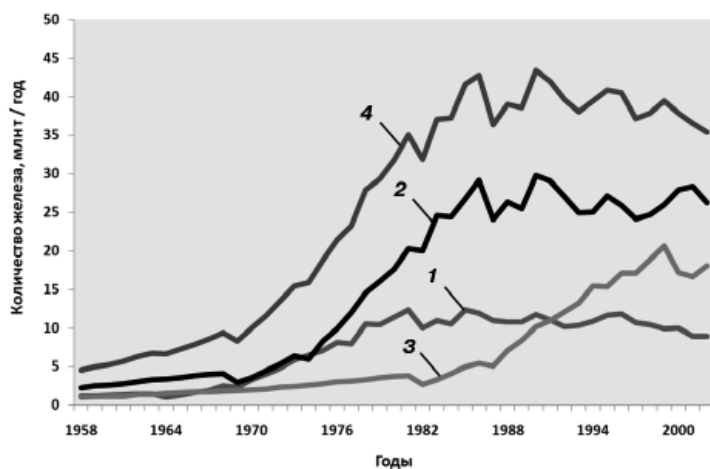


Рис. 9.7. Изменение структуры потребления железа амортизационного металлолома в экономике Японии в период 1958–2007 гг.:  
 1 – в краткосрочной сфере; 2 – в среднесрочной сфере;  
 3 – в долгосрочной сфере; 4 – общее количество лома



Данные рис. 9.7 показывают, что в структуре потребления амортизационного лома прослеживаются ярко выраженные временные периоды. На первом этапе наращивания производства металлопродукции, примерно в течение 10 лет (1958–1970 гг.), доля всех видов амортизационного лома, используемого в качестве вторичных ресурсов примерно одинакова, затем наблюдается период интенсивного роста потребления металлолома изделий, покинувших кратко- и среднесрочную сферу потребления металлопродукции, который завершается стадией относительной стабилизации. Начиная с 80-х годов наблюдается стабилизация потребления вторичных ресурсов металлолома из изделий краткосрочной сферы потребления (на уровне 10...12 млн т/год); со второй половины 1980-х годов имеет место стабильный уровень использования вторичных ресурсов железа среднесрочной сферы потребления (на уровне 25...30 млн т/год). В это же время с 1985 по 2000 г., отмечается рост потребления амортизационного лома изделий из долгосрочной сферы потребления (с 5 до 20 млн т/год).

#### **9.4. Анализ влияния различных факторов на параметры рециклинга**

Адаптация имитационной модели рециклинга к условиям черной металлургии Японии позволяет проанализировать влияние различных факторов на параметры использования вторичных ресурсов железа и общую структуру ЖЦИ из стального проката в рамках различных экологических сценариев. Рассматривались прогнозные сценарии развития экономики Японии на период до 2040 г. с учетом перехода на социальную модель Общества рециклинга с 2011 г. Предполагается, что с 2011 года производится законодательное («социальное») регулирование сроков эксплуатации металлоизделий и параметров обращения с вторичными ресурсами металлов.

Рассмотрим влияние длительности периодов эксплуатации в рамках сценариев с короткими (сценарий 1) и длительными (сценарий 2) периодами эксплуатации металлопродукции (табл. 9.8).

*Таблица 9.8*

##### **Длительность пребывания изделий в сферах потребления**

Сфера потребления	Длительность пребывания изделий в сфере потребления, годы	
	Сценарий №1	Сценарий №2
Краткосрочная сфера	2	8
Среднесрочная сфера	5	15
Долгосрочная сфера	20	30

На рис. 9.8 и 9.9 показано количество железа изделий, покинувших различные сферы эксплуатации в зависимости от реализуемого сценария, а на рис. 9.10–9.12, соответственно, количество использованного амортизационного металлолома изделий различных сроков эксплуатации и суммарное количество перерабатываемых вторичных ресурсов железа.

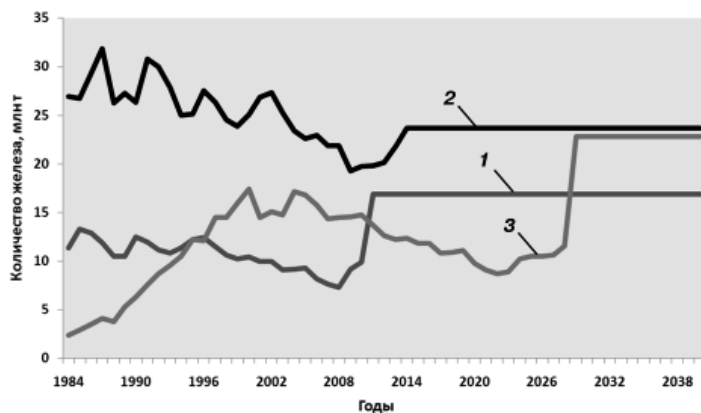


Рис. 9.8. Количество железа в изделиях, покинувших различные сферы эксплуатации по сценарию 1:  
1 – краткосрочную; 2 – среднесрочную, 3 – долгосрочную

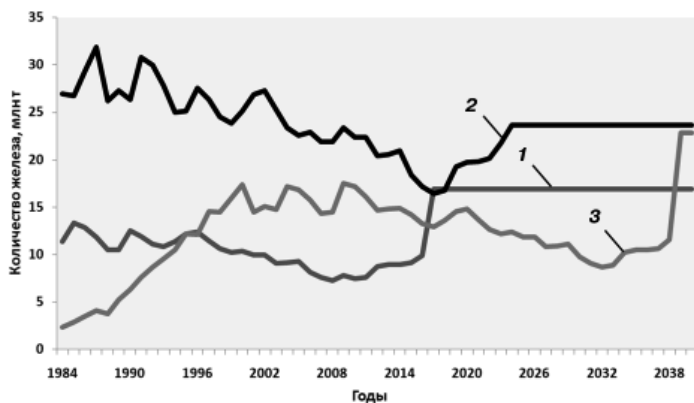


Рис. 9.9. Количество железа в изделиях, покинувших различные сферы эксплуатации по сценарию 2:  
1 – краткосрочную; 2 – среднесрочную, 3 – долгосрочную

Данные рис. 9.13 показывают, что при социальном регулировании потребления вторичных ресурсов железа необходимо учитывать прогнозируемый дефицит амортизационного лома, который по сценарию №2 (по сравнению со сценарием 1) составит 5...10 млн т в течение 2012–2020 гг. и около 15 млн т в течение 2030–2040 гг.

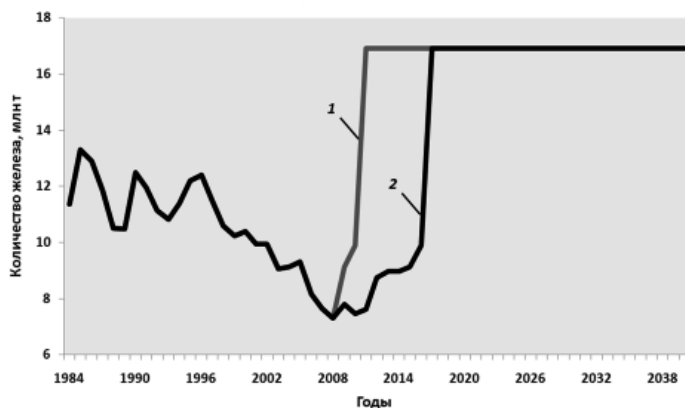


Рис. 9.10. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из краткосрочной сферы потребления при различных периодах эксплуатации: 1 – 2 года; 2 – 8 лет

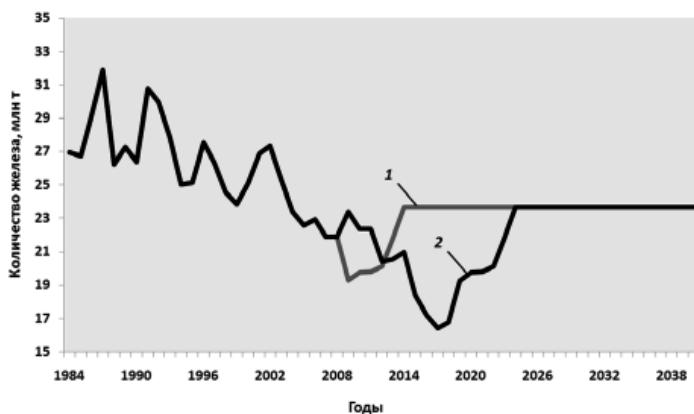


Рис. 9.11. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из среднесрочной сферы потребления при различных периодах эксплуатации: 1 – 5 лет; 2 – 15 лет

Наибольшее влияние на количество используемых вторичных ресурсов железа, естественно, оказывает уровень сбора амортизационного металлолома. В случае реализации соответствующих директив ЕС и Японии о доведении уровня рециклинга основных изделий из металла до 85 % ситуация с вторичными ресурсами железа изменится следующим образом: сценарий 3 характеризует современный уровень рециклинга, а сценарий 4 – прогнозный (85 %) (табл. 9.9, рис. 9.14–9.18).

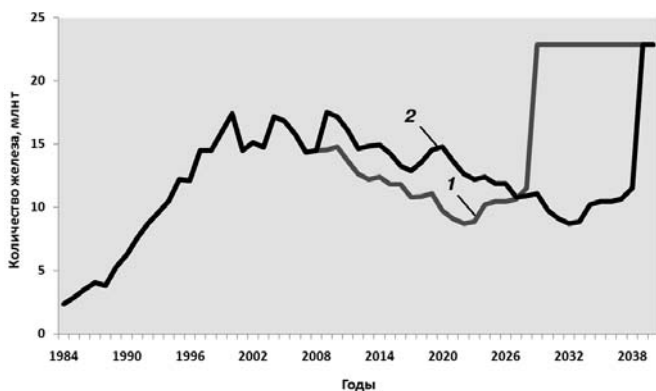


Рис. 9.12. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из долгосрочной сферы потребления при различных периодах эксплуатации: 1 – 20 лет; 2 – 30 лет

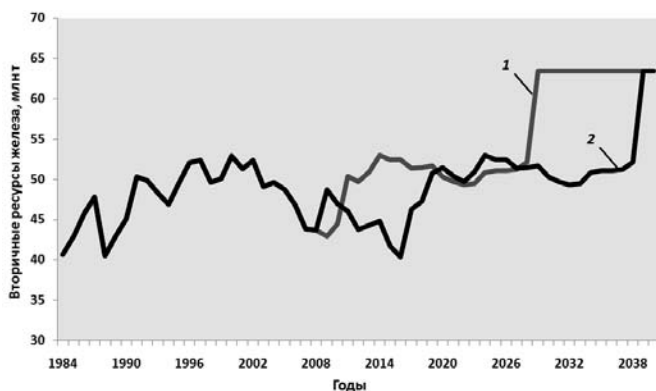


Рис. 9.13. Общее количество использованного амортизационного металлолома по сценариям № 1 и 2: 1 – первый сценарий; 2 – второй сценарий

Таблица 9.9

## Потери при сборе лома, %

Потери при сборе металлолома	Сценарий 3	Сценарий 4
В краткосрочной сфере	40	15
В среднесрочной сфере	30	15
В долгосрочной сфере	55	15

Для обоих рассматриваемых сценариев длительность эксплуатации изделий для различных сфер потребления составляла, лет:

Краткосрочная сфера . . . . . 5  
 Среднесрочная сфера . . . . . 10  
 Долгосрочная сфера . . . . . 25

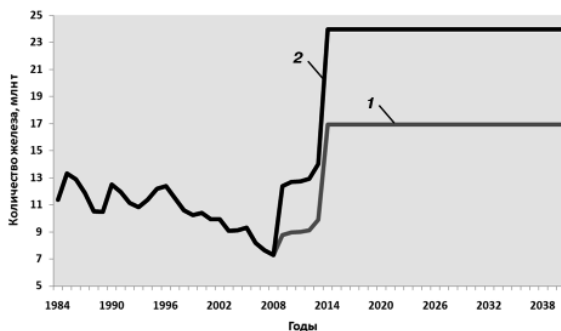


Рис. 9.14. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из краткосрочной сферы потребления по сценариям 3 и 4: 1 – 40 %; 2 – 15 %

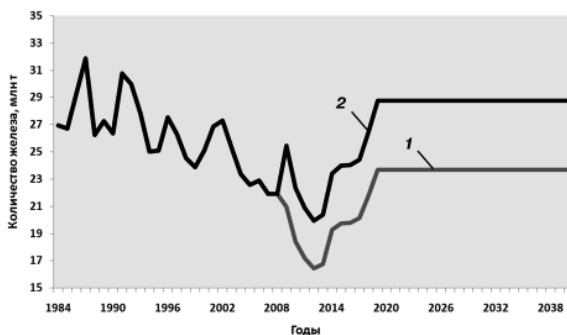


Рис. 9.15. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из среднесрочной сферы потребления по сценариям 3 и 4: 1 – 30 %; 2 – 15 %

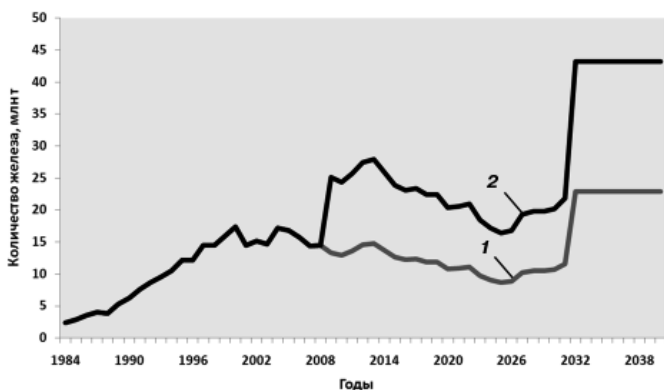


Рис. 9.16. Количество использованного амортизационного металлолома изделий из долгосрочной сферы потребления по сценариям 3 и 4: 1 – 55 %; 2 – 15 %

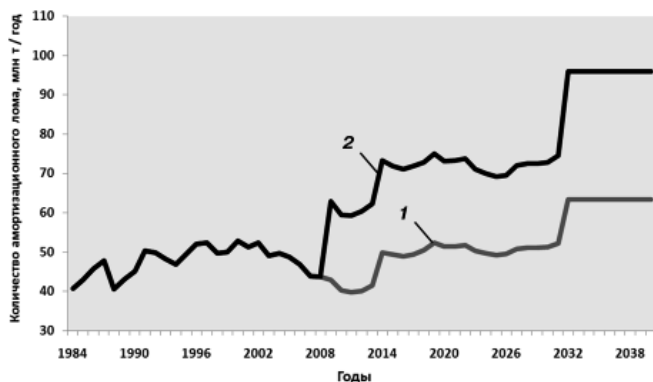


Рис. 9.17. Зависимость использования ресурсов амортизационного металлолома от потерь при сборе по сценариям 3 и 4:  
1 – сценарий с максимальными потерями; 2 – сценарий с минимальными потерями

Таким образом, успешная реализация главного социального фактора влияния на использование вторичных ресурсов железа – повышение доли рециклинга до 85 % – уже к 2015 г. приведет к практически равному уровню потребления природных и вторичных ресурсов. В дальнейшем (начиная с 2033 г.) доля вторичных ресурсов увеличится до  $2/3$ , т.е. будет иметь место ситуация, противоположная су-

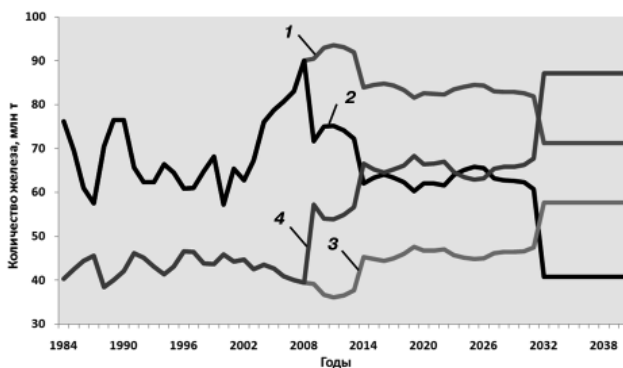


Рис. 9.18. Прогноз изменения потребления природных и вторичных ресурсов железа в зависимости от степени рециклинга металлолома:  
 1 – природное сырье (сценарий 3); 2 – природное сырье (сценарий 4);  
 3 – лом (сценарий 3); 4 – лом (сценарий 4)

существующему в настоящее время положению (см. рис. 9.18). Соответственно изменится и структура металлофонда. После 2033 г. он на  $\frac{3}{4}$  будет формироваться стальными изделиями, произведенными из амортизационного лома (сценарий 4), в то время как в случае сохранения современных параметров рециклинга (сценарий 3) на этом же временном отрезке в металлофонд поступит менее 50 % изделий, полученных из вторичного сырья (рис. 9.19 и 9.20).

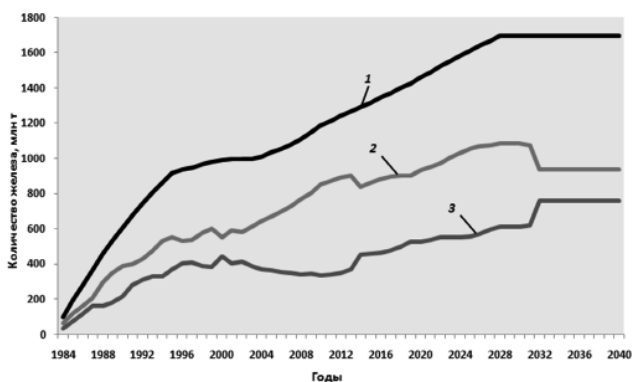


Рис. 9.19. Изменение структуры металлофонда по сценарию 3:  
 1 – металлофонд; 2 – природное сырье; 3 – лом

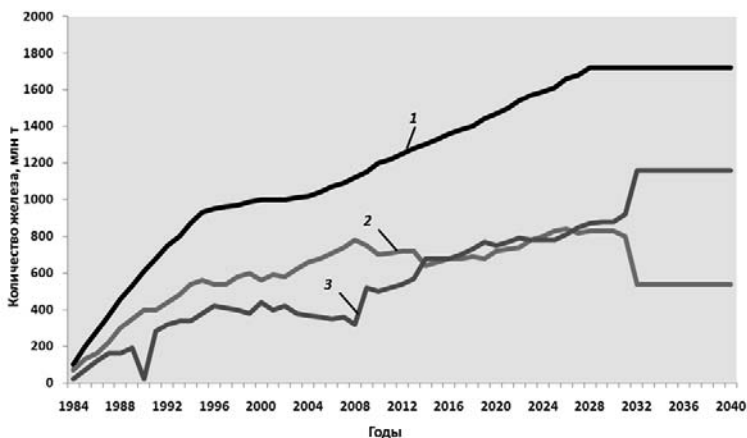


Рис. 9.20. Изменение структуры металлофонда по сценарию 4:  
1 – общий расход ресурсов; 2 – природное сырье; 3 – лом

Оценим максимально возможные по современным представлениям, параметры использования вторичных ресурсов. Сравним сценарий 5, в котором приняты среднемировые показатели потерь железа в производственных процессах и сборе амортизационного металлолома, и сценарий № 6 с максимальными достигн утыми в настоящее время параметрами (табл. 9.10 и 9.11, рис. 9.21). Полученные результаты показывают, что для обеспечения стабильного производства металлопродукции на уровне 130 млн т/год в случае реализации сценария 6 потребуется всего лишь 25 млн т железа природного сырья начиная с 2033 г.

Таблица 9.10

**Потери железа в производственной сфере и при сборе металлолома, %**

Параметр	Сценарий 5	Сценарий 6
Потери железа:	11	7
в конвертерном переделе		
в электросталеплавильном переделе	7	3
при металлообработке	3	1
при подготовке амортизационного лома	15	6
Потери железа при сборе металлолома изделий:		
краткосрочного потребления	40	5
среднесрочного потребления	30	5
долгосрочного потребления	55	5



**Параметры потребления железа металлопродукции для сценариев 5 и 6**

Параметры потребления	Краткосрочная сфера	Среднесрочная сфера	Долгосрочная сфера
Продолжительность периода, лет	2	5	20
Доля каждой сферы в потреблении, %	25	30	45

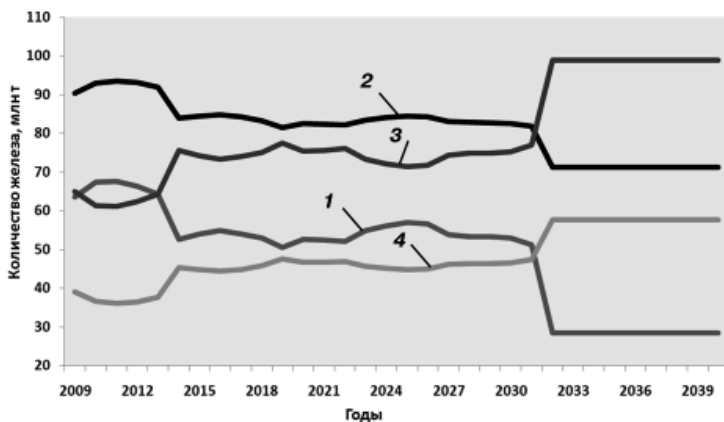


Рис. 9.21. Влияние параметров сбора металлолома и технологических параметров производства на расход природных и вторичных ресурсов железа: 1 – природное сырье (сценарий 6); 2 – природное сырье (сценарий 5); 3 – лом (сценарий 6); 4 – лом (сценарий 5)

Важным параметром, влияющим на структуру потребления ресурсов, является наличие экспорта или импорта металлопродукции и металлолома. Очевидно, что экспорт металла из страны при прочих равных условиях (в том числе при одинаковом общем уровне производства металлопродукции) приводит к снижению потребления вторичных ресурсов и росту потребления природных ресурсов. Описанные выше сценарии 1–6 не предусматривали экспорта или импорта металла в любом виде. Влияние экспорта рассмотрено в сценарии 7 (табл. 9.12).

Результаты расчетов приведены на рис. 9.22 и 9.23. «Изъятие» из внутреннего потребления 42 млн т металлопродукции, направляемой на экспорт, естественно, требует «компенсации» в виде затрат природных ресурсов. Таким образом, увеличение степени рециклинга влия-

Таблица 9.12

**Параметры экспорта металлопродукции для сценария 7**

Год	Экспорт, млн т	Год	Экспорт, млн т
1984	7,35	1995	20
1985	7,84	1996	20
1986	8,33	1997	27
1987	8,82	1998	27,5
1988	9,31	1999	29
1989	9,8	2000	30,2
1990	10,2	2001	40,5
1991	11,6	2002	41,2
1992	14,6	2003	42
1993	15,5	2004	42
1994	16,3	2005–2040	42

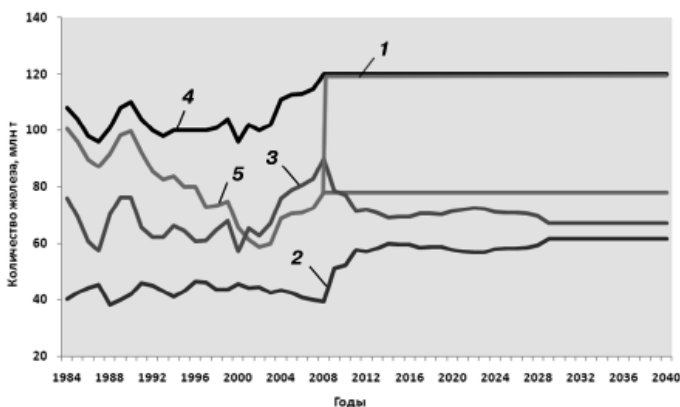


Рис. 9.22 Изменение структуры потребления природных и вторичных ресурсов при учете экспорта металлопродукции по сценарию 7:

1 – потребление суммарное; 2 – лом; 3 – природное сырье; 4 – производство общее; 5 – новое потребление

ет на структуру потребления ресурсов экономики, ориентированной на экспорт, в меньшей степени, чем для экономики, ориентированной на внутреннее потребление. В конкретном рассматриваемом случае сценария 7 потребление природных и вторичных ресурсов начиная с 2009 г. остается практически на одинаковом уровне.

**Оптимизация сценариев.** Выполненные исследования по адаптации и тестированию разработанного математического описания движения железа при производстве и потреблении продукции черной металлургии в условиях Японии позволяют произвести расчеты

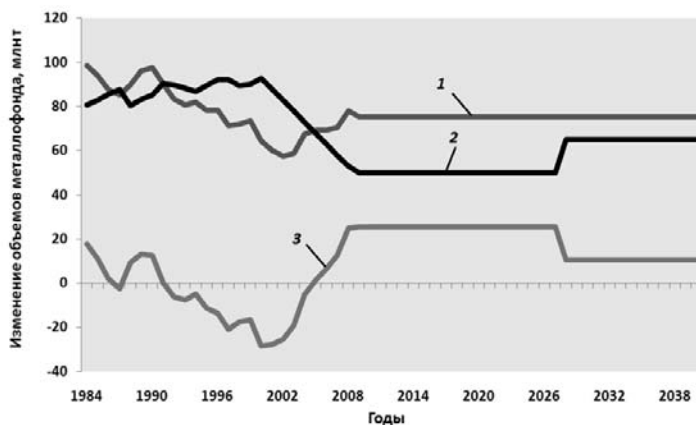


Рис. 9.23. Изменение объема металлофонда по сценарию 7:

1 – вход; 2 – выход; 3 – разница

по оптимизации сценариев возможного развития отрасли. В качестве критериев оптимизации были выбраны:

- минимальные затраты природных ресурсов железа;
- минимальные выбросы в окружающую среду;
- максимальное использование вторичных ресурсов железа (амортизационного лома).

Рассматривались стабильные условия функционирования производственных мощностей, обеспечивающих ежегодное производство металлопродукции 120 млн т/год в период 2011–2040 гг.

Диапазон изменения параметров приведен ниже:

Доля амортизационного лома, направляемого на переработку в электросталеплавильный маршрут $\beta_3$ , % . . .	60...90
Длительность пребывания изделий в сферах эксплуатации, лет:	
Краткосрочной . . . . .	2–5
Среднесрочной . . . . .	5–15
Долгосрочной . . . . .	20–40
Потери при сборе амортизационного лома, % . . . . .	5...40
Экспорт металлопродукции, млн т/год. . . . .	до 42
Импорт металлопродукции, млн т/год . . . . .	до 5
Экспорт металлолома, млн т/год . . . . .	до 10
Использование ресурсов депонирования (железо из ранее сформированных техногенных месторождений), млн т/год . . .	до 3
Потери железа на стадиях производства, потребления и рециклинга изделий были приняты в соответствии с исходными условиями сценария, % . . . . .	6

Общее количество проанализированных сценариев составило 28 624. Наилучшие сценарии, выбранные с использованием квазилексикографического упорядочивания, приведены в табл. 9.13.

Таблица 9.13

**Наилучшие сценарии развития черной металлургии Японии  
по результатам квазилексикографического упорядочивания**

Номер сценария	Критерии оптимизации				Срок эксплуатации		$\beta_3$ , %	Экспорт/импорт	
	Затраты природных ресурсов, млн т	Выбросы в ОС, млн т	Затраты вторичных ресурсов, млн т	Фактор накопления примесей	Краткосрочная сфера	Среднесрочная сфера		продукции	лома
21 173	1208	653	2949	2,43	2	5	90	Нет	Импорт
22 013	1216	700	2942	1,94	2	15	90	Нет	Нет
21 175	1318	648	2730	2,42	2	5	90	«	«
22 183	1337	652	2712	1,91	3	5	90	«	«
1	1327	761	3195	2,58	2	5	60	Импорт	Импорт
841	1339	810	3184	2,06	2	15	60	«	Экспорт

Для всех лучших сценариев:

- потери при сборе амортизационного металлолома составляют 5 % (минимально возможные);
- срок эксплуатации изделий в долгосрочной сфере потребления – 20 лет;
- потребление ресурсов депонирования (3 млн т/год) – максимальное.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Оптимизация по критериям минимальных затрат природных ресурсов и выбросов железа и максимальных затрат вторичных ресурсов не дает однозначно лучшего варианта решения задачи.

2. Наименьшие затраты природных ресурсов имеют место в случае максимально возможной загрузки электросталеплавильных мощностей для переработки амортизационного лома. При этом импорт лома обеспечивает лучшие показатели по расходу природных ресурсов, но при отсутствии импорта лома и максимальном сроке эксплуатации изделий среднесрочной сферы потребления имеет место низкий уровень накопления примесей в металлопродукции.

3. Минимальные выбросы в окружающую среду достигаются в случае максимально возможной загрузки электросталеплавильных мощностей для переработки амортизационного лома, при отсутствии

импорта и экспорта металлопродукции и металлолома. Увеличение срока эксплуатации изделий краткосрочной сферы потребления всего лишь на один год позволяет существенно снизить уровень накопления примесей в металлопродукции.

4. Максимальный уровень переработки вторичных ресурсов, реализуемый как «самоцель» в условиях импорта металлопродукции и при полной загрузке всех мощностей по ее производству, не обеспечивает ни минимальных затрат природных ресурсов, ни минимальных выбросов в окружающую среду.

**Прогноз развития черной металлургии России.** Россия, так же как и Япония, в настоящее время является страной с черной металлургией, продукция которой ориентирована на экспорт. Вместе с тем Россия имеет принципиально другую структуру распределения металлопродукции по сферам потребления, причем насыщение краткосрочной сферы потребления производится за счет постоянно возрастающего импорта изделий. Кроме того, Россия продолжает оставаться страной, экспортирующей большое количество металлолома (табл. 9.14).

Таблица 9.14

**Параметры экспорта и импорта металлопродукции  
и металлолома России, млн т**

Год	Экспорт металлопродукции, млн т	Импорт металлопродукции, млн т	Экспорт лома, млн т
1993	9,2	0,8	6,3
1994	11,4	1,2	10
1995	13,7	1,4	9,8
1996	15,9	1,6	10
1997	18,1	1,8	9,4
1998	12,6	2,1	8,3
1999	15,6	2,5	7,6
2000	22,0	2,9	6,9
2001	20,8	3,2	6,06
2002	23,8	2,9	6,7
2003	20,9	3,9	9,5
2004	23,1	4,0	13,5
2005	25,1	4,2	12,3
2006	27,7	3,9	9,6
2007	30,4	3,5	10,3
2008	32,1	4,0	9,3

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что подавляющее большинство специалистов в долгосрочных прогнозах развития черной металлургии России считает сохранение вы-

сокого уровня экспорта металлопродукции необходимым условием модернизации отрасли. По поводу использования ресурсов металлолома существуют различные точки зрения. Рассмотрим два наиболее вероятных сценария развития черной металлургии России на период до 2040 г. В обоих случаях в качестве обязательного условия принимаем достижение к 2030 г. уровня и структуры внутреннего потребления металлопродукции, отвечающих передовым мировым стандартам (табл. 9.15). Также для обоих сценариев принимаем в качестве обязательного условия выполнение главного пункта директивы 3R – обеспечение рециклинга 85 % металлопродукции, покидающей сферу потребления. Различия в сценариях заключаются в том, что в первом случае имеет место импорт металлолома на достигнутом в настоящее время уровне (сценарий 1Р), а во втором случае вторичные ресурсы железа потребляются внутри страны в соответствии с современными требованиями к эксплуатации и рециклингу стальных металлоизделий (сценарий 2Р). Основная информация, необходимая для расчетов, приведена в табл. 9.16 [579–587].

Таблица 9.15

**Параметры потребления металлопродукции, принятые в сценариях 1Р и 2Р**

Параметр потребления	Краткосрочная сфера	Среднесрочная сфера	Долгосрочная сфера
Продолжительность периода, лет	5	10	20
Доля каждой сферы в потреблении, %	25	30	45
Потери при сборе лома, %	15	15	15

Таблица 9.16

**Параметры потребления ресурсов и производства металлопродукции, принятые в сценариях 1Р и 2Р**

Год	Ресурсы		Производство продукции		
	природные, млн т	вторичные (амортизационный металлолом), млн т	всего	конвертерным (и мартеновским) способом	электросталеплаильным способом
1984	82,10	17,15	88,4	82,22	6,18
1985	83,13	17,46	89,6	83,31	6,29
1986	83,33	17,93	90,2	83,74	6,46
1987	87,07	18,25	93,8	87,23	6,57
1988	88,48	18,82	95,6	88,82	6,78
1989	85,75	19,22	93,5	86,58	6,92
1990	82,51	19,88	91,2	84,04	7,16
1991	64,93	20,60	76,2	68,79	7,41
1992	60,68	20,46	72,3	64,93	7,37

Год	Ресурсы		Производство продукции		
	природные, млн т	вторичные (амортизационный металлолом), млн т	всего	конвертерным (и мартеновским) способом	электростале- плавильным способом
1993	52,01	14,09	58,9	50,31	8,59
1994	45,45	10,90	50,2	42,95	7,25
1995	49,59	11,69	54,6	46,92	7,68
1996	43,90	11,79	49,6	41,81	7,79
1997	38,71	11,76	45,3	37,24	8,06
1998	35,72	12,12	43,5	34,97	8,53
1999	33,47	17,66	45,6	37,65	7,95
2000	50,32	17,45	60,4	52,55	7,85
2001	47,82	16,69	57,5	49,99	7,51
2002	50,39	15,36	58,6	51,69	6,91
2003	55,46	13,34	61,3	55,30	6,00
2004	64,85	8,84	65,6	61,63	3,97
2005	65,22	8,99	66,1	62,05	4,05
2006	66,64	10,15	68,4	63,83	4,57
2007	67,48	10,10	69,1	64,55	4,55
2008	53,10	11,22	57,3	52,25	5,05

Основные результаты расчетов приведены на рис. 9.24–9.28.

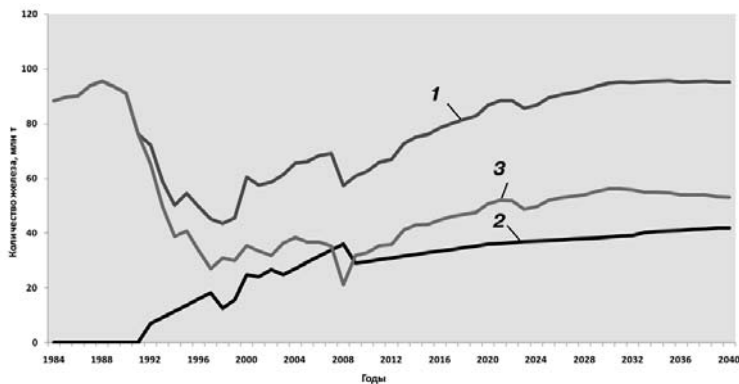


Рис. 9.24. Изменение объема производства (1), внутреннего потребления (3) и экспорта (2) железа металлопродукции России в прогнозных сценариях

Графики на рис. 9.24–9.26 одинаковы для обоих рассматриваемых сценариев. Они отражают изменение внутреннего потребления, экспорта металлопродукции и структуры металлофонда железа при со-

блюдении исходных условий, обеспечивающих устойчивое развитие отечественной экономики и структуры социального потребления. Внутреннее потребление возрастает с 30...40 до 55 млн т. Экспорт (точнее – разница между экспортом и импортом) моното возрастает с 30 до 42 млн т. Обнаруживается тенденция стабилизации размеров металлофонда к 2045 г., как это имеет место в странах ЕС и Японии, организующих экономику по принципу 3R.

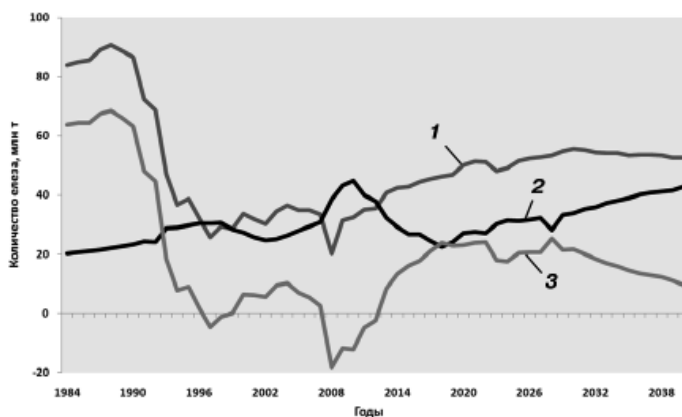


Рис. 9.25. Изменение приращения металлофонда железа России в 1984–2040 гг.:  
1 – вход; 2 – выход; 3 – разница

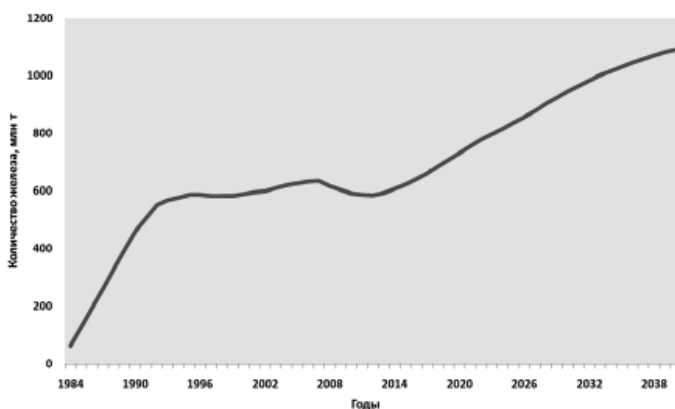


Рис. 9.26. Изменение общего объема металлофонда железа России в 1984–2040 гг.



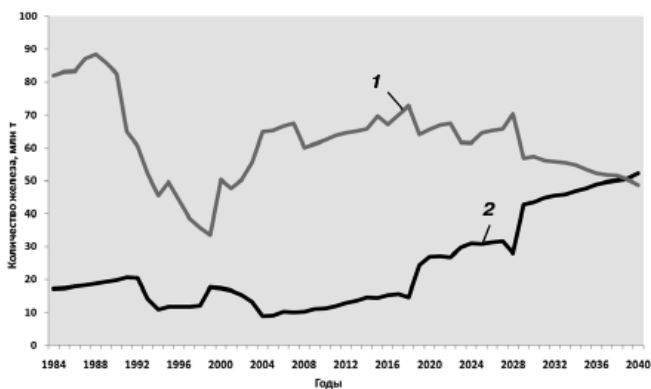


Рис. 9.27. Изменение потребления природных (1) и вторичных (2) ресурсов железа черной металлургией России согласно сценарию 1Р

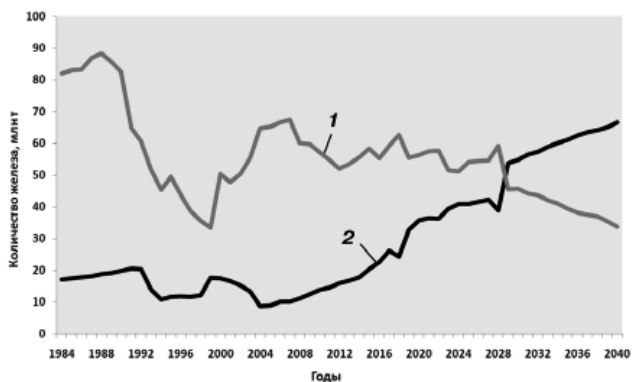


Рис. 9.28. Изменение потребления природных (1) и вторичных (2) ресурсов железа черной металлургией России согласно сценарию 2Р

Главные отличия анализируемых сценариев заключаются в оценке развития потребления ресурсов в электросталеплавильном производстве. В первом случае к 2040 г. в электропечах потребуется перерабатывать около 40 млн т амортизационного металлолома, а во втором – около 60 млн т (если в них не будет использоваться чугун либо другие шихтовые материалы, полученные из природного сырья). При этом по сценарию 2Р потребление природных ресурсов снизится в 2040 г. на 16 млн т, а выбросы в окружающую среду – на 4 млн т.

## Библиографический список

1. **Brundtland, G. H.** Our common future / G. H. Brundtland. UN report? 1987.
2. **Реймерс, Н.Ф.** Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы / Н.Ф. Реймерс. М. : Россия молодая, 1994. 367 с.
3. **Акимова, Т.А.** Экология / Т.А. Акимова, В.В. Хаскин. М. : ЮНИТИ, 1998. 455 с.
4. **Алексееенко, В.А.** Экологическая геохимия : учебник / В.А. Алексееенко. М. : Логос, 2000. 627 с.
5. **Чижикова, В.М.** Основы экологии : курс лекций / В.М. Чижикова. М. : МИСиС, 1998. 102 с.
6. **Карабасов Ю.С.** Экология и управление. Термины и определения / Ю.С. Карабасов В.М. Чижикова, М.Б. Плущевский. М. : МИСиС, 2001. 255 с.
7. **Карабасов, Ю.С.** Экология и управление : учебник / Ю.С. Карабасов, В.М. Чижикова. М. : МИСиС, 2006. 708 с.
8. **Юсфин, Ю.С.** Промышленность и окружающая среда / Ю.С. Юсфин. Л.И. Леонтьев, П.И. Черноусов. М. : ИКЦ Академкнига, 2002. 469 с.
9. **Небел, Б.** Наука об окружающей среде / Б. Небел. М. : Мир, 1994. Т.1. 424 с.
10. **Ревель, П.** Среда нашего обитания: / П. Ревель., Ч. Ревель. М. : Мир, 1995. Кн. 2. 270 с.
11. **Порядин, А.Ф.** Оценка и регулирование качества окружающей природной среды / А.Ф.Порядин, А.Д. Хованский. М. : Прибой, 1996. 350 с.
12. **Данилов-Данильян, В.И.** Экологический вызов и устойчивое развитие / В.И. Данилов-Данильян, К.С. Лосев. М. : Прогресс – Традиция, 2000. 416 с.
13. Agenda 21: Konferenz der Vereinten Nationen Für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 1997.
14. **Игнатьева, М.Н.** Оценка и пути достижения экологической чистоты металлургического производства / М.Н. Игнатьева, С.В. Карелов, Л.А. Мочалова и др.; под ред. Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2008. 391 с.
15. Об охране окружающей среды : федер. закон № 7-ФЗ 10 января 2002. (ред. от 22 августа 2004 г.)
16. **Marshall R.** The Climate Change Levy / R. Marshall // Steel Times. 2000. Vol. 1. P. 24.
17. **Филипп, Ю.А.** Современное состояние и развитие охраны окружающей среды в черной металлургии / Ю.А. Филипп // Черные металлы. 2000. № 9. С. 26–35.
18. Richtlinie 96/61/EG: Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. AB1, L257/26. 24 September 1996.
19. The Environmental Protection Act. 1999 // The IPPC Directive. P. 30
20. **Philipp, J.A.** Integrierter Umweltschutz in der Eisen- und Stahlindustrie, Fachtagung des Abfallentsorgungs- und Altlastensani - rungsverbandes NRW / J.A. Philipp, V. Schulz, 9 Juli 1999.
21. **Fleischandel, A.** Advanced solution for waste-free iron and steel plants / A. Fleischandel, W. Gebert // La Revue de Metallurge – CIT. 1999. № 10. P. 1218.
22. **Баттерман, Х.** Первый опыт работы по принципам устойчивого развития / Х. Баттерман, Б. Хиллебранд // Черные металлы 2001. № 7-8. С. 90–92.
23. **Гросспич, К.-Х.** ВАТ на доменной печи – обзор современных природоохранных технологий на доменных печах / К.-Х. Гросспич, Х.Б., Лунген, В. Теобальд // Новости черной металлургии за рубежом. 2002. № 1. С. 31–35.
24. **Филипп, Ю. А.** Экологические преимущества рециклинга металлопродукции / Ю.А. Филипп, Г. Штиль, В. Фолькхаузен // Черные металлы. 2003 №12. С. 63–66.
25. **Михок, Л.** Охрана окружающей среды на заводах с полным металлургическим циклом. / Л. Михок, Г. Лесински // Новости черной металлургии за рубежом, АО «Черметинформация» 2003. Перевод № 23144.
26. **ГОСТ 30166–95.** Ресурсосбережение. Основные положения. Введ. 01–01–2002. М. : Госстандарт России : Изд-во стандартов, 2001.
27. **ГОСТ 30167–95.** Ресурсосбережение. Порядок установления показателей ресурсосбережения в документации на продукцию. Введ. 01–01–2002. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001.
28. **ГОСТ Р 51387–99.** Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Введ. 01–07–2000. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.

29. **ГОСТ Р 51379–99.** Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы. Введ. 01–09–2000. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.
30. **ГОСТ 30772–2001.** Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения. Введ. 01–07–2002. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2002.
31. **ГОСТ Р 51769–2001.** Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Документирование и регулирование деятельности по обращению с отходами производства и потребления. Основные положения. Введ. 01–01–2002. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001.
32. **ГОСТ 30773–2001.** Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла. Основные положения. Введ. 01–07–2002. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2002.
33. **Дубовик, О.Л.** Экологическое право: учебник для вузов / О.Л. Дубовик. 2-е изд. М. : Проспект, 2007. 688 с.
34. **Херлиц, Х.** Европейские разработки в области окружающей среды / Х. Херлиц // Черные металлы. 2000. № 9. С. 36–41.
35. **Айкман, Т.** Защита человека – оценка вредных веществ / Т. Айкман, К. Херр, С. Айкман // Черные металлы. 2000. № 12. С. 62–66.
36. Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27 Sept. 1996 über die Kontrolle und Verbesserung der Luftqualität.
37. Richtlinie 1999/63/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22 April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft.
38. **Рябова, Т.В.** Современный уровень технического состояния анализа окружающей среды в черной металлургии Японии / Т.В. Рябова // Новости черной металлургии за рубежом. 2001. № 4. С. 100–105.
39. **Штиль, Г.** Новые требования к поддержанию чистоты воздушного бассейна и их влияние на практику выдачи разрешений / Г. Штиль, М. Людвиг, В. Фолькхаузен // Черные металлы. 2002. № 12. С. 58–63.
40. **Philipp, J. A.** A case study-integrated monitoring and control. Ecosteel – Steel for sustainable development. 16–17 June, 1997. Stockholm.
41. Экология, охрана природы и экологическая безопасность: учеб. пособие; под общ. ред. И.В. Данилова-Данильяна. М. : МНЭПУ, 1997. 744 с.
42. **Макаров, С.В.** Экологическое аудирование промышленных производств / С.В. Макаров, Л.Б. Шагалова. М. : НУМЦ Госкомэкологии России, 1997. 144 с.
43. **Матросов, А.С.** Управление отходами / А.С. Матросов. М. : Гардарики, 1999. 480 с.
44. **Петелин, А.Л.** Утилизация отходов термическими методами // Инженерная защита окружающей среды / А.Л. Петелин, П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин; под общ. ред. Бирмана Ю.А., Вурдовой Н.Г. М. : АСВ, 2002. 296 с.
45. **Гарин, В.М.** Экология для технических вузов / В.М. Гарин, И.А. Кленова, В.И. Колесников. Ростов-на-Дону : Феникс, 2001. 384 с.
46. **Федоров, Л.Г.** Управление отходами в крупных городах и агломерационных системах поселений / Л.Г. Федоров. М. : Мир, 1999.
47. **Голубев, О.В.** Металлургические методы переработки промышленных и бытовых отходов: Образование и проблемы переработки твердых бытовых отходов: курс лекций / О.В. Голубев, П.И. Черноусов, А.Я. Травянов. М. : МИСиС, 2005.
48. **Голубев, О.В.** Металлургические методы переработки промышленных и бытовых отходов: Особые виды твердых бытовых отходов: курс лекций / О.В. Голубев, П.И. Черноусов. М. : МИСиС, 2005.
49. **Эверс, Р.** Рынок лома и снабжение ломом черной металлургии Германии / Р. Эверс, В. Шолль, Р. Виллике // Черные металлы. 2003. № 9. С. 49–53.
50. **Herlitz, H.** Environmental challenges – the impact of current and future legislation / H. Herlitz // Ironmaking and Steelmaking. 2001. Vol. 28. № 2. P. 79–83.
51. **Херлиц, Х.** Ужесточение законодательства, связанного с защитой окружающей среды / Х. Херлиц // Новости черной металлургии за рубежом. 2002. № 1. С. 107.
52. Global environmental protection and the steel industry in Europe // Bull. ISI. 1999. № 12. P. 837–842.

53. Бухвальдер, Й. Требования к остаточным материалам для вдувания в доменные печи / Й. Бухвальдер, К.-Х. Гроспич, В. Хартиг и др. // *Черные металлы*. 2003. № 6. С. 25–34.
54. Амелинг, Д. Рециклинг стали – промышленное использование ресурсов и охрана окружающей среды / Д. Амелинг // *Черные металлы*. 2000. № 12. С. 58–62.
55. Юсфин, Ю.С. Ресурсосбережение и экология в металлургии // *Научные школы МИСиС – 75 лет* / Ю.С. Юсфин, Ю.С. Карабасов, Ю.А. Карлов, П.И. Черноусов. М. : МИСиС. 1997. С. 272–283.
56. Юсфин, Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы современного мира и металлургия / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов // *Металлург*. 1998. № 2. С. 25–35.
57. Исихара, К. Подход к оборотному использованию ресурсов в Японии / К. Исихара // *Феррум*. 2003. Т. 8. № 2. С. 67–71.
58. Фудзимацу, К. Технологии экологического управления / К. Фудзимацу // *Сэйсансэй сюппан*. 2005. № 11. С. 25.
59. Белая книга общества с оборотным использованием ресурсов / сост.: департамент охраны среды. Токио : Гэсэй, 2001. 103 с.
60. Фудзимацу, К. Специальный комитет по исследованию перспектив развития экотехнологий на базе черной металлургии / К. Фудзимацу // *Феррум*. 2003. Т. 8. № 9. С. 658.
61. Суми, Х. Материалы 145-й очередной весенней конференции Института черной металлургии Японии / Х. Суми // *Феррум*. 2003. Т. 8. № 10. С. 699.
62. Танимото, Х. Введение в социально ответственное инвестирование SRI / Х. Танимото. Токио : Ниппон кэйдзай симбунсэ, 2007. 114 с.
63. Кабау, Д. Экологически ориентированная продукция черной металлургии / Д. Кабау // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2001. № 2. С. 123–124.
64. Марков, Ю.Г. Социальная экология: Взаимодействие общества и природы: учеб. пособие / Ю.Г. Марков. 2-е изд. Новосибирск : Сибирское университетское изд-во, 2004. 544 с.
65. Бганба, В.Р. Социальная экология: учебное пособие / В.Р. Бганба. М. : Высшая школа, 2004. 309 с.
66. Мацумура, М. Обзор отходов, наиболее нуждающихся в утилизации и исследование системы оборотного использования ресурсов с привлечением процессов черной металлургии / М. Мацумура, Ё. Като, Н. Киёси, К. Кондо // *Дзайрё то пуросэсу*. 2004. Т. 14. С. 953.
67. Сэйити, Х. Утилизация лома черных металлов в экономическом сообществе, ориентированном на рециркуляцию / Х. Сэйити // *Нихон гидзюцу дзёхо сэнта*. 2004. № 10.
68. Народное образование и культура СССР в цифрах в 1985 г. М. : Наука, 1986. С. 241–255.
69. Информационный ежегодник по вторичным черным металлам за 2004 г. Токио : Нихон тэцугэн кёкай, 2005.
70. Штиль, Г. Интегрированная защита окружающей среды шанс или риск? / Г. Штиль, Х. Адам, Д. Алслебен, В. Фолькхаузен // *Черные металлы*. 2005. № 9.
71. Volkhausen, W. Methodische Beschreibung und Bewertung der umweltgerechten Gestaltung von Stahlwerkstoffen und Stahlerzeugnissen. Freiberg, 2003.
72. Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18 Sept. 2000 über Altfahrzeuge.
73. Регламент (ЕС) № 1907/2006 Европейского парламента и Совета Европы от 18 декабря 2006.
74. Понамаренко, А.И. Законодательство RAECN и металлургическое производство / А.И. Понамаренко, П.И. Черноусов // *Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии* : сб. науч. тр. / М. : МИСиС, 2008. С. 202–206.
75. Черп, О. ISO 14000 – международные стандарты в области экологического менеджмента / О Черп, В. Винниченко. М. : Эколайн, 1999.
76. Global environmental protection and the steel industry in Europe // *Bulletin of ISI*. 1999. 4. № 12. P. 837–842.
77. Юсфин, Ю.С. Экобалансы – критерий перспективности промышленных технологий / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // *Металлургия и металлурги в XXI веке* : сб. науч. тр. М. : МИСиС, 2001. С. 194–216.
78. Филипп, Ю.А. Разработка экологических балансов для стальной продукции / Ю.А. Филипп, В. Теобальд, В. Фолькхаузен // *Черные металлы*. 1997. № 8. С. 50.

79. Ekobalancen für Produkte, Bedeutung, Sachstand, Perspektiven, texte 38/92 Umweltbundesamt 1992. Recycling Material-wissenschaftliche Aspekte. Springer-Verlag, 1993.
80. Industrieprojekt mit 40 Beteiligten aus der Grundstoff-rund weiterverarbeitenden Industrie des Instituts für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung an der Universität Stuttgart 1990 bis 1993. Recycling Material-wissenschaftliche Aspekte. Springer-Verlag, 1993.
81. **Philipp, J.A.** / J.A. Philipp, P. Eyerer, S. Erve, et al. Volkbaissen, W. / Stahl und Eisen. 114. 1994. Nr. 11. S. 71–78.
82. **Frame, H.A.** Fachtagung Total Life Cycle Conference: Environmental Impact Calculations of Automotive Parts by Life-Cycle Approach / H. A. Frame, U. Neumann. Wien. October 1995.
83. **Фукушима, У.** Описание жизненного цикла при использовании отходов пластмассы в процессах черной металлургии и оценка затрат / У. Фукушима, М. Симادا, К. Миямото и др. // Lifecycle Assess. 2002. № 7. P. 317.
84. **Narita, N.** / N. Narita, A. Sagisaka, A. Inaba // Lifecycle Assess. 2001. № 65. P. 589.
85. **Fukuda, K.** The Fifth International Conference on Eco balance / K. Fukuda, S. Nomura, K. Kato et al. Tsukuda, 2002 P. 811.
86. Японская ассоциация по переработке тары и упаковки // Никкан когё симбун. 2003. 11 июня.
87. **Kato, K.** / K. Kato, I. Komaki, H. Uematsu // Metals and Technologies. 2001. № 42. P. 10.
88. **Кагэ, К.** Разработка технологии переработки отходов пластика в химическое сырье в коксовых печах / К. Кагэ, С. Номура, Х. Уематсу // Mater Cycles Waste. 2003. № 5. P. 98.
89. **Рябова, Т.В.** Природоохранные меры и капиталовложения в окружающую среду на фирме «Nisshin steel» / Т.В. Рябова // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. № 1. С. 99–102.
90. **ГОСТ Р ИСО 14040–99.** Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. Введ. 01–07–1999. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.
91. **ГОСТ Р ИСО 14041–2000.** Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Определение цели, области исследования и инвентаризационный цикл. Введ. 01–07–2001. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.
92. **ГОСТ Р ИСО 14042–2001.** Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Оценка воздействия жизненного цикла. Введ. 01–07–2002. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.
93. **ГОСТ Р ИСО 14040–2002.** Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Интерпретация жизненного цикла. Введ. 01–07–2002. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004.
94. **Курода, К.** Рециклинг и диффузивность металлов / К. Курода // Матэриа. 2002. т. 41. № 11. С. 750.
95. **Робель, К.Х.** Естественный шаг / К.Х. Робель // Токио : Син хёрон, 1996.
96. **Шмидт-Блеек, Ф.** Фактор 10 совершает революцию в экологической эффективности // Ф. Шмидт-Блеек // Шпрингер ферлаг, 1997.
97. **Верхойген, Г.** Смена парадигмы в европейской промышленной политике / Г. Верхойген // Черные металлы. 2006. № 10. С. 11–15.
98. **Степанова, С.А.** Инициативы 3R / С.А. Степанова // Рециклинг отходов. 2006. № 6. С. 7–5.
99. **Люнген, Х.Б.** Инновационные разработки в области производства чугуна и стали в Германии / Х.Б. Люнген, Р. Штеффен // Черные металлы. 2006. № 12. С. 18–32.
100. **Хаяси, С.** Общество, ориентированное на рециркуляцию: рециклинг железа и стали / С. Хаяси. Токио : Нитэцу гидзюцу дзёхо сэнта, 2004. 18 с.
101. **Орлецкая, Л.В.** Ценные вторичные ресурсы / Л.В. Орлецкая // Рециклинг отходов. 2007. № 6. С. 2–4.
102. Technologies to support a sound material-cycle society. Development of 3R and Waste Management Technologies. Ministry of the Environment. Government of Japan, 2007.
103. **Линденберг, Г.-У.** Значение материального и энергетического КПД в черной металлургии / Г.-У.Линденберг // Черные металлы. 2004. № 7–8. С. 59–64.
104. **Рябова Т.В.** Новые технические решения по охране окружающей среды в черной металлургии Японии / Т.В. Рябова // Новости черной металлургии за рубежом. 2002. № 2. С. 101–114.

105. **Штиль, Г.** Управление потоками материалов в черной металлургии / Г. Штиль, Х. Зигмунд, Б. Фритц и др. // *Черные металлы*. 2003. № 7. С. 43–49.
106. **Бредехефт, Р.** Рециклинг и хозяйство отходов на заводе фирмы Thyssen Krupp Stahl / Р. Бредехефт // *Черные металлы*. 2002. № 12. С. 64–68.
107. **Ратцек, У.** Современное сталеплавильное производство в Донавице / У. Ратцек // *Черные металлы*. 2003. № 11. С. 31–32.
108. **Гуннар, Ш.** Управление потоками материалов на фирме «Thyssenkrupp stahl» / Ш. Гуннар, К. Клаус, М. Ютта, Б. Ральф // *Черные металлы*. 2004. № 3. С. 34–38.
109. Природоохранные меры и капиталовложения в охрану среды на фирме «Nisshin Steel» // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2003. № 1. С. 99–101.
110. **Lee, I.O.** Energy and pollutants reducing technologies in new ironmaking processes at Posco / I.O. Lee, M.K. Shin, M. Cho // *ISI J. International*. 2002. № 42. P. 33–37.
111. Энергосберегающие и природоохранные технологии в новых процессах производства чугуна на фирме «Posco» // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2003. № 3. С. 30.
112. **Бира, Дж.П.** Переработка отходов и побочная продукция стальной промышленности / Дж.П. Бира // *Черные металлы*. 2006. № 2. С. 55–59.
113. **Линденберг, Х.У.** Искраженные условия конкуренции – проблемы для немецкой черной металлургии с точки зрения местопребывания / Х.У. Линденберг // *Черные металлы*. 2006. № 7–8. С. 111–114.
114. **Степанова, С.А.** О концепции развития рынка вторичных ресурсов / С.А. Степанова. М. : Дрофа, 2008. 28 с.
115. **Степанова, С.А.** Лом в понимании Регламента ЕС № 1907/2006 REACH и обязанности, возникающие в отношении него по цепи поставок // *Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии: сб. науч. тр. М. : МИСиС, 2009. С. 5–12.*
116. **Юсфин, Ю.С.** Экологически чистое производство – требование времени / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов // *Металлург*. 2000. № 1. С. 35–37.
117. **Юсфин, Ю.С.** Экология металлургического производства. Раздел 1. Устойчивое развитие: курс лекций / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов. М. : МИСиС, 1997. 110 с.
118. **Юсфин, Ю.С.** Экология металлургического производства. Раздел 2. Ресурсо-экологические основы социально-экономического развития: курс лекций / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов. М. : МИСиС, 1998. 116 с.
119. **Юсфин, Ю.С.** Экология металлургического производства. Раздел 3. Экологически чистое производство: курс лекций / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов. М. : МИСиС, 1998. 155 с.
120. Global environmental protection and the steel industry in Europe // *Bull. of ISI*. 1999. 4. № 12. P. 837–842.
121. **Biviano, M.B.** Total Materials Consumption. An Estimation Methodology and Example Using Lead / M. B. Biviano, D. E. Sullivan, L. A. Wagner // *A Materials Flow Analysis. U.S. Geological Survey Circular 1183*. 2003. P. 26.
122. **Brown, W.M.** Materials and Energy Flows in the Earth Science Century / W.M. Brown, G.R. Matos, D.E. Sullivan // *U.S. Geological Survey Circular 1194*. 2000. P. 76
123. **Wagner, L. A.** Materials in the Economy – Material Flows, Scarcity, and the Environment / L. A. Wagner // *U.S. Geological Survey Circular 1221*. 2001. 29 P.
124. **Scott, F.** Sibley Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States / F. Scott // *U.S. Geological Survey Circular 1196–A–M*. Reston, Virginia, 2004. P. 182
125. **Савенко, В.С.** Глобальные потоки фосфора в атмосфере и гидросфере / В.С. Савенко, Ю.С. Даченко, К.К. Эдельштейн // *Вестник МГУ. География*. 1999. № 12.
126. **Соболев, Р.Н.** Вольфрам в осадках, осадочных и метаморфических парапородах / Р.Н. Соболев, Г.А. Пелымский, В.И. Старостин // *Вестник МГУ. Геологический бюллетень*. 2002. № 04.
127. **Спектор, О.В.** Металлургические расчеты / О.В. Спектор, В.С. Кокорин, Н.В. Марченко. Красноярск : ГАЦМиЗ, 2003. 76 с.
128. **Батурин, Г.Н.** Фосфор в океанском седиментогенезе / Г.Н. Батурин, В.С. Савенко // *Океанология*. 1997. Т. 37. С. 137–154.
129. **Даченко, Ю.С.** Особенности использования балансовых моделей при оценке эвтрофирования водохранилищ / Ю.С. Даченко // *Вестник МГУ. География*. 1992. Серия 5. № 3.

130. **Савенко, В.С.** О фракционировании химических элементов при переносе их из морской воды в атмосферу / В.С. Савенко // Геохимия. 1990. № 10.
131. **Савенко, В.С.** Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы / В.С. Савенко. М.: ВИНТИ, 1991.
132. **Савенко, В.С.** Атмосферные аэрозоли как источник фосфора в водных экосистемах / В.С. Савенко // Водные ресурсы. 1995. № 22.
133. **Эдельштейн, К.К.** Основы металлогенического анализа при геологическом картировании / К.К. Эдельштейн. М.: МГУ, 1995. 468 с.
134. **Эдельштейн, К.К.** Антропогенные потоки фосфора в глобальном гидрологическом цикле / К.К. Эдельштейн // Вестник МГУ. География. 1997. Серия 52.
135. **Эдельштейн, К.К.** Сброс фосфора с городскими сточными водами в прибрежную зону океана / К.К. Эдельштейн // Океанология. 1998. № 38.
136. **Юсфин, Ю.С.** Техногенные месторождения – новое явление мировой цивилизации / Ю.С. Юсфин, Ю.С. Карабасов, Ю.А. Карпов и др. // Экология и промышленность России. 1997. № 6. С. 33–38.
137. **Афонин, С.З.** Энергосбережение в черной металлургии / С.З. Афонин, Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Муринец // Металлург. 1998. № 8. С. 34–37.
138. **Афонин, С.З.** Продается дым отечества / С.З. Афонин, Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.В. Торгашев // Металлы Евразии. 1998. № 4. С. 96–99.
139. **Юсфин, Ю.С.** Новая методика оценки энергоэффективности производства черных металлов / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Труды пятого международного конгресса доменщиков. Днепропетровск: Пороги, 1999. С. 293–294.
140. **Юсфин, Ю.С.** Оценка энергоэффективности производства черных металлов в современных условиях / Ю.С. Юсфин, Н.А. Архипов, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Сталь. 2000. № 5. С. 88–94.
141. **Потапочкин, А.Н.** Потребление углерода и выбросы CO<sub>2</sub> в черной металлургии: варианты оценки / А.Н. Потапочкин, Л.М. Симонян, П.И. Черноусов, К.Л. Косырев // Сталь. 2004. № 9. С. 69–72.
142. **Потапочкин, А.Н.** Анализ источников выбросов CO<sub>2</sub> в черной металлургии и методика их оценки / А.Н. Потапочкин, Л.М. Симонян, Р.М. Мустафин, П.И. Черноусов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. № 1. С. 73–76.
143. **Юсфин, Ю.С.** Ресурсо-экологические аспекты очистки доменного газа от пыли / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, К.Н. Сысоев // Сталь. 1998. № 3. С. 74–75.
144. **Юсфин, Ю.С.** Очистка промышленных газов от пыли не имеет перспектив в будущем / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, К.Н. Сысоев // Экология и промышленность России. 1998. № 9. С. 21–23.
145. **Юсфин, Ю.С.** Возможности энергосбережения при очистке доменного газа от пыли / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Металлург. 1998. № 9. С. 33–34.
146. **Юсфин, Ю.С.** Оценка «потоков» микроэлементов в производственном цикле предприятия / Ю.С. Юсфин, Ю.А. Карпов, П.И. Черноусов // Металлург. 1995. № 10. С. 34.
147. **Голубев, О.В.** Количественная оценка элементопотоков в природной и техногенной среде / О.В. Голубев, С.С. Кочуров, П.И. Черноусов // Рециклинг отходов. 2006. № 4. С. 17–20.
148. **Черноусов, П.И.** Методика анализа техногенного элементопотока металлов / П.И. Черноусов, Н.А. Коротченко, А.Л. Петелин и др. // Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии: сб. науч. тр. / М.: «МИСиС», 2009. С. 289–293.
149. **Черноусов, П.И.** Методология анализа техногенного элементопотока металлов / П.И. Черноусов, А.С. Коротченко и др. // Вторичные металлы. 2009, № 2. С. 57–60.
150. **Черноусов, П.И.** Зачем металлургии нужны «экологические сценарии»? / П.И. Черноусов, А.С. Коротченко // Металлоснабжение и сбыт. 2009. № 7–8. С. 67–70.
151. **Юсфин, Ю.С.** Ресурсо-экологическая оценка аглодоменного производства / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Сталь. 2001. № 4. С. 1–5.
152. **Юсфин, Ю.С.** Ресурсо-экологическая оценка различных способов производства стали / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Сталь. 2001. № 5. С. 31–33.
153. **Юсфин, Ю.С.** Ресурсо-экологическая оценка различных способов производства стали / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // Сталь. 2001. № 5. С. 42–44.

154. **Юсфин, Ю.С.** Перспективы применения кислорода в доменном производстве / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, С.В. Неделин // *Металлург.* 2002. № 2. С. 43–45.
155. **Вернадский, В.И.** Живое вещество и биосфера / В.И. Вернадский. М. : Наука, 1994. 357 с.
156. **Перельман, А.И.** Геохимия / А.И. Перельман. М. : Высш. шк., 2000.
157. **Перельман, А.И.** Геохимические миграции / А.И. Перельман. М. : Просвещение, 2007.
158. **Фернандес, Х.В.П.** Материалы, благодаря которым сбываются мечты / Х.В.П. Фернандес, П.Н Мартенс // *Черные металлы.* 2006. № 12. С. 63–65.
159. **Reimer, T.** Bedarf und Bedarfsdeckung, DNI – Die Natursteinindustrie / T. Reimer // Geisel Verlag GmbH : Isenhagen, 2005. S. 23.
160. *Bergbau-Info 35/2005, Dusseldorf, August 2005.*
161. **Wagner, L.A.** Materials in the Economy — Material Flows, Scarcity, and the Environment / L. A. Wagner // U.S. Geological Survey Circular. 2001. № 1221. 29 с.
162. **Демина, Т.А.** Экология, природопользование, охрана окружающей среды / Т.А. Демина. М. : Аспект-пресс, 2005.
163. **Иванова, Н.И.** Инженерная экология и экологический менеджмент / Н.И. Иванова, И.М. Факина. М. : Логос, 2003.
164. **Медведева, В.Т.** Инженерная экология / В.Т. Медведева. М. : Гардарики, 2002.
165. **Никаноров, А.М.** Экология / А.М. Никаноров, Т.А. Хоружая. М. : Приор, 1999. 304 с.
166. **Арустамов, Э.А.** Природопользование / Э.А. Арустамов, А.Е. Волощенко, Г.В. Гуськов. М. : Дашков и Ко, 2000. 284 с.
167. **Бобылев, С.Н.** Экономика природопользования / С.Н. Бобылев, А.Ш. Ходжаев. М. : ТЕИС, 1997. 237 с.
168. **Воронцов, А.П.** Рациональное природопользование / А.П. Воронцов. М. : ЭКМО, 2000. 304 с.
169. **Алексеев, В.А.** Миграция и концентрация химических элементов в биосфере / В.А. Алексеев. М. : ГТУ, 1997. 137 с.
170. **Веденяпин, А.А.** О проблемах загрязнения природы России металлами и их соединениями / А.А. Веденяпин, Л.В. Шаумян, М.Д. Батурова // *Вестник комитета РФ по металлургии.* 1996. № 12. С. 38–48.
171. **Веденяпин, А.А.** Фундаментальные экологические проблемы в разработках Российской академии наук / А.А. Веденяпин, И.К. Козлов, Л.В. Шаумян. М. : Наука, 1995. 115 с.
172. **Черников, А.В.** Агроэкология / В.А. Черников, А.И. Чекерес, Р.М. Алексахин, А.В. Голубев. М. : Колос, 2000.
173. **Касимов, И.С.** Экогеохимия городских ландшафтов / И.С. Касимов. М. : МГУ, 1995.
174. **Корте, Ф.** Экологическая химия. Основы и концепции [пер. с нем.] / Ф. Корте, М. Бахадир, В. Клайн ; под ред. Ф. Корте. М. : Мир, 1997. 395 с.
175. **Куклев Ю.И.** Физическая экология / Ю.И. Куклев. М. : Высшая школа, 2001. 356 с.
176. **Ажгиревич, А.И.** Экология / А.И. Ажгиревич, В.В. Гутенев, И.А. Денисова. М. : МарТ, 2006. 767 с.
177. **Голивкин, Н.И.** Минеральное сырье. Железо / Н.И. Голивкин, С.Я. Медведовский, Д.Н.Ефремов. М. : Геоинформмарк, 1997.
178. **Башкин, В.Н.** Биогеохимия / В.Н. Башкин. М. : Научный мир, 2004.
179. **Батурин, Г.Н.** Рудный потенциал океана / Г.Н. Батурин // *Природа.* 2002. № 5.
180. **Краснов, С.Г.** Крупные сульфидные залежи в океане // С.Г. Краснов // *Природа.* 1995. № 2.
181. **Батурин, Г.Н.** Литология и полезные ископаемые // Г.Н. Батурин // *Природа.* 2000. № 5.
182. **Лисицин, А.П.** Современные гидротермальные системы мирового океана // А.П. Лисицин // *Смирновский сборник.* 2000. С. 21–29.
183. **Taylor, S.R.** The Continental Crust: its Composition and Evolution / S.R. Taylor, S.M. McLennan // Blackwell Scientific Publications. 1985. 312 p.
184. **Безуглова, О.С.** Биогеохимия: учебник для вузов / О.С. Безуглова, Д.С. Орлов. Ростов н/Д : Феникс, 2000.
185. **Добровольский, В.В.** География почв с основами почвоведения / В.В. Добровольский. М. : Владос, 2001.



186. **Карлович, И.А.** Геоэкология: учебник для высшей школы / И.А. Карлович. М. : Академический Проект; Альма-Матер, 2005.
187. **Исидоров, В.А.** Экологическая химия: учеб. пособие для вузов / В.А. Исидоров. СПб. : Химиздат, 2001.
188. **Глейк, П.Х.** Водные ресурсы / П. Х Глейк. Нью-Йорк : Изд-во Оксфордского Университета, 1996.
189. **Крайнов, С.Р.** Гидрогеохимия / С.Р. Крайнов, В.М. Швец. М. : Мир, 1992. 463 с.
190. **Вершинина, Т.М.** Атмосфера и дыхание живой природы / Т.М. Вершинина // Биология. 2003. № 41.
191. **Добровольский, В.В.** География микроэлементов: Глобальное рассеяние / Добровольский В.В. М. : Мысль, 1983.
192. **Криксунов, Е.А.** Экология / Е.А. Криксунов, В.В. Пасечник, А.П. Сидорин. М. : Дрофа, 1995.
193. **Максаковский, В.П.** Экономическая и социальная география мира : учебник / В.П. Максаковский. М. : Дрофа, 1999.
194. **Девяткин, В.В.** Справочные материалы по удельным показателям образования важнейших видов отходов производства и потребления / В.В. Девяткин, А.К. Голубин, С.П. Никонорова. М. : Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходами при Минэкономике России и Минприроды России, 1998.
195. **Карабасов, Ю.С.** Сталь на рубеже столетий / Колл. авторов под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2001. 664 с
196. **Рябова, Т.В.** Динамика основных показателей, характеризующих воздействие черной металлургии на окружающую среду / Т.В. Рябова // Бюллетень Черная металлургия. 2001. № 7. С. 39–43
197. **Исаев, В.А.** Нормирование расхода металлической шихты при производстве стали. / В.А. Исаев, И.М. Иванова // Бюлл. Черная металлургия. 2004. № 5. С. 39–43.
198. **Фудзивара, М.** Текущее состояние и задачи на будущее в области эффективного использования металлургических шлаков / М. Фудзивара // Материалы технического семинара памяти Сираиси. Ин-т черной металлургии Японии. 2001. № 44, 45.
199. **Данилов, Е.В.** Современные технологии утилизации сталеплавильных шлаков / Е.В. Данилов // Металлург. 2003. № 6.
200. **Ye, G.** Molten slag, fluxes and salts / G. Ye, E. Burstrom, M. Kuhn, J. Piret. // Scand. J. Metal, 2003, № 32, 7–14.
201. **Fleischanderl, A.** Waste processing and recycling in mineral and metallurgical industries / A. Fleischanderl, U. Gennari. October, 2004, Toronto, CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum).
202. **Слепцов, Ж.Е.** Вдувание конвертерного шлака через доменные фурмы – опыты в экспериментальной доменной печи // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. № 1.
203. **Диппенаар, Р.** Промышленное использование шлака (утилизация и оборотное использование доменных и сталеплавильных шлаков) // Новости черной металлургии за рубежом. 2005. № 6.
204. **Grover, H.** Recycling of EAF by-products / H. Grover // IISI – TECHCO. 2004. № 34.
205. **Ameling, D.** Dust, scale and sludge utilization in German steelworks / D. Ameling, H.B. Lungen, K. Steffen // IISI – TECHCO. 2004. № 34.
206. **Eisen, H.-P.** Blast furnace results 2004 / H.-P. Eisen // European Blast Furnace Committee, Gijon. May 2005.
207. **Wang, T.** Recycling of Steelmaking Dust Briquettes to BOF / T. Wang // CAMP-ISIJ. 2004. 90/17. P. 6.
208. **Holliday, K.** Value from EAF Dust / K. Holliday. The ADPL Process, 2000.
209. Steel Statistical Yearbook 2005, Brussels : International Iron and Steel Institute February 2006, p. 10–44.
210. **Юзов, О.В.** Реструктуризация мировой черной металлургии. / О.В. Юзов, А.М. Седых, С.З. Афонин // Бюлл. Черная металлургия. 2003. № 3. С. 13–22.
211. **Катунин, В.В.** Черная металлургия зарубежных стран и России / В.В. Катунин. М. : Черметинформация, 2001. 319 с.

212. Ежегодный бюллетень статистики черной металлургии для Европы, Америки и Азии. Т. XXX. Нью-Йорк : ООН, 2004.
213. Steel Statistical Yearbook 2004. Brussels : International Iron and Steel Institute, 2004.
214. **Бурькин, С.И.** Анализ мирового производства чугуна, стали и железной руды / С.И. Бурькин // Сталь. 2007. № 6. С. 69–73.
215. **Ройтемайер, Д.** Фильтрация под высоким давлением для утилизации конвертерных шлаков / Д. Ройтемайер // Черные металлы. 2005. №2. С. 38–42.
216. Геохимия окружающей среды; под ред. Ю.Е. Саета. М. : Недра, 1990.
217. **Войткевич, Г.В.** Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Коксин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. М. : Недра, 1990.
218. Environmental Protection Agency // Reviews of the Environmental Effects of Pollutants: III. Chromium. May 1978.
219. **Долгополова, А.В.** О загрязнении окружающей среды хромом / А.В. Долгополова // Прикладная геохимия : сб. статей. Вып. 2. М. : ИМТРЭ, 2001. 514 с.
220. **Юсфин, Ю.С.** Анализ движения хрома в природной и антропогенной среде / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, О.В. Голубев // Металлург. 2003. № 6. С. 35–37.
221. **Юсфин, Ю.С.** Опасный хром / Ю.С. Юсфин, О.В. Голубев, Черноусов П.И // Металлы Евразии. 2005. № 1. С. 68–71.
222. **Юсфин, Ю.С.** Проблемы шестивалентного хрома и пути их решения / Ю.С. Юсфин, О.В. Голубев, Т.Я. Малышева, П.И. Черноусов // Ресурсы. Технологии. Экономика. 2005. № 7. С. 15–20.
223. **Юсфин, Ю.С.** Проблемы шестивалентного хрома и пути их решения / Ю.С. Юсфин, О.В. Голубев, Т.Я. Малышева, П.И. Черноусов // Ресурсы. Технологии. Экономика. 2005. № 8. С. 8–14.
224. **Черноусов, П.И.** Какой хром опасен? / П.И. Черноусов // Химия в школе. 2005. № 7. С. 5–10.
225. **Washington, O.** Chromium / O. Washington // International Strategic Mineral Issues. Summary Report. U.S. Geological Survey. Circular 930, 2005. 71 p.
226. **Goonan, T.G.** Chromium statistics / T.G. Goonan, J.F. Papp // US Geological Survey Minerals Information Team, 2001.
227. Mineral Industry Surveys. Summary Report-Chromium // Circular 1137. 2005. 23 p.
228. **Фриц, Э.** Технология производства коррозионностойкой стали: тенденции, разработки, новые проекты / Э. Фриц // Черные металлы. 2003. № 9. С. 69–76.
229. **Артемьев В.А.** Геохимия органического вещества в системе река–море / В.А. Артемьев. М. : Наука, 1993.
230. **Wedepohl, K.H.** The Composition of the Upper Earth's Crust and the Natural Cycles of Selected Metals / K.H. Wedepohl // Metals in Natural Raw Materials. Natural Resources. A paper in Metals and Their Compounds in the Environment. 1991, P. 3–17
231. Минеральные ресурсы мира. Статист. справочник; под ред. П.В. Садовника. М. : ГНПП «Аэрогеология», 2004. Т. 1. 354 с.
232. О состоянии минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2004 г. : государственный доклад. М. : ИАЦ «Минерал», ГНПП «Аэрогеология», 2005.
233. Nriagu, J.O. Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water, Soils by Trace Metals / J.O. Nriagu, J.M. Pacyna // Natural Resources. 1998. V. 212. P. 57–60.
234. **Nriagu, J.O.** A Global Assessment of Natural Sources of Atmospheric Trace Metals / J.O. Nriagu // Natural Resources. 1999. V. 338. P. 47–49.
235. **Nriagu, J.O.** Global Metal Pollution-Poisoning the Biosphere / J.O. Nriagu. Natural Resources. 1999. 333 p.
236. **Голубев, О.В.** Количественная оценка техногенной миграции хрома в водной среде / О.В. Голубев, Н.А. Коротченко, П.И. Черноусов. Экология и развитие общества : сб. науч. тр. СПб: МАНЭБ, 2008. С. 42–46.
237. Технологическая оценка минерального сырья : справочник в 8-ми кн.; под ред. П.А. Остапенко. М. : Недра, ВИМС, 1992–1997.
238. **Потконен, Н.И.** Марганец / Н.И. Потконен, А.С. Столяров, А.А. Шарков и др. Минеральное сырье : справ. М. : Геоинформмарк, 1999. 51 с.

239. **Хазанов, Л.Г.** Марганец СНГ: дефицит и излишек / Л.Г. Хазанов // *Металлоснабжение и сбыт*. 2004. № 11. С. 98–103.
240. **Смирнов, А.А.** Роль марганца в металлургии / А.А. Смирнов, П.И. Югов, Л.А. Баева // *Бюлл. Черная металлургия*. 2002. № 3. С. 3–8.
241. **Борисенко, Л.Ф.** Ванадий / Л.Ф. Борисенко, Н.П. Слотвинский-Сидак, Н.С. Поликашина. Минеральное сырье : справ. М. : Геоинформмарк, 1998. 33 с.
242. **Иванов, В.В.** Экологическая геохимия элементов / В.В. Иванов. М. : Недра, 1996. 572 с.
243. **Черноусов, П.И.** Ванадий: природные и техногенные ресурсы, свойства, производство и потребление / П.И. Черноусов // *Химия в школе*. 2006. №2. С. 6–13.
244. **Лисичкин Г.В.** Сырьевой кризис и проблемы добычи металлов из морской воды / Г.В. Лисичкин // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 6. С. 65–70.
245. **Исидоров В.А.** Экологическая химия: учеб. пособие для вузов / В.А. Исидоров. СПб. : Химиздат, 2001. 304 с.
246. **Carl, A.** Vanadium Statistics 2005 / A. Carl, D. Francesco, R.G. Reese // *USGS*, 2005.
247. **Бобылев, В.** Ванадий – запасов хватит на века / В. Бобылев, А. Бродов, А. Фофанов, Е. Рабинович // *Металлы Евразии*. 2001. № 3.
248. **Букин, В.** О возможности извлечения некоторых редких металлов при комплексной переработке алюминиевого сырья / В. Букин, Е. Лысакова, А. Резник // *Национальная металлургия*. 2003. № 1.
249. **Черноусов, П.И.** Ванадий: производство, потребление, структура рынка / П.И. Черноусов, И.Н. Монахов // *Снабженец*. 2005. № 11. С. 124–129.
250. **Черноусов, П.И.** Вторичные ресурсы ванадия / П.И. Черноусов, С.В. Хромов, И.Н. Монахов // *Рынок вторичных металлов*. 2004. № 4. С. 50–51.
251. **Смирнов Л.А.** Конвертерный передел ванадиевого чугуна / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин. Екатеринбург : Сред.-Урал. кн. изд-во, 2000. 557 с.
252. *Использование ванадия в стали : сб. тр. семинара 28–29 сентября 2002 г. Екатеринбург : УрО РАН, 2002.*
253. **Сирина Т.П.** Извлечение ванадия и никеля из отходов теплоэлектростанций / Т.П. Сирина, В.Г. Мизин, Е.М. Рабинович и др. Екатеринбург : УрО РАН, 2001.
254. **Юсфин, Ю.С.** Новые источники сырья для производства ванадия / Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базилевич, П.И. Черноусов и др. // *Металлург*. 1998. № 6. С. 29–30.
255. **Юсфин, Ю.С.** Ванадий из золы / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Л. Петелин, и др. // *Металлы Евразии*. 1998. № 5. С. 72–73.
256. **Рабинович, Е.** Тенденции и перспективы использования техногенных ванадийсодержащих отходов при производстве пентаоксида ванадия в России / Е. Рабинович, Л. Сухов, И. Выговская, Е. Гринберг // *Национальная металлургия*. 2003. № 1. С. 71–73
257. **Roderick J.H.** Vanadium in Asia – A Fundamental Restructure of Supply / J.H. Roderick, B. Smith // *Metal Bulletin's Asian Ferro-Alloys'99 Conference*. Singapore, April 19–20, 1999.
258. **Монахов, И.Н.** Элементопоток ванадия в техногенной среде / И.Н. Монахов, С.В. Хромов, П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин // *Металлург*. 2004. № 8. С. 35–37.
259. **Эмсли, Дж.** Элементы / Дж. Эмсли. М. : Мир, 1993. 550 с.
260. **Букин, В.** О возможности извлечения некоторых редких металлов при комплексной переработке алюминиевого сырья / В. Букин, Е. Лысакова, А. Резник // *Национальная металлургия*. 2003. № 1. С. 61–65.
261. **Яценко, С.** Металлический галлий из растворов глиноземного производства для электроники и легких сплавов / С. Яценко, В. Диев // *Металлы Евразии*. 2005. № 1. С. 60–61.
262. **Наумов, А.** Младшие братья цветных металлов / А. Наумов, Л. Хазанов // *Металлоснабжение и сбыт*. 2007. № 2. С. 82–84.
263. **Наумов, А.** Малые металлы: есть ли рынок в России? / А. Наумов // *Металлоснабжение и сбыт*. 2008. № 2. С. 38–39.
264. **Хансман, Т.** Новый способ рециклинга металлургических остаточных материалов и восстановления железных руд / Т. Хансман, Р. Фриден, М. Сольви, Ж. Моне // *Черные металлы*. 2001, № 4. С. 26–30.
265. **Fleischandel, A.** Advanced solution for waste-free iron and steel plants / A. Fleischandel, W. Gebert // *La Revue de Metallurgie – CIT*. 1999. №, 10. P. 1218.

266. Способы оценки и меры по предотвращению загрязнения среды на фирме «SIDEX Galatzi» // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. № 3. С. 31.
267. **Hritac, M.** Environmental pollution assessment, prevention and control in the primary sector of SIDEX Galatzi, based on life cycle analysis and IPPC directive / 96/61 EC recommendations / M. Hritac, L. Popescu, D. Savin // Metallurgy and New Materials Researches. 2002. № 1. P. 36–45.
268. **Ситников, М.С.** Переработка шлаковых отвалов на НТМК / М.С. Ситников // Рынок вторичных металлов. 2002. № 4. С. 29–31.
269. **Ярославцева, Н.** НТМК – решение экологических проблем / Н. Ярославцева // Национальная металлургия. 2003. № 1. С. 59–60.
270. **Голов, Г. В.** Переработка и использование техногенных отходов в ОАО НТМК / Г.В. Голов, С. М. Ситников, Е. Г. Калимулина, Т. М. Белозерова // Сталь. 2004. № 5. С. 82–83.
271. **Тарабрина, Л.А.** Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК» / Л.А. Тарабрина, Т.А. Курган, Н.С. Игнатьева // Рынок вторичных металлов. 2003. №34. С. 29–34.
272. **Никитин, Д.Д.** Анализ причин и определение потерь железа при производстве чугуна в условиях ЗСМК / Д.Д. Никитин, М.Ф. Марьясов, А.Ф. Авцинов и др. // Бюлл. Черная металлургия. 2002. № 3.
273. **Салтанов, А.В.** Флагман Евразхолдинга – ЗАПСИБ пошел курсом реконструкции / А.В. Салтанов // Национальная металлургия. 2003. № 2. С. 28–29.
274. **Карабасов, Ю.С.** Проблемы экологии и утилизация техногенного сырья в металлургическом производстве / Ю.С. Карабасов, Ю.С. Юсфин, И.Ф. Курунов, В.М. Чижилова // Металлург. 2004. № 8. С. 27–33.
275. **Черноусов, П.И.** Анализ, учет и прогноз вторичных ресурсов железа в «Обществе рециклинга» / П.И. Черноусов, А.С. Коротченко, А.В. Рябова // Металлург. 2010. № 3, С. 36–42.
276. **Шульц, Л.А.** Долгосрочный прогноз развития технологии массового производства стали / Л.А. Шульц // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 11. С. 40–48.
277. **Мацуно, Я.** Метод популяций в анализе ЖЦИ черной металлургии / Я. Мацуно, И. Дайго, Ё. Адати. Токио : Тэтцу-то-хагане, 2005. 127 р.
278. **Дайго, И.** Построение динамической модели для анализа нагрузки на окружающую среду при оборотном использовании металлопродукции / И. Дайго, Д. Фудзимаки, Я. Мацуно, Ё. Адати. Токио : Сэйсансэй сьуппан, 2005. 22 с.
279. **Товаровский, И.Г.** Пути повышения эффективности использования конвертерных шлаков в доменной плавке / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк и др. // Сталь. 2003. № 4. С. 17–20.
280. **Голубев, О.В.** Российский марганец: природные и вторичные ресурсы / О.В. Голубев, С.С. Кочуров, П.И. Черноусов // Рынок вторичных металлов. 2006. № 5. С. 27–28.
281. **Chernousov, P.** Secondary manganese for Russian metallurgy / P. Chernousov, A. Ershov, O. Golubev // CIS Iron and Steel Review. 2008. № 1–2. P. 12–13.
282. **Вахрушев, В.А.** Минералогия и геохимия железорудных месторождений юга сибирской платформы / В.А. Вахрушев, А.Е. Воронцов. Новосибирск : Наука. Сибирское отд., 1976. 19 с.
283. **Трегубенко, В.В.** Извлечение галлия и германия из железорудного сырья и продуктов его передела В.В. / Трегубенко, Л.Б. Зубков, Л.Г. Матюшев // Черная металлургия. 2003. № 11. С. 67–71.
284. **Бира, Дж.П.** Способствующие возникновению парникового эффекта выбросы газа в стальной промышленности – поиск новых путей для осуществления эффективного и постоянного контроля над выбросами / Бира Дж. П. Материалы Конф. металлургов, Торонто, Канада, 2001.
285. **Birat, J.-P.** Sustainable steelmaking, paradigms for growth and development in the early 21st Century / J.-P. Birat // La Revue de Metallurgie-CIT. 2001. № 1. P. 19–41.
286. **Birat, J.-P.** Slag, Steel and Greenhouse Gases / J.-P. Birat, J.-M. Delbecq, E. Hess // La Revue de Metallurgie-CIT. 2002. № 2. P. 13–22.
287. **Birat, J.-P.** The steel industry's position on climate change / J.-P. Birat. Brussel : IISI, 2000.
288. **Mori, G.** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe / G. Mori, C. Kippenberger, P. Paschen. Hannover : BHM, 1999. 144. Jg (1999), Heft 7.
289. **Birat, J. P.** / J.P. Birat, J.P. Vizios, Y. de Lassat et al // La Revue de Metallurgie-CIT. 1999. S. 1203/15.

290. **Aichinger, H.M.** Energieverbrauch und Emissionen der Straßen-, Bahn-Binnenschiff- und Seeschifftransporte und Verkehrsmengen der Stahlindustrie. Diisseldorf: VDEh, 1999.

291. **Birat, J.-P.** CO<sub>2</sub> emissions and the steel industry's available responses to the Greenhouse effect / J.-P. Birat, J.-P. Vizioz, M. Jeanneau, M. Schneider. Proc. Ironmaking Conf., Vol. 59, 26-29 March 2000, Pittsburgh, USA, P. 409/20.

292. **Birat, J.-P.** Recycling and by-products in the steel industry. Conf. «Recycling and waste treatment in mineral & metal processing: Technical & economical aspects». 16–20 June 2002, Lulee, Sweden.

293. **Birat, J.-P.** Innovations for the steel industry of the 21st century, future directions for the steel industry and CC. Dr Manfred Wolf Symposium, 10–11 May 2002. Zurich, Switzerland, 2002. P. 102/12.

294. **Бира, Ж.-П.** Технологии уменьшения выбросов CO<sub>2</sub> в черной металлургии: исследование их сравнительной эффективности на основе расчетов / Ж.-П. Бира, Ф. Анро, Ж. Данлуа // Черные металлы. 2004. № 2. С. 55–59.

295. **Шмеле, П.** Доменное производство с экологической точки зрения / П. Шмеле, Х. Люнген // Черные металлы. 2004. № 11. С. 40–46.

296. **Гроспич, К.-Х.** Новая установка грануляции шлака: улучшение хода процесса и повышение производительности / К.-Х. Гроспич, В. Эверс, Г. Домбровски // Черные металлы. 2004. № 1. С. 20–26.

297. **Айхингер, Х.М.** Оценка и потенциальные возможности сокращения выбросов CO<sub>2</sub> в технологической цепи доменная печь – конвертер / Х.М. Айхингер, К. Мюльхаймс, Х.Б. Люнген и др. // Черные металлы. 2001. № 10. С. 66–73.

298. **Roth, W., Atmaca, T., Mori, G.** Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe, Teilstudie Eisen. Geologisches Jahrbuch. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe u. staatl. geologische Dienste in der Bundesrepublik Deutschland. Hannover. 1999.

299. **Schlebusch, W.** / W. Schlebusch, G. Strohmeier, W. Gerlach, T. Schwalm // Stahl und Eisen 118 (1998) Nr. 6, S. 115/21.

300. **Султангузин, И.А.** Оценка воздействия металлургического комбината на окружающую среду / И.А. Султангузин, А.П. Яшин, П.А. Шомов // Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии : сб науч. тр. М. : Теплоэн, 2002. С. 296–298.

301. **Лубашев, Ю.А.** Методы построения систем учета и управления материально-энергетическими потоками на примере металлургического предприятия / Ю.А. Лубашев, С.В. Благий // Автоматизация в промышленности. 2003. № 3. С. 36–39.

302. **Лякишев, Н.П.** Электрометаллургия – динамично развивающаяся отрасль сталеплавильного производства / Н. П. Лякишев // Сталь. 2006. № 11. С. 57–63.

303. **Юрлов, А.М.** Энергетический подход к оценке эффективности пылеуловителей / А.М. Юрлов, Ю.А. Юрлов, Ю.Г. Ярошенко, В.Л. Советкин // Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии : мат. 2-й межд. научно-практ. конф., Москва, 3–5 дек. М. : Теплоэн. 2002. С. 458–459.

304. **Черноусов, П.И.** Исследование и разработка методики моделирования поведения попутных элементов в доменной плавке в современных условиях / П.И. Черноусов, А.Л. Петелин // Тр. пятого междунар. конгресса доменщиков. Днепропетровск : Пороги, 1999. С. 299–301.

305. **Зайцев, А.К.** Анализ формирования экотоксикантов в термических процессах / А.К. Зайцев, Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин. Екатеринбург : УПИ, 1997. 84 с.

306. **Gurvich, L.V.** Ivtantermo – a Thermodynamic Database and Software System for the Personal Computer. User's Guid / L.V. Gurvich, V.S. Iorish, D.V. Chehovskoi, V.S. Jungman. Boca Raton, CRC Press Inc., 1993. P. 57.

307. **Вегман, Е.Ф.** Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. М. : ИКЦ Академкнига, 2004. 774 с.

308. **Владимиров, В.Б.** Новейшие технические достижения в области анализа и оценки материалов на фирме «Кавасаки стил» / В.Б. Владимиров // Новости черной металлургии за рубежом. 2001. № 3. С. 100–103.

309. **Огата, И.** Современные тенденции и перспективы на будущее в производстве переловного чугуна в Японии / И. Огата, М. Сануи // Черные металлы. 2004. № 2. С. 23–30.

310. **Люнген, Х.Б.** Современный уровень производства кокса, передельного чугуна и губчатого железа / Х.Б. Люнген // *Черные металлы*. 2001. № 4. С. 11–20.
311. **Гуденау, Г.В.** *Металлургия железа* / Г.В. Гуденау. Фрайберг : Фрайбергская горная академия, 1999. 200 с.
312. **Гуденау, Г.В.** Вдувание колошниковой и угольной пыли в доменную печь / Г.В. Гуденау, А. Бабич и др. // *Черные металлы*. 2000. № 5. С. 24–31
313. **Cartwright, D.** Recycling oily millscale and dust by injection into the EAF / D. Cartwright, G. Clayton // *Steel Times International*. 2000. № 2. P. 42–43.
314. **Lobel, J.** Pilot-Scale Direct Recycling of Flue Dust Generated in Electric Stainless Steelmaking / J. Lobel, B. Peng, J. A. Kozinski // *Iron and Steelmaker*. 2000. № 1. P. 41–45.
315. **Sack, T. J.** Rotary Hearth Furnace Operation at Jackson / T. J. Sack // *Iron and Steelmaker*. 2000. № 4. P. 43–45.
316. **Qudenau, H.-W.** Recycling of agglomerated dusts of the iron and steel industry with embedded carbon / H.-W. Qudenau, B. Lukat, K. Stoesser // *Steel Research*. 1998. № 10–11. P. 391–396.
317. **Рязанов, И.В.** О механизме и длительности процессов редкометального обогащения угольных включений в осадочных породах / И.В. Рязанов, Я.Э. Юдович // *Литология и полезные ископаемые*. 1975. № 3. С. 128–132.
318. **Юсфин, Ю.С.** Загадочный блеск угля / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, Ю.А. Карпов, Л.А. Митрохина // *Металлы Евразии*. 1998. № 2. С. 84–87.
319. **Юдович, Я.Э.** Грамм дороже тонны: Редкие элементы в углях / Я.Э. Юдович. М : Наука, 1989. 162 с.
320. **Юдович, Я.Э.** Элементы-примеси в ископаемых углях / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис, А.В. Мерц. Л. : Наука, 1985. 239 с.
321. **Юсфин, Ю.С.** Доменная печь – агрегат 21-го века / Ю.С. Юсфин, И.Г. Товаровский, П.И. Черноусов, В.А. Шатлов // *Сталь*. 1995. № 8. С. 1–8.
322. **Юсфин Ю.С.** Новые функции доменной печи / Ю.С. Юсфин, Л.И. Леонтьев, П.И. Черноусов и др. // *Рынок вторичных металлов*. 2002. № 4. С. 36–37.
323. **Черноусов, П.И.** Печи малого объема – будущее доменного производства / П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин, О.В. Голубев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2005. № 10. С. 20–25.
324. **Юсфин, Ю.С.** Шахтные печи для мини-заводов / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, О.В. Голубев, Ю.Ю. Баранова // *Рынок вторичных металлов*. 2006. № 2. С. 46–47.
325. **Cundy, C.** Fines tip the balance / C. Cundy // *Metal Bulletin Monthly*. 2001. № 4. P. 48–50.
326. *Перспективы новых железорудных месторождений* // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2002. № 1. С. 5–6.
327. **Юсфин, Ю.С.** Экология металлургического производства. Материальные и топливные ресурсы металлургии : учебное пособие / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, П.И. Черноусов. М. : МИСиС, 2003. 76 с.
328. **Егорова, И.** Есть ли в России дефицит минерального сырья? / И. Егорова, Л. Ремизова, А. Ставский, М. Ходина // *Национальная металлургия*. 2004. № 7–8. С. 29–35.
329. **Быховский, Л.З.** О минерально-сырьевой базе металлов для производства ферросплавов в России / Л.З. Быховский, Л.П. Тигунов // *Сталь*. 2007. № 1. С. 42–45.
330. **Титов, М.А.** Размещение металлургических предприятий в условиях глобальной мировой экономики / М.А. Титов // *Сталь*. 2007. № 3. С. 93–97.
331. **Игнатенко, Т.** Базовые тенденции / Т. Игнатенко // *Металлоснабжение и сбыт*. 2008. № 1. С. 58–61.
332. **Леонтьев, Л.И.** Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. М. : Металлургия, 1997. 432 с.
333. **Резниченко, В.А.** Материалы и сохранение окружающей среды – новая модель производства / В.А. Резниченко // *Материаловедение*. 1997. № 4. С. 40–47.
334. **Резниченко, В.А.** Комплексное использование титаномагнетитов на новом этапе развития производства / В.А. Резниченко, И.А. Карязин, А.А. Морозов, Г.Б. Садыхов // *Металлы*. 2000. № 1. С. 3–8.
335. **Резниченко, В.А.** Титаномагнетиты – сырье для новой модели производства / В.А. Резниченко, Г.Б. Садыхов, И.А. Карязин // *Металлы*. 1997. № 6. С. 3–7.

336. **Зеликман, А.Н.** Металлургия редких металлов / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов. М. : Metallurgia, 1991. 315 с.
337. **Вершковская, О.В.** Минеральное сырье. Галлий : справ. / О.В. Вершковская, Т.И. Зуева, В.П. Прокопчук. М. : Геоинформмарк, 1998. 17 с.
338. **Федоров, П.И.** Галлий. Тенденции развития производства / П.И. Федоров, М.В. Мохоосов, Ф.П. Алексеев. Новосибирск : Наука, 2000. 58 с.
339. **Иванов, В.В.** Экологическая геохимия элементов / В.В. Иванов. М. : Недра, 1996. 89 с.
340. **Фомин, С.С.** Галлий. Технология и производство / С.С. Фомин, Рыцарев В.В. М. : ГИРЕДМЕТ, 2003. 105 с.
341. **Гаронин С.Л.** Галлий и его поведение в доменной плавке / С.Л. Гаронин. Фрайберг : Фрайбергская Горная Академия. 2001. 145 с.
342. **Юсфин, Ю.С.** Галлий в доменной плавке / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.К. Зайцев // Изв. вузов. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 12–16.
343. **Черноусов, П.И.** Исследования поведения галлия в доменной плавке / П.И. Черноусов, О.В. Голубев, А.Л. Петелин // Металлург. 2010. № 5. С. 13–17.
344. **Пат. 2247167 Российская Федерация.** Способ получения галлия / Гаронин С.Л., Петелин А.Л., Рыков В.В., Черноусов П.И., Юсфин Ю.С. ; заявитель и патентообладатель Рыков В.В. ; опубл. 27.02.05, Бюл. № 3. 3 с.
345. **Юсфин, Ю.С.** Стронций в доменной плавке / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.К. Зайцев, А.Л. Петелин, Ю.А. Карпов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1998. № 1. С. 8–9.
346. **Пат. 2131929 Российская Федерация.** Способ получения чугуна с использованием доменного производства на металлургическом предприятии / Губанов В.И., Сейфулов Р.В., Селиванов В.Н., Черноусов П.И., Юсфин Ю.С. ; заявитель и патентообладатель Московский ин-т стали и сплавов (ТУ) ; опубл. 20.06.99.
347. **Пат. 2137851 Российская Федерация.** Способ получения агломерата для доменного производства на металлургическом предприятии / Губанов В.И., Сейфулов Р.В., Селиванов В.Н., Черноусов П.И., Юсфин Ю.С. ; заявитель и патентообладатель Московский ин-т стали и сплавов (ТУ) ; опубл. 20.09.99.
348. **Бижев, И.Х.** Поведение свинца и серы при получении металлизированных окатышей из кремиковского магнитного концентрата : дис. канд. техн. наук. : 05.16.02 : защищена 12.02.72 / Бижев Иван Христов. Л., 1972. 158 с.
349. **Лоскутов, Ф.М.** Металлургия свинца / Ф.М. Лоскутов. М. : Металлургия, 1965. 225 с.
350. **Юсфин, Ю.С.** Влияние деарсенации металла на окружающую среду / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Л. Петелин, Е.С. Михалина // Металлург. 2001. № 4. С. 36–37.
351. **Юсфин, Ю.С.** Исследование поведения мышьяка в металлургии с целью снижения воздействия на окружающую среду / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Л. Петелин, Е.С. Михалина // Изв. вузов. Черная металлургия. 2001. № 5. С. 8–9.
352. **Юсфин, Ю.С.** Термодинамический анализ поведения мышьяка в процессах экстракции металлов / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. № 3. С. 16–20.
353. **Overman, F.** Manufacture of iron / F. Overman. Philadelphia : Henry Baird, 1851. 492 p.
354. **Baerman, H.** Metallurgy of iron / H. Baerman. London : Virtue and Co, 1868. 399 p.
355. **Turner, T.** Metallurgy of iron / T. Turner. London : C. Griffin and Co. Lim., 1908. 463 p.
356. **Валериус.** Металлургия чугуна / Валериус ; пер.В. Ковригина. С-Пб. : типография И. Огризко, 1862, 735 с.
357. **Перси, Д.** Руководство к металлургии / Д. Перси ; пер. А. Добронизского. СПб. : Горный департамент, 1869. 239 с.
358. **Campbell, H.H.** The Manufacture and Properties of iron and steel / H.H. Campbell. New York : The engineering and mining journal, 1904. 839 p.
359. **Greenwood, W.H.** Iron / W.H. Greenwood. London : Cassell and Co. Limited, 1907. 255 p.
360. **Де Билли.** Производство чугуна / Де Билли ; пер. А. Фадеева. М. : типография И.Н. Кушнерева, 1909. 127 с.
361. **Forsythe, Rt.** The blast furnaces the manufactures of pig iron / R. Forsythe. New York : D. Williams Co., 1909. 368 p.
362. **Bell, J.L.** Principles of the Manufacture of Iron and Steel / J. L. Bell. London : Cassell and Co. Limited, 1884. 127 p.

363. **Липин, В.И.** Металлургия чугуна, железа и стали / В.И. Липин. Л. : Metallurgizdat, 1926. 576 с.
364. **Павлов, М.А.** Расчет доменных шихт / М.А. Павлов. Л. : Metallurgizdat, 1923.
365. **Павлов, М.А.** Металлургия чугуна / М.А. Павлов. Л. : Metallurgizdat, 1924.
366. **Павлов, М.А.** Доменный процесс. Техническая энциклопедия. Т. 7. М. : Советская энциклопедия, 1929. С. 13–58.
367. **Новоспаский, А.Ф.** Металлургия чугуна / А.Ф. Новоспаский. М. : Госмашметиздат, 1933.
368. **Кемп, Д.М.** Производство и обработка стали / Д.М. Кемп, К.Б. Френсис : перевод И.П. Бардина. М. : Metallurgizdat, 1945. 730 с.
369. **Дмитриев, А.Н.** Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 546 с.
370. **Полулях, Л.А.** Распределение фосфора между фазами при выплавке чугуна и ферромарганца в доменной печи / Л.А. Полулях, В.Я. Дашевский, А.Я. Травянов и др. // Черные металлы. 2009. № 5. С. 9–12.
371. **Ледебур, А.** Металлургия чугуна, железа и стали / А. Ледебур ; пер. с нем. Н.А. Иосса. СПб. : Книжный магазин В. Эриксона, 1896. 347 с.
372. **Biswas, A.K.** Principles of Blast Furnace Ironmaking. Theory And Practice / A.K. Biswas. Brisbane, Australia : Cootha Publishing House, 1981.
373. **Павлов, М.А.** Металлургия чугуна / М.А. Павлов. М. : Государственное изд-во научно-техническое литературы по черной металлургии, 1945.
374. Доменное производство : справ. ; под ред. акад. И.П. Бардина. М. : Metallurgizdat, 1963.
375. **Любан, А.П.** Анализ явлений доменного процесса / А.П. Любан. М. : Metallurgizdat, 1962.
376. **Готлиб, А.Д.** Доменный процесс / А.Д. Готлиб ; 2-е изд. М. : Металлургия, 1966. 462 с.
377. What greenfield iron ore prospects? // Metal Bulletin. 2001. № 8575. P. 15.
378. **Юдович, Я.Э.** Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях / Я. Э. Юдович, М.П. Кетрис. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 654 с.
379. **Ryan, B.** Mace real affinity of phosphorus in coals / B. Ryan, M. Khan. British Columbia Geological Survey Branch, Geological Fieldwork, 1997, Paper 1998-I. 129 p.
380. **Ryan, B.** Source and distribution of phosphorus in British Columbia coal seams / B. Ryan, D.A. Grieve. British Columbia Geological Survey Branch, Geological Fieldwork, 1995, Paper 1996-I. P. 277–294.
381. **Patrick, T.R.C.** Leaching Dicalcium Silicates from Iron Ore Sinter to Remove Phosphorus and Other Contaminants / T.R.C. Patrick, R.R. Lovel // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 2. P. 128–135.
382. **Дайке, Р.** Применение золы от сжигания осветлённых шламов для производства высокофосфористого чугуна / Р. Дайке, А. Фройденберг, Г. Кляй и др. // Черные металлы. 2003. № 4. С. 24–30.
383. **Черноусов, П.И.** Фосфор в доменной плавке. Юбилейная ретроспектива / П.И. Черноусов, О.В. Голубев // Черные металлы. 2010. № 3. С. 79–84.
384. **Molenaar, K.** 4-th European Coke and Iron making congress. June 19–22, 2000, Paris La Defangs. France. Proceedings. Vol. 1. P. 204–211.
385. **Керкконен, О.** Оптимизация состава шихты на коксохимическом заводе фирмы Ruukki в зависимости от характеристик кокса на уровне фурм доменной печи / О. Керкконен // Металлург. 2007. № 7–8. С. 42–46.
386. **Юсфин, Ю.С.** Роль щелочей в технологии и ресурсосбережении при доменной плавке / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, В. Гартен и др. // Металлург. 1998. № 2. С. 20–22.
387. **Юсфин, Ю.С.** Микроэлементы в доменном производстве АК «Тулачермет» / Ю.С. Юсфин, А.С. Белкин, П.И. Черноусов и др. // Сталь. 1997. № 7. С. 4–7.
388. **Юсфин, Ю.С.** Резервы металлургии чугуна с учетом использования попутных элементов / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, В.И. Солодков, Ю.А. Карпов, А.Л. Петелин, С.В. Неделин // Металлург. 1999. № 5. С. 40–42.
389. **Черноусов, П.И.** Большие проблемы от микропримесей / П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин // Металлы Евразии. 1999. № 2. С. 85–89.
390. **Юсфин, Ю.С.** Новый взгляд на роль микроэлементов в доменном производстве / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Л. Петелин и др. // Национальная металлургия. 2002. № 1. С. 51–54.



391. **Алексеев, Ю.В.** Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю.В. Алексеев. Л. : Агропромиздат, 1987. 338 с.
392. **Израэль, Ю.А.** Мониторинг фонового загрязнения природных сред / Ю.А. Израэль, Ф.Л. Ровинский. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 47 с.
393. **Никитин, Н.В.** Оценка влияния Череповецкого металлургического комбината на загрязнение подземных вод / Н.В. Никитин. СПб. : Ленгипроводхоз, 1995. 70 с.
394. **Никитин, Н.В.** Инженерные изыскания шламов в золошламонакопителе за рекой Коштой / Н.В. Никитин. Л. : Экофи Лтд, 1991. 33 с.
395. **Никитин, Н.В.** Разработка рекомендаций по использованию шламов металлургического производства ЧерМК, поступающих в золошламонакопитель на реке Шексне с выполнением качественных анализов шламов / Н.В. Никитин. СПб. : Росэкслсервис, 1995. 27 с.
396. **Мазур, В.И.** Инженерная экология / В.И. Мазур. М. : Высшая школа, 1996. 637 с.
397. **Новиков, Ю.В.** Экология окружающей среды / Ю.В. Новиков. М. : ФАИР, 1999. 317 с.
398. **Лозановская, И.Н.** Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / И.Н. Лозановская. М. : Высшая школа, 1998. 287 с.
399. **Юсфин, Ю.С.** Месторождения, которых не было при царе Горохе / Ю.С. Юсфин, Ю.С. Карабасов, Ю.А. Карпов и др. // Металлы Евразии. 1996. № 4. С. 88–91.
400. **Леонтьев, Л.И.** Отходы: воздействие на окружающую среду и пути утилизации / Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов // Экология и промышленность России. 2003. № 3. С. 32–35.
401. **Черноусов, П.И.** Аспекты использования вторичных ресурсов черной металлургии с точки зрения проблемы микропримесей / П.И. Черноусов, О.В. Голубев, С.В. Неделин // Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы : сб. науч. тр. М. : МИСиС, 2006. С. 28–32.
402. **Черноусов, П.И.** Утилизация отходов пластмасс в доменном производстве / П.И. Черноусов, О.В. Голубев // Рециклинг отходов. 2006. № 2. С. 19–21.
403. **Юсфин, Ю.С.** О возможности утилизации в доменных печах кремнийорганических пластмасс / Ю.С. Юсфин, Л.И. Леонтьев, В. Гартен и др. // Металлург. 1999. № 12. С. 24–25.
404. **Юсфин, Ю.С.** Технология утилизации в доменных печах пластмасс и замасленной окислы / Ю.С. Юсфин, В. Гартен, П.И. Черноусов, А.Л. Петелин // Сб. научн. тр. Междунар. конф. по управлению отходами «Waste Tech – 99». Москва, 21–24 сентября 1999. М. : АСВ, 1999. С. 178–180.
405. **Юсфин, Ю.С.** Доменная печь превращается в многофункциональный агрегат / Ю.С. Юсфин, И.Г. Товаровский, П.И. Черноусов, В.А. Шатлов // Металлург. 1995. № 10. С. 30–32.
406. **Ershov, A.** Small-volume blast furnaces – the future of blast furnaces practice? / A. Ershov, O. Golubev, P. Chernousov // CIS Iron and Steel Review. 2009. P. 11–15.
407. **Ершов, А.В.** Перспективы производства чугуна в мини доменных печах (МДП) / А.В. Ершов, П.И. Черноусов // Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии : сб. научн. тр. М. : МИСиС, 2009. С. 171–174.
408. **Шайдиг, К.** Тенденции развития производства передельного чугуна в небольших агрегатах / К. Шайдиг, С.В.Г. Шерер, Х.К. Пфайффер // Черные металлы. 2000. № 10. С. 28–39.
409. **Рейфер, Ф.** Компактная доменная печь как современная альтернатива для получения передельного чугуна на мини-заводах / Ф. Рейфер, М. Гантенберг, Р. Бертлинг, Г. Шибер // Черные металлы. 2000. №7, С. 18–23.
410. Компактная доменная печь – это современное техническое решение производства чугуна // Новости Черной металлургии за рубежом. 2000, №4. с. 37–40.
411. Металлургические заводы в новом тысячелетии // Новости Черной металлургии за рубежом. 2001. №2. С. 36–38.
412. Разработки в области производства чугуна в доменных печах // Новости Черной металлургии за рубежом. 2001. №3. С. 41–46.
413. Envirotech East Pvt., Rapid Environmental Impact Assessment for the Proposed Integrated Steel Plant. Executive summary. Pittsburg, 2006. P. 1–9.
414. CDM – Executive board. Clean Development mechanism // Project design document form. Ver. 03, Jul. 28, 2006. 49 p.
415. **Verdeja, L.F.** Iron and steel making in the third millennium / L.F. Verdeja, J. P. Sancho, J.I. Verdeja // Technical Paper Bulletin. CIM., Jul. 2002. P. 8–17.

416. **Patent 6264723 US B1.** Fritz P. Method for manufacturing steel // US. Jul. 24, 2001, P.1-4.
417. **Patent 6833106 US B1.** Reufer F., Muller W., Kaluzu T., Beerman R. Compact blast furnace installation // US Dec. 21, 2004, P. 1-8.
418. **Asanuma, M.** Establishment of advanced recycling technology for waste plastics in blast furnace / M. Asanuma // JFE Technical report. May 2009, No. 13. P. 34-40.
419. **Schmoele, P.** Hot metal production in the blast furnace from an ecological point of view / P. Schmoele, H.B. Luengen. 2nd international meeting on iron making and 1st international symposium on iron ore., Sept. Düsseldorf : VDEH, 2004. P. 10-22.
420. **Peters, M.** / M. Peters, P. Schmoele // Stahl und Eisen. 2002. №. 4. P. 43-50.
421. 5th international congress on the Science and Technology of iron making, Shanghai, China, Oct. 19-23, 2009. P. 23.
422. MINITEC. Mini blast furnace // Equipment profile. P.13.
423. **Nogami, H.** Exergy analysis of charcoal charging operation blast furnace / H. Nogami, J.-I. Yogi // ISIJ International. 2004. Vol. 44. №. 10. P. 1646-1652.
424. **Luiz, F.** Process control model for charcoal blast furnaces in Brazil / F. Luiz, A. de Castro, P.T. Roberto. Department of Metallurgical Engineering and Materials, Federal University of Minas Gerais (UFMG), 2005. P. 287-298.
425. **Ravichandran, B.** Assessing dust exposure in an integrated iron and steel manufacturers plant in South India / B. Ravichandran, V. Krishnamurthy. 5th international congress in the Science and Technology of iron making. Shanghai, // IOS Press, 2008. P. 195-200.
426. **Roth, J.L.** Energy utilization in a hot metal charged arc furnace / J.L. Roth, H.S. Lessman // 57th ISSEAR Conference Proceedings, Pittsburg, 1999. P. 481-489.
427. **Ronalds, S.S.** Hot metal strategies for EAF Industry / S.S. Ronalds, J. Jones. IOS Press, 2009, P. 31-37.
428. RHF Technologies. Special Report. Winter 2008/2009. P.2-9
429. **Ronaldo, S.S.** Hot metal strategies for the EAF Industry / S.S. Ronaldo, J. Jones //AISTech 2008 – The Iron and steel technology conference and exposition. Pittsburg; PA, 2009, p. 31-37.
430. **Монтейро, Л.С.** Работа доменных печей Бразилии на древесном угле / Л.С. Монтейро // Новости Черной металлургии за рубежом. 2001. №1. С. 36-37.
431. **Кокорин, В.Н.** Промышленный рециклинг техногенных отходов : учеб. пособие / В.Н. Кокорин. Ульяновск : УлГТУ, 2005. 32 с.
432. **Смирнов, А.Н.** Принципы построения ресурсосберегающих и металлургических технологий и циклов с повторным использованием материалов / А.Н. Смирнов., А.И. Шевелев. Ростов н/Д : Технокрап, 2007. 273 с.
433. **Хунгер, Й.** Утилизация маслосодержащей окалины и легкой фракции из дезинтеграторов путем вдвухания в доменные печи / Й. Хунгер, Д. Летцель, В. Крюгер // Черные металлы. 1999. № 4. С. 22-30.
434. **Линденберг, Х.-У.** Сырьевой рециклинг пластмасс как восстановителя в доменной печи / Х.-У. Линденберг, Х. Де Хаас, В. Юххоф // Черные металлы. 1997. № 1. С. 22-26.
435. Вдвухание в доменные печи углеродсодержащих материалов и отходов, включая заводскую пыль, гранулированные пластики и другое // Новости черной металлургии за рубежом. 2000. № 4. С. 44-47.
436. **Wolf, K.** Furnace Injection for Carbon and Residues / K. Wolf, C. Wolf, H. Kretschmer // Steel Times International. 2000. № 3. С. 34-36.
437. Подготовка сырья для доменных печей из пластмассовых отходов // Новости черной металлургии за рубежом. 2005. № 5. С 93-96.
438. **Yamada, Y.** Recycling Technology of JFE Group for recycle Oriented / Y. Yamada, M. Nomura // JFE Giho. 2004. № 6. С. 37-43.
439. **Леонтьев, Л.И.** Элементарный состав шламов гальванического производства / Л.И. Леонтьев, О.Г. Каменский, Ю.А. Карпов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. № 11. 1996. С. 14-15.
440. **Леонтьев, Л.И.** Возможность утилизации шламов гальванического производства пирометаллургическими методами / Л.И. Леонтьев, О.Г. Каменский, В.Б. Тихомиров, и др. // Металлург. 1998. № 10. С. 20-22.

441. **Леонтьев, Л.И.** Технология утилизации гальваношламов пирометаллургическими методами / Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин, О.Г. Каменский и др. : сб. науч. тр. Междунар. конф. по управлению отходами «Waste Tech – 99». Москва, 21–24 сентября 1999. М. : ACB, 1999. С. 110–113.
442. **Qudenaу, H.-W.** Recycling of agglomerated dusts of the iron and steel industry with embedded carbon / H.-W. Qudenaу, B. Lukat, K. Stoesser // *Steel Research*. 1998. 69. № 10–11. С. 391–396.
443. **Шнайдер, В.-Д.** Переработка цинксодержащей вторичной пыли / В.-Д. Шнайдер, Б. Шваб, А. Бергхейфер // *Черные металлы*. 1999. № 4. С. 55–60.
444. **Дайке, Р.** Поведение цинка при рециклинге цинк содержащих пылей и шламов / Р. Дайке, К. Хильман // *Черные металлы*. 1999. № 6. С. 50–55.
445. **Cartwright, D.** Recycling oily mill scale and dust by injection into the EAF / D. Cartwright, G. Clayton // *Steel Times International*. 2000. 24. № 2. С. 42–43.
446. **Lobel, J.** Pilot-Scale Direct Recycling of Flue Dust Generated in Electric Stainless Steelmaking / J. Lobel, B. Peng, J. A. Kozinski // *Iron and Steelmaker*. 2000. № 1. С. 41–45.
447. Рециркуляция маслосодержащей окалины и пыли инъекцией в электродуговую печь // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2001. № 1. С. 45–51.
448. Утилизация пыли при выплавке стали в электродуговой печи // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2001. № 1. С. 37–41.
449. Установка для обработки пыли, образующейся в электродуговой печи // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2001. № 4. С. 47–49.
450. **Рябова, Т.В.** Процесс OxuCup с использованием оксидных отходов металлургического завода / Т.В. Рябова // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2002. № 4. С. 113–114.
451. **Юсфин, Ю.С.** Переработка пыли электродуговых печей / Ю.С. Юсфин, Л.И. Леонтьев, П.И. Черноусов // *Рынок вторичных металлов*. 2002. № 2. С. 36–37.
452. **Fontana, P.** SMS Demag technologie for zero-Waste Steele production / P. Fontana, R. Dege // *La Revue de Metallurgie – CIT*. 2004. N 6. С. 505–512.
453. Технология SMS Demag для безотходного металлургического производства // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2004. № 6. С. 91–95.
454. Разработка процесса восстановительной плавки для рециркуляции пыли электродуговых печей // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2005. № 5. С. 79–83.
455. **Дняшев, Р.Н.** Оценка ресурсов ванадия в высоковязких тяжелых нефтях и битумах на месторождениях Татарстана / Р.Н. Дняшев // *Химия, технология и применение ванадия* : сб. науч. тр. VIII Всерос. конф. 26–29 сентября 2000. Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 2000. С. 21–27.
456. **Сирина, Т.П.** Переработка ванадиевых отходов теплоэлектростанций / Сирина Т.П., Фотиев А.А., Гринберг Н.В // *Новая технологии и техническое перевооружение ферросплавного производства*. Челябинск : Металлургия, 1989. 88 с.
457. **Жуковский, Т.Ф.** Пути эффективного использования техногенных ванадийсодержащих отходов / Т.Ф. Жуковский, Г.Г. Гаврилюк, Ю.А. Леконцев // *Химия, технология и применение ванадия* : сб. науч. тр. VIII Всерос. конф. 26–29 сентября 2000. Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 2000. С. 46–49.
458. **Жуковский, Т.Ф.** Опытнo-промышленные испытания гидрохимической технологии извлечения ванадия из твердых продуктов сжигания мазутов на ТЭЦ и ГРЭС / Т.Ф. Жуковский // *Химия, технология и применение ванадиевых соединений* : сб. науч. тр. VII Всерос. совещ. 16–20 сентября 1996 . Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 1996. С. 86–87.
459. **Фотиев, А.А.** Ванадийсодержащие отходы ТЭС – новый источник ванадия для металлургии / А.А. Фотиев, Т.П. Сирина, В.Г. Мизин // *Химия, технология и применение ванадиевых соединений* : сб. науч. тр. VII Всерос. совещ. 16–20 сентября 1996. Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 1996. С. 77–79.
460. **Смирнов, И.П.** Извлечение ванадия из вторичного сырья / И.П. Смирнов, Т.А. Смольная, К.М. Смирнов // *Химия, технология и применение ванадия* : сб. науч. тр. VIII Всерос. конф. 26–29 сентября 2000. Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 2000. С. 120–122.
461. **Бобылев, В.** Ванадий. Запасов хватит на века / В. Бобылев, А. Бродов, А. Фофанов // *Металлы Евразии*. 2001. № 3.
462. **Рабинович, Е.М.** Новое ванадийсодержащее сырье – зола от сжигания нефтеводяных эмульсий / Е.М. Рабинович, А.А. Фофанов, О. В. Фролова // *Химия, технология и применение*

ванадия : сб. науч. тр. VIII Всерос. конф. 26–29 сентября 2000. Чусовой. Нижний Тагил : УРО РАН, 2000. С. 20–22.

463. **Рабинович, Е.** Тенденции и перспективы использования техногенных ванадийсодержащих отходов при производстве пентаоксида ванадия в России / Е. Рабинович, Л. Сухов, И. Выговская // Национальная металлургия. 2003. № 1.

464. **Рабинович, Е.** Российский ванадий: производство, потребление, перспективы / Е. Рабинович, Е. Гринберг // Национальная металлургия. 2002. № 1.

465. **Юсфин, Ю.С.** Зола тепловых электростанций – перспективное сырье для получения ванадия / Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н., Черноусов П.И. и др. // Сб. науч. тр. Междунар. конф. по управлению отходами «Waste Tech – 99». Москва, 21–24 сентября 1999. С. 176–177.

466. **Черноусов, П.И.** Минералогические исследования ванадийсодержащих золошлаковых отходов тепловых электростанций и продуктов их термической обработки / П.И. Черноусов, А.В. Иванов, А.Л. Петелин, Т.Н. Базилевич // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. № 11. С. 67–68.

467. **Черноусов, П.И.** Новая технология извлечения ванадия из золы тепловых электростанций, работающих на мазуте / П.И. Черноусов, А.В. Иванов, Н.Ф. Пашков // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. № 11. С. 64.

468. **Пат. 2156813 Российская Федерация.** Способ получения брикетов из ванадийсодержащих отходов от сжигания органических топлив / Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н., Черноусов П.И., Петелин А.Л., Травянов А.Я., Губанов В.И. ; заявитель и патентообладатель Московский ин-т стали и сплавов (ТУ) ; опубл. 27.09.2000.

469. **Патент 2160318 Российская Федерация.** Способ комплексной переработки отходов сжигания органических топлив / Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н., Черноусов П.И. и др. ; заявитель и патентообладатель Московский ин-т стали и сплавов (ТУ) ; опубл. 10.12.2000.

470. **Долохов, А.К.** Авторынок мира. Основные тенденции развития и экономические аспекты регулирования / А.К. Долохов // М. : Дрофа, 2009.

471. **Коваленко, В.А.** Автомобильные дороги: безопасность, экологические проблемы, экономика (российско-германский опыт) / В.А. Коваленко, А. Ballman. М. : Логос, 2002.

472. **Стёпин, Г.М.** Проблемы снижения массы автомобиля и пути их решения / Г.М. Стёпин, Л.С. Мкртчян, И.В. Довлядов, И.К. Борщевский // Металлург. 2001. № 10. С. 39–42.

473. **Волгин, В.В.** Авторынок Евросоюза. Деловая практика, регулирование, тенденции / В.В. Волгин. М. : ИТК Дашков и Ко, 2006.

474. **Hornbogen, E.** Recycling Material-wissenschaftliche Aspekte / E. Hornbogen, R. Bode, P. Donner. Berlin : Springer-Verlag, 2003. S. 74/82.

475. **Ando, G.** The ELV situation in Japan and Seinan's method / G. Ando. Berlin : Springer-Verlag, 2008, S. 77/88.

476. **Nozawa, A.** The real substance of the automobile recycling problem – dismantling or shredding / A. Nozawa // Proc. JSAE. Symposium. Tokyo, Japan. 5 Dec. 2001, № 13. 25 p.

477. **Дарулис, П.В.** Отходы областного города. Сбор и утилизация / П.В. Дарулис. Смоленск : Русь, 2000.

478. **Дейвид, Х.** Поощрение и поддержка местных инициатив по сокращению количества производимых отходов: роль правительства / Х. Дейвид. М. : Логос, 2005.

479. **Уитфильд К.** Инженерная экология и экологический менеджмент / К. Уитфильд. М. : Логос, 2002.

480. **Ивашов, С.Ф.** Опыт работы муниципалитетов и предприятий по утилизации промышленных и бытовых отходов / С.Ф. Ивашов, А.Т. Шорин. Новокузнецк : МОСТ, 2008.

481. **Морыганов, И.П.** Шредерная технология в России / И.П. Морыганов, В.Д. Самсонов. М. : НОРМА, 2008.

482. **Кармазин, В.И.** Эффективность разделения металлов. Научно-производственная компания «ЭРГА» / В.И. Кармазин, В.И. Горда // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008, № 2. С. 14–16

483. **Капорулин, В.В.** Проблемы пластика в автомобильной промышленности / В.В. Капорулин, Г.И. Урбанович, Е.В. Невмержицкий // Сталь. 2004. № 11. С. 9–15.

484. **Такаока, Т.** Новый процесс утилизации отходов от переработки автомобильного лома для использования при производстве чугуна / Т. Такаока, М. Асанума, Х. Хироха, Т. Окада // Черные металлы. 2004. № 4. С. 50–56.

485. Глухов, В.В. Экономические основы переработки шин / В.В. Глухов, Т.П. Некрасова // СПб. : Питер, 2003.
486. Черников, А.И. Технологии измельчения покрышек / А.И. Черников, М.В. Черкес. М. : Колос, 2000.
487. Черноиванов, В.И. Техническое обслуживание и ремонт шин в автомобильной промышленности / В.И. Черноиванов, В.В. Бледный, А.Э. Северный. Москва–Челябинск : ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003.
488. Майбышев, П.Р. Методика расчета и технологии переработки автомобильных шин / П.Р. Майбышев, С.И. Жданов // М. : Логос, 2006.
489. Петелин, Ю.Ю. О пиролизно-восстановительной переработке твердых отходов в автомобильно-дорожной отрасли / Ю.Ю. Петелин, С.П. Солдатов // Сб. науч. тр. Науч.-техн. конф. Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса 4–5 февраля 2003 г. М. : Норма, 2003.
490. Информация ГИБДД МВД РФ по России. М. : ВНИИПО МВД РФ, 2009.
491. Супрун, В.Н. Справочник ломопереработчика / В.Н. Супрун. М. : Рынок вторичных металлов, 2005. 250 с.
492. Чижииков, А.Г. «Своя колея» российского авторециклинга / А.Г. Чижииков, П.И. Черноусов, Н.А. Коротченко // Вторичные металлы». 2009. № 6. С. 41–46.
493. Чижииков, А.Г. Развитие авторециклинга на основе предприятий Черной металлургии / А. Г. Чижииков, П. И. Черноусов // Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии : сб. науч. докл. М. : МИСиС, 2009. С 155–158.
494. Тимофеев, Б.Д. Показатели работы шредерной установки на ОАО «Втормет» / Б.Д. Тимофеев, Ф.Е. Семакин. М. : Наука, 2008.
495. Катульский, П.А. Опыт работы по выплавке стали с добавкой автомобильного лома в электропечах. Данные ООО «Хетек» / П.А. Катульский. СПб. : Правда, 2007.
496. Троянский, А.А. Технология рециклинга и переработки автомобильных и трансформаторных масел / А.А. Троянский, Г.С. Клягин, В.И. Ростовский // Сталь. 2002. № 8. С. 119–122.
497. Лавина электронного мусора – проблема XXI века // Твердые бытовые отходы. 2008. № 2. С. 8–13.
498. Огаки, Ё. Технология рециклинга в интересах общества оборотным использованием ресурсов / Ё. Огаки, Ю. Ямада, М. Номура // JGE Urban Recycle, 2007. 10 с.
499. Абрамова, М.А. ЭЭО – комплексный вторичный ресурс нового поколения / М.А. Абрамова, И.А. Вихров, П.И. Черноусов // Вторичные металлы. 2009. № 4. С. 37–42.
500. Коротченко, Н.А. Куда девать ЭЭО? / Н.А. Коротченко, П.И. Черноусов // Потенциал. 2010. № 3. С. 5–10.
501. Зарубежный опыт переработки ЭЭО // Твердые бытовые отходы. 2008. № 11. С. 62–67.
502. Зубарев, С.В. Что делается для решения проблемы отработавшего электронного и электротехнического оборудования в Евросоюзе и в Китае? / С.В. Зубарев // Рециклинг отходов. 2008. № 2. С. 20–25.
503. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Hannover : BHM, 2007.
504. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Hannover : BHM, 2007.
505. Зусман, Л.Л. Кругооборот металла в народном хозяйстве СССР / Л.Л. Зусман. М. : Академкнига, 1962. 367 с.
506. Stoughton, B. The metallurgy of iron and steel / B. Stoughton. New York : McGraw-Hill Book Co, 1908. 488 p.
507. Richards, J.W. Metallurgical calculations / J.W. Richards. London : Hill publishing Co, 1917. 300 p.
508. Manlove, H. Scrap Metals. Study of Iron and Steel Old Material, its preparation and markets / H. Manlove, Ch. Vickers // Cleveland : Penton Publishing Co., 1918. 270 p.
509. Eckel, E.C. Coal, Iron and war: a study in industrialism past and future / E.C. Eckel // New York : Holt H. and Co, 1920. 371 p.

510. **Wienert, H.** Zur gegenwärtigen und künftigen Verfügbarkeit von Schrott in der Welt. Bericht über die gemeinsame Tagung des Rohstoff- und Stahlwerk-Ausschusses am 29.02.1994 in Düsseldorf.

511. **Wienert, H.** Perspektiven der Stahlindustrie in hocken – twickelten Landein. Bochum, 1995 (Rufes-Studie 2/1995).

512. **Винерт, Г.** Модель оценки запасов скрапа / Г. Винерт // Черные металлы. 1996. № 11. С. 44–48.

513. **Kreutzer, H.W.** Schrottenfall und Schrottver – brauch für die Eisen- und Stahlindustrie / H.W.Kreutzer // Stahl und Eisen. 1992. №. 5. S. 65/69.

514. **Тарди, П.** Перспективы современных сталеплавильных процессов / П. Тарди, Д. Кароди // Черные металлы. 2004. №9. С. 14–19.

515. **Astier, J.E.** Scrap supply and electric steelmaking development in EU 15 / J.E. Astier // Rev. Met. 2002 June Issue, P. 493–498.

516. **Derycke, J.** Ironmaking perspectives for the early 21 st Century / J. Derycke, L. Bounte // Proc. 4th Europ. Coke and Ironmaking Congr. Paris, 2000, P. 693–702.

517. **Birat, J.-P., Zaoui, A.** // La Revue de Métallurgie-CIT. 2002. № 10. p. 795–807.

518. **Birat, J.-R.** / J.R. Birat, D. Huin, X. Le Coq et al. // La Revue de Métallurgie-CIT. 1995. № 4. P. 477–486.

519. Houpert, C. Production of high quality steels using the scrap/electric arc furnace route / C. Houpert, M. Jallon, M. Confente et al. //Proc. 15th Process Technology Conf. Compend. of Sessions from ISS Conf. Vol. 15. Pittsburg, Cleveland, Dallas : ISS, 1997, p. 67–77.

520. **Birat, J.-P.** Usinor fos ters recycling and its long term sustainability / Birat, J.-P.; Russo, P.; Gros, B. et al. // Proc. 4th Intern. Conf. and Exhib. on «The recycling of metals», 17–18 June 1999, Vienna, Austria, p. 60–70.

521. **Birat, J.-P.** Scrap quality monitoring on the European scrap market / Birat, J.-P.; Le Coq, X.; Russo, P. et al. // Proc. 4th Intern. Conf. and Exhib. on «The recycling of metals», 17–18 June 1999, Vienna, Austria, p. 154–165.

522. **Birat, J.-P.** / J.-P. Birat, J.-P. Goujon, D. Huin et al. // La Revue de Métallurgie-CIT. 1998. № 10. p. 1209–1223.

523. **Prasad, K.K.** Steel Demand Forecasts: India 1999 – 2000 / K.K. Prasad // Steel Times International. 1999. 23 (4). P. 14–17.

524. **Prasad, K.K.** Sponge Iron Making in Rotary Kiln / K.K. Prasad, A.K. Ray // RDCIS SAIL, Ranchi, India, 2002.

525. **Prasad, K.K.** SR Process for India: Problems and Prospects / K.K. Prasad, A.K. Ray // National Seminar on Smelting Reduction. Bhubaneshwar, India, 2002.

526. **Макрел, С.** Статистические данные по мировой черной металлургии и производству электростали / С. Макрел // Черные металлы. 2006. №5.

527. **Birat, J.-P.** Innovations for the steel industry of the 21st century, future directions for the steel industry and CC. Dr Manfred Wolf Symposium, 10-11 May 2002, Zurich, Switzerland, pp. 102–112.

528. **Дайго, И.** Стратегия технологического менеджмента в черной металлургии в интересах построения общества с оборотным использованием ресурсов / И. Дайго, Ё. Адати, К. Исихара // CAMP-ISIJ. 2003. № 16.

529. **Дайго, И.** Построение динамической модели для анализа нагрузки на окружающую среду при оборотном использовании металлопродукции / И. Дайго, Д. Фудзимаки, Я. Мацуно, Е. Адати // CAMP-ISIJ. 2005. № 14.

530. **Daigo, I.** / I. Daigo, D. Fujimaki, Y. Matsuno, Y. Adachi // CAMP-ISIJ. 2003. 18.

531. **Daigo, I.** / I. Daigo, D. Fujimaki, Y. Matsuno, Y. Adachi // CAMP-ISIJ. 2004. 22.

532. **Matsuno, Y.** / Y. Matsuno, I. Daigo, Y. Adachi // Tetsu-to-Hagane. 91. 2005. 127.

533. **Toi, A.** Analysis of Tramp Element in Iron Scraps / A. Toi, J. Sato, T. Kanero // Tetsu-to-hagane; J. Iron and Steel Institute of Japan. 1997. № 12. P. 850–855.

534. **Kakudate, K.** / K. Kakudate, Y. Adachi, T. Suzuki // Tetsu-to-Hagane. 36. 2000. 837.

535. **Hatano, M.** / M. Hatano, K. Kunishige, Y. Komizo // Tetsu-to-Hagane. 88. 2002. 142.

536. **Shibata, K.** / K. Shibata, K. Kunishige, M. Hatano // Bull. Iron Steel Inst. Jpn. 7. 2002. 252.

537. **Kakudate, K.** / K. Kakudate, Y. Adate, T. Suzuki // Sci. Technol. Adv. Mater. 1. 2000. 105.

538. **Симада, М.** Описание жизненного цикла при использовании отходов пластмассы в процессах черной металлургии и оценка затрат / М. Симада, К. Миямото, М. Хирао // *Черные металлы*. 2007. №5.

539. **Larsson, M.** Reduction of the Specific Energy Use in an Integrated Steel Plant – The Effect of an Optimisation Model / M. Larsson, J. Dahl // *ISIJ International*. Vol. 43 (2003), №. 10, P. 1664–1673.

540. **Nakamura, T.** Technological trend for recycle of iron and steel materials / T. Nakamura, E. Kasai, Y. Waseda // *Ferrum Bulletin of Iron and Steel Institute of Japan*. 2000. № 7. P. 512–517.

541. **Toi, A.** Analysis of Tramp Element in Iron Scraps / A. Toi, J. Sato, T. Kanero // *Tetsu-to-hagane*; J. Iron and Steel Institute of Japan. 83. 1997. № 12. C. 850–855.

542. **Michael, D.** Fenton Iron and Steel Recycling in the United States in 1998 / D. Michael // *U.S. Geological survey circular*. 1196–G, 1999.

543. **Черноусов, П.И.** Металлолом – наш важнейший техногенный ресурс / П.И. Черноусов // *Снабженец*. 2004. № 11. С. 90–97.

544. **Голубев, О.В.** Микропримеси и перспективы ломоподготовки / О.В. Голубев, С.В. Неделин, П.И. Черноусов // *Рынок вторичных металлов*. 2005. № 5. С. 43–44.

545. **Амелинг, Д.** Влияние исследований ЕОУС по стали на технологию ее производства и устойчивость развития / Д. Амелинг, Х. Б. Юнген, Р. Штеффен // *Черные металлы*. 2002. № 12. С. 23–39.

546. **Люнген, Х.** Инновационные разработки в области производства чугуна и стали в Германии / Х.Б. Люнген, Р. Штеффен // *Черные металлы*. 2006. № 12. С. 18–32.

547. **Лисин, В.С.** Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия / В.С. Лисин, Ю.С. Юсфин. М. : Высшая школа, 1998.

548. **Амелинг, Д.** Современный уровень и дальнейшие разработки в электросталеплавильном производстве / Д. Амелинг // *Черные металлы*. 2000. № 11. С. 27–32.

549. **Дегнер, М.** Разработки в области горячей и холодной прокатки / М. Дегнер, У. Ратцек // *Черные металлы*. 2006. № 12. С. 33–38.

550. **Метушевская, В.** Металлофонд страны / В. Метушевская // *Рынок черных металлов*. 2001. № 6. С. 26–29.

551. **Манфорд, К.** Шредирование лома в США / К. Манфорд // *Рынок вторичных металлов*. 2005. № 5. С. 37–39.

552. **Неверов, И.А.** Американский рынок металлолом / И.А. Неверов // *Рынок вторичных металлов*. 2005. № 2. С. 35–38.

553. **Костин, А.С.** Шихтовка шредерным ломом / А.С. Костин, И.В. Деревянченко, О.Л. Кучеренко // *Рынок вторичных металлов*. 2005. № 5. С. 35–36.

554. **Катульский, П.А.** Опыт работы по выплавке стали с добавкой автомобильного лома в электропечах. Данные ООО «Хетек» / П.А. Катульский. СПб. : Правда, 2007.

555. **Юзов, О.В.** Мировые тенденции образования и использования ресурсов металлолома / О.В. Юзов, А.М. Седых // *Металлург*. 2003. № 5. С. 55–57.

556. **Хухteman, Б.** Элементы-примеси в специальных конструкционных сталях и их влияние на технологические свойства / Б. Хухteman, Э. Вульфмайер // *Черные металлы*. 1999. № 5. С. 44–57.

557. **Дегенкольбе, И.** Ограничение содержания сопутствующих элементов в стали с целью улучшения ее свойств / И. Дегенкольбе, Г. Кальва, К. Кауп, Э. Потгаст // *Черные металлы*. 1990. № 6. С. 8–15.

558. **Lagneborg R.** The Role of Vanadium in Microalloyed Steels / R. Lagneborg // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1999. Vol. 28, issue 5.

559. **Денглер, Ж.-М.** Влияние элементов-примесей на разливаемость и деформируемость стали для непрерывнолитых балочных заготовок / Ж.-М. Денглер, Г. Хартман, Х.-В. Якоб, Г. Лахман // *Черные металлы*. 2000. № 8. С. 43–48.

560. **Korchynsky, M.** The New Role for Microalloyed Steels: Adding Economic Value, Proceedings / M. Korchynsky // *The Ninth International Ferroalloys Congress*, Quebec City, Canada, 2001.

561. **Zajac St.** Ferrite Grain Refinement and Precipitation Strengthening in V-Microalloyed Steels / St. Zajac // *Proceedings, 43rd Mechanical Working and Steel Processing Conference*, ISS, Charlotte, NC, 2001.

562. **De Ardo, A.J.** Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel: Expanded View on Grain Refinement / A.J. De Ardo // 14th IAS Rolling Conference, San Nicolas, Argentina, 2002.
563. **Корчинский, М.** Передовые металлические конструкционные материалы и новая роль микролегированных сталей / М. Корчинский // Сталь. 2005. № 6. С. 124–130.
564. Сравнительная оценка выплавки стали в конвертере и в дуговой печи с позиции удаления нежелательных примесей // Новости черной металлургии за рубежом. 2009. № 5. С. 32–35.
565. **Lachmund, N.** Comparative assessment of LD converter and electric arc furnace / N. Lachmund, N. Bannenber // AISTech, 2008, Proceedings. № 105 С. 1–8.
566. **Ronaldo, S.S.** Hot metal strategies for the EAF Industry / S.S. Ronaldo, J. Jones // AISTech, 2008 – The Iron and steel technology conference and exposition, Pittsburg, 2009. P. 31–37.
567. **Рябова, А.В.** Прогнозирование экологических сценариев потребления амортизационного дома в черной металлургии в Обществе рециклинга / А.В. Рябова, А.С. Коротченко, П.И. Черноусов // Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии : сб. науч. тр. М. : МИСиС, 2009. С. 172–178.
568. **Козлов, А.В.** Мировое производство и глобальный рынок стали / А.В. Козлов // Производство проката. 2006. №9.
569. **Крятов, В.А.** Естественный отбор в стальном мире: выживает сильнейший / В.А. Крятов // Национальная металлургия. 2006. №11.
570. **Воробьев, П.В.** Прогнозирование мирового рынка стали / П.В. Воробьев // Национальная металлургия. 2006. №11.
571. **Петросян, А.Р.** Мировой и российский рынки черной металлургии / А.Р. Петросян // БИКИ. 2006. №10.
572. **Юзов, О.В.** О развитии мирового рынка стали / Юзов О.В // Экономика. Новые формы хозяйствования. 2003. №8.
573. **Мороз, А.В.** Сессия 3 / А.В. Мороз // Металлоснабжение и сбыт. 2008. №4.
574. **Титов, В.Е.** Черная металлургия Японии. Тенденции и перспективы / В.Е. Титов // Национальная металлургия. 2008. №12.
575. **Коршикова, О.А.** Металлургия Японии / О.А. Коршикова // Национальная металлургия. 2006. №11.
576. **Амелинг Д.** Сталь – базисный материал промышленности / Д. Амелинг // Национальная металлургия. 2008. №5.
577. **Буттерманн, Х.Г.** Материал сталь – «сырье» для экономики Германии / Х.Г. Буттерманн // Черные металлы. 2006. №1.
578. **Коршикова, О.А.** Металлургия Германии / О.А. Коршикова // Национальная металлургия. 2007. № 6.
579. **Пинчук, А.В.** Меры по развития металлургической промышленности / А.В. Пинчук // Металлург. 2007. № 3.
580. **Кац, Я.Л.** Обеспечение стальным ломом электросталеплавильного производства России / Я.Л. Кац // Металлург. 2006. № 6.
581. **Макушин, В.Р.** Ломопереработка в России: обеспечение электрометаллургии и контроль экспорта / В.Р. Макушин // Металлоснабжение и сбыт. 2008. № 1.
582. **Борисов, Б.К.** Война или мир на ломовом фронте / Б.К. Борисов // Металлоснабжение и сбыт. 2004. № 1.
583. **Сидорин, А.А.** Тенденции развития российского рынка лома / А.А. Сидорин // Рынок вторичных металлов. 2007. № 6.
584. **Гудим, Ю.А.** Ресурсы лома и электросталеплавильное производство / Ю.А. Гудим // Рынок вторичных металлов. 2005. № 1.
585. **Парфенов, Д.К.** Phantom menace или скрытая угроза / Д.К. Парфенов // Национальная металлургия. 2005. № 4.
586. **Шкуропат, И.Л.** Обзор рынка лома черных металлов в России и его перспективы / И.Л. Шкуропат // Металлург. 2006. № 10.
587. **Адно, Ю.Л.** Проблемы формирования и развития стратегии России в условиях глобализации / Ю.Л. Адно // Черные металлы. 2008. № 4.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Металлургические материалы, учитываемые в блок-схеме математического описания «ПОТОК»

В Приложении 1 приведен полный перечень металлургических материалов, которые учитывались при проведении расчетов по Методике определения параметров элементопотоков для предприятий черной металлургии, а также входили в блок-схему математического описания «ПОТОК» (ноу-хау МИСиС № 4-202-2009 ОИС от 10 февраля 2009 г.).

1. Сырьевые материалы, поступающие «со стороны» (в т.ч. амортизационный лом).

2. Полуфабрикаты (полностью используются в прямом направлении технологического процесса).

3. Готовая продукция (включая материалы, одновременно выполняющие функцию полуфабрикатов).

4. Рециклинг внутрицеховой (в пределах одного цеха, производства), в том числе материалы, движущиеся в «возвратных» циклах.

5. Рециклинг внутренний (между переделами в «обратном» направлении).

6. Техногенные материалы (складируемые и частично подвергаемые рециклингу и «отложенному» рециклингу).

7. Выбросы в атмосферу (выброс пыли).

#### Материалы, поступающие со стороны

Материал	Адресат поступления
Железная руда кусковая	Доменная печь, мартеновское производство
Марганцевая руда кусковая	Доменная печь, мартеновское производство
Аглоруда железная	Рудный двор
Аглоруда марганцевая	Рудный двор
Окатыши	Доменная печь, мартеновское производство, рудный двор, ЭСПЦ, конвертер
Металлодобавки: (шлак, скрап, окалина, металлоконцентрат и т.п.)	Доменная печь
Окалина привозная	Рудный двор
Известняк	Рудный двор, доменная печь, производство извести, мартеновское производство
Доломит	Рудный двор, доменная печь, производство извести, мартеновское производство
Флюс доменный (кварцит, боксит и пр.)	Доменная печь
Концентрат коксующихся углей	Углеобогащение и подготовка
Концентрат энергетических углей	

Материал	Адресат поступления
Металлолом стальной привозной	Копровое производство
Скрап стальной привозной	
Лом легированный привозной	
Лом чугунный привозной	
Скрап чугунный привозной	
Ферросплавы	Мартеновское производство, ЭСПЦ, конвертер
Материалы для гальванических покрытий	Тонколистовая прокатка, проволочные станы, сортовые станы
Материалы для «оцинковки»	
Материалы для полимерных покрытий	
Амортизационный лом	Копровое производство

### Полуфабрикаты (прямое направление технологичного процесса)

Материал	Место получения	Адресат поступления
Коксовая шихта	Углеобогащение и подготовка	Коксовые батареи
Промпродукт		ТЭЦ
Агломерат	Аглофабрика	Доменная печь, рудный двор
Агломерат мартеновский		Мартеновское производство
Жидкий чугун	Доменная печь	Миксер, литейное производство
Кокс	Коксовые батарен	Доменная печь
Мелочь коксовая КХП		Рудный двор
Известь	Производство извести, аглофабрика	Рудный двор, мартеновское производство, конвертер, ЭСПЦ
Скрап литейный доменный	Доменные печи	Копровое производство
Скрап ковшевой доменный		
Скрап разливки		
Коржи и козлы доменные		
Чугун миксерный	Миксер	Мартеновское производство, конвертер
Металлолом стальной привозной рафинированный	Копровое производство	Мартеновское производство, конвертер, ЭСПЦ, литейное производство
Скрап стальной привозной рафинированный		
Лом легированный привозной рафинированный		
Слитки литые стальные	Литейное производство	Блюминг
Слитки стальные мартеновские	Мартеновское производство	
Слитки стальные конвертерные	Конвертерное производство	
Слитки стальные ЭСПЦ	ЭСПЦ	

Материал	Место получения	Адресат поступления
Заготовка МНЛЗ Конвертерная	Конвертерное производство	Листопрокатный стан, сортопрокатный стан
Заготовка МНЛЗ ЭСПЦ	ЭСПЦ	

**Готовая продукция (на сторону)**

Материал	Место получения	Адресат (кроме готовой продукции)
Чугун чушковый	Доменная печь	ЭСПЦ, мартеновское производство, конвертер
Шлак доменный		Шлаковый отвал, шлакопереработка
Шлак доменный гранулированный		
Литье чугунное	Литейное производство	
Литье стальное		
Прокатная заготовка	Блюминг	Листопрокатный стан, сортопрокатный стан
Прокат листовой	Листопрокатный стан	Тонколистовая прокатка
Прокат тонколистовой	Тонколистовая прокатка	Тонколистовая прокатка
Прокат сортовой	Сортопрокатный стан	Проволочный стан, сортовой стан
Проволока	Проволочный стан	
Прокат сортовой с покрытием	Сортовой стан	
Прокат тонколистовой с покрытием	Тонколистовая прокатка	

**Рециклинг внутрицеховой (в пределах производства или передела)**

Материал	Место получения	Адресат поступления
Возврат	Аглофабрика	Аглофабрика
Шлам агломерационный	Аглофабрика	Аглофабрика
Мелочь коксовая доменная	Доменная печь	Рудный двор
Отсев агломерата		
Отсев окатышей		
Колошниковая пыль		
Обрезь и брак МНЛЗ конвертера	Конвертер	Конвертер
Обрезь и брак МНЛЗ ЭСПЦ	ЭСПЦ	ЭСПЦ
Коржи	Миксер	Копровое производство
Литники, недоливки, скрап, брак мартеновского производства	Мартеновское производство	
Литники, недоливки, скрап, брак конвертерного производства	Конвертер	
Скрап, брак ЭСПЦ	ЭСПЦ	
Литники, недоливки, скрап, брак литейного производства	Литейное производство	
Лом изложниц	Литейное производство	Литейное производство

**Рециклинг внутренний**

Материал	Место получения	Адресат поступления
Лом чугунный привозной рафинированный	Копровое производство	Доменные печи
Скрап чугунный привозной рафинированный		
Сварочный шлак	Нагревательные колодцы перед блюмингом	
Окалина блюминга	Блюминг	
Лом валков (по всем прокатным цехам)	Прокатные цеха	Копровое производство
Окалина (по всем прокатным цехам)		Мартеновское производство, конвертер
Обрезь и брак (по всем прокатным цехам) габаритные		ЭСПЦ
Обрезь и брак (по всем прокатным цехам)		Копровое производство

**Техногенные материалы, подвергаемые рециклингу  
и «отложенному» рециклингу**

Материал	Место получения	Адресат поступления
Остатки руд	Рудный двор	Техногенные грунты
Отходы угледобычи и подготовки	Углеобогащение и подготовка	Техногенные грунты, ЗШН
Шлам КХП	Коксовые батареи	ЗШН
Шлам ТЭЦ	ТЭЦ	Техногенные грунты, ЗШН
Зола ТЭЦ		
Шлак ТЭЦ		
Шлам доменный	Доменные печи	ЗШН, рудный двор, шламоподготовка
Корольки доменные		Шлаковый отвал, шлакопереработка, аглофабрика, сталеплавильный цех
Скрап доменный		
Шлам миксерный	Миксер	Техногенные грунты, ЗШН
Шлак миксерный		
Шлак мартеновский	Мартеновское производство	ЗШН, рудный двор, шлаковый отвал, техногенные грунты
Шлам мартеновский		
Корольки мартеновские	Конвертерное производство	ЗШН, рудный двор, шлаковый отвал, доменные печи, аглофабрика, техногенные грунты
Шлам конвертерный		
Шлак конвертерный		
Корольки конвертерные	ЭСПЦ	ЗШН, рудный двор, шлаковый отвал, шлакопереработка, техногенные грунты
Шлак ЭСПЦ		
Шлам ЭСПЦ		
Корольки ЭСПЦ		

Материал	Место получения	Адресат поступления
Отходы рафинирования	Копровое производство	Техногенные грунты
Прокатный шлак (по всем видам проката)	Все прокатное производство	ЗШН, рудный двор, техногенные грунты
Шламы гальванические, оцинковки, покрытий из прокатных цехов	Прокатные цехи	ЗШН, техногенные грунты
Замасленная окалина	Прокатные цехи	ЗШН, рудный двор, техногенные грунты
Шлак ЗШН	ЗШН	Шлакопереработка, рудный двор
Отвальный шлак доменный	Шлаковый отвал доменный	Шлакопереработка, металлоконцентрат, доменная печь, сталеплавильные цехи
Отвальный шлак мартеновский	Шлаковый отвал мартеновский	
Отвальный шлак конвертерный	Шлаковый отвал конвертерный	
Отвальный шлак ЭСПЦ	Шлаковый отвал ЭСПЦ	

### Выбросы в воздушный бассейн

Пыль	Место образования
Рудного двора	Рудный двор
Известковая	Производство извести
Агломерационная	Аглофабрика
Доменная	Доменные печи
Угольная	Углеобогащение и подготовка
Коксохимического производства	Коксовые батареи
ТЭЦ	ТЭЦ
Миксерная	Миксер
Мартеновская	Мартеновское производство
Конвертерная	Конвертер
ЭСПЦ	ЭСПЦ
Литейная	Литейное производство

Возгоны (неулавливаемые): «бурый дым», «лисьи хвосты» и т.п.

Отложения и накопление в неметаллургических агрегатах: гарнизаж, насталь, козловой чугуна, наслоения в газоходах.

Выбросы в водную среду: шламовые воды.

**Приложение 2. Содержание галлия  
в металлургических материалах Качканарского  
ГОКа и ОАО НТМК по данным Гиредмета**

Материал	Содержание галлия, г/т
Концентрат ММС Качканарского ГОКа	45
Агломерат Качканарского ГОКа	52
Окатыши Качканарского ГОКа	48
Концентрат ММС Высокогорского ГОКа	22
Концентрат СМС Высокогорского ГОКа	26
Агломерат Высокогорского ГОКа	26
Мартитовый концентрат Гороблагодатского РУ	37
Агломерат Гороблагодатского РУ	32
Железная руда Михайловского ГОКа	3
Окатыши Михайловского ГОКа	2
Бакальский сидерит	5
Чугун ванадиевый доменной печи:	
№ 2	65
№ 3	70
№ 4	80
Чугун передельный доменной печи № 1	43
Чугун передельный доменной печи № 5	38
Колошниковая пыль доменной печи:	
№ 2	37
№ 3	35
№ 4	45
№ 1	28
№ 5	32
Доменный шлак передельного чугуна всех видов	< 1
Шлам доменный	75
Шлак конвертерный	52
Шлам конвертерный	75
Ванадиевый шлак	82
Металлическая фаза (корольки) ванадиевого шлака	75
Шлак дуплекс-процесса	56
Шлак установки ковш–печь конвертерного цеха	< 1
Возгоны установки ковш–печь	220
Пыль установки ковш–печь	100
Пыль установки РН	45
Возгоны установки РН	14
Шлак мартеновский	19
Пыль газоочистки мартеновских цехов	200
Шламы цеха утилизации	150
Металлопродукт	52

### Приложение 3. Балансы углерода металлургических предприятий и ГОК России

#### Баланс углерода при производстве железорудных окатышей в АО «Михайловский ГОК»

Статья	Израсходовано углерода		Израсходовано энергоносителей, всего
	кг углерода/т железа в окатышах	%	
Приход			
1.Электроэнергия	172,7	69,75	1496 млн кВт·ч
2.Мазут топочный	0,7	0,3	2324 т
3.Природный газ	29,0	11,7	175,8 млн м <sup>3</sup>
4.Взрывчатые вещества	0,6	0,25	1872 т
5.Флюсы	42,5	17,15	
6.Железородные материалы	2,1	0,85	
7.Горючесмазочные материалы и спирты			368 т
Расход			
1.Готовая продукция	0,8	0,3	
2.Выбросы пыли	1,1	0,45	
Итого выбросов:			
CO	4,9	2,0	
CO <sub>2</sub>	240.9	97,25	

#### Баланс углерода для технологической схемы «агломерат – чугуn – конвертерная сталь» в условиях ЕКО-Stahl

Приход			Расход		
Статья	кг угле- рода/т железа проката	%	Статья	кг угле- рода/т железа проката	%
Железородные материалы	1,78	0,3	1.Выбросы в атмосферу в составе газов	553,72	99,0
Металлолом	0,05	0,0	В том числе: с аглогазом с доменным газом (потери и сжигание на в/н) с газом ТЭС, ИОЦ и продуктами горения	62,46	
Флюсы	5,20	0,9		151,54	
Кокс	372,33	66,5		339,71	
Ферросплавы	0,05	0,0	2.Выбросы в виде пыли	0,48	0,1
Природный газ	76,09	13,6	3.Переходит в техногенные грунты	0,00	0,0
Мазут	69,60	12,4	4.Переходит в попутную продукцию	4,92	0,9

Приход			Расход		
Статья	кг угле- рода/т железа проката	%	Статья	кг угле- рода/т железа проката	%
Пластмасса	8,28	1,5	В том числе в замасленную окалину	4,92	
Дизельное топливо	0,85	0,2	5.Попадает в готовую продукцию (прокат)	0,31	0,1
Смазочные материалы	4,92	0,9			
Старый скрап	0,01	0,0			
Известняк	20,33	3,6			
Всего	559,49	100,0	Всего	559,44	100,0

**Баланс углерода при производстве проката в АО «Северсталь»**

Статья	Израсходовано углерода		Израсходовано энергоносителей
	кг углерода/т железа проката	%	Всего
<i>Приход</i>			
1.Энергетический уголь	123,4	9,60	1008 тыс. т
2. Угольный концентрат для коксования	828,7	64,55	6768 тыс. т
3.Природный газ	73,8	5,75	1012 млн м <sup>3</sup>
4.Мазут топочный	0,4	—	3247 т
5.Электроэнергия из внешних сетей («Вологдаэнерго»)	204,7	15,95	3540 млн кВт·ч
6.Флюсы	43,8	3,40	
7.Железорудные материалы, ферросплавы и металлолом	3,0	0,20	
8.Горючесмазочные материалы, включая масло	7,2	0,55	58 697 т
Итого приход	1285,0		
<i>Расход</i>			
1.Шламы и ЗШО от сжигания и углепереработки	46,2	3,60	
2.Готовая продукция	2,0	0,15	
3.Попутная продукция коксохимического производства	31,4	2,40	
4.Выбросы пыли	17,0	1,30	
Выбросы газов			
5.При агломерации	68,3	5,30	
6.При переработке флюсов	45,1	3,50	
7.При производстве жидкой стали	39,2	3,05	



8. При сжигании энергетического угля, доменного и коксового газов	981,2	76,40	
9. Потери доменного и коксового газов (в том числе технологические)	54,6	4,30	
Итого выбросов:			
CO	106,4	8,30	
CO <sub>2</sub>	1082,0	84,20	

**Баланс углерода при производстве чугуна в АК «Тулачермет»**

Статья	Израсходовано углерода		Израсходовано энергоносителей
	кг углерода/т железа проката	%	Всего
<i>Приход</i>			
Уголь энергетический	1,0	0,1	2299 т
Кокс доменный	468,5	65,2	896 тыс. т
Природный газ	149,3	20,8	469 млн м <sup>3</sup>
Агломерационное топливо	57,0	7,9	109 тыс. т
Горючесмазочные материалы	0,08	—	149 т
Флюсы	37,9	5,3	
Железорудные материалы и металлодобавки	5,0	0,7	
Итого приход	718,78	100	
<i>Расход<sup>1</sup></i>			
Готовая продукция (чугун)	44,9	6,25	1800 тыс. т
Выбросы пыли	3,0	0,42	
Зола ТЭЦ	0,08	0,01	
Выбросы газов			
При агломерации	113,1	15,73	
При обжиге известняка	1,8	0,25	
Доменные:			
технологические	68,35	9,51	
на воздухо-нагревателях	139,9	19,46	
при сжигании в других производствах	46,4	6,46	
потери	23,8	3,31	
При сжигании на ТЭЦ	277,45	38,6	
Итого выбросов:			
CO	74,6		
CO <sub>2</sub>	596,2	82,9	

<sup>1</sup> Выработано электроэнергии на сторону 230,5 млн кВт·ч, т.е. «сэкономлено» углерода ~53,65 кг/т железа.

## Приложение 4. Содержание элементов-микропримесей в металлургических материалах

Содержание элементов-микропримесей в некоторых российских  
и зарубежных железных и марганцевых рудах, г/т

Химические элементы	Руды				
	Михайловского Месторождения (Россия)	Замитри (Бразилия)	Хадисолб (Египет )	Кардемир (Турция)	Никопольская марганцевая (Украина )
Барий	100	200	2000	1500	9000
Бериллий	3	1	30	3	2
Бор	300	8	70	300	400
Бром	Н.о.	2	3	4	Н.о.
Ванадий	30	100	600	500	300
Висмут	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5	Н.о.
Вольфрам	Н..	90	100	Н.о.	50
Галлий	6	8	10	10	20
Германий	10	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Индий	5	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Йод	Н.о.	9	20	30	90
Иттрий	20	30	70	20	80
Кобальт	3	10	40	90	200
Лантаноиды	45	75	55	55	630
Литий	200	20	40	20	70
Медь	50	30	10	100	300
Молибден	Н.о.	8	10	30	1000
Мышьяк	50	300	60	100	300
Никель	10	30	80	1000	1000
Олово	Н.о.	Н.о.	Н.о.	30	Н.о.
Рубидий	70	60	100	200	400
Свинец	50	30	20	40	100
Селен	Н.о.	4	10	10	Н.о.
Скандий	3	Н.о.	Н.о.	Н.о.	7
Стронций	200	70	600	80	8600
Сурьма	Н.о.	100	2	7	30
Таллий	Н.о.	Н.о.	20	Н.о.	10
Теллур	Н.о.	Н.о.	4	Н.о.	Н.о.
Титан	500	500	700	700	1900
Торий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2	Н. о.
Уран	Н.о.	Н.о.	50	10	20
Фтор	8	20	600	400	1000
Хлор	40	60	20000	1500	400
Хром	50	70	200	400	30
Цезий	Н.о.	3	3	200	30
Цирконий	30	30	40	40	80

## Содержание элементов-микропримесей в окатышах, г/т

Химические элементы	Окатыши			
	Михайловского ГОКа	Лебединского ГОКа	Костамукшского ГОКа	Кируна (Швеция)
Барий	90	60	30	60
Бериллий	1	0, 5	0, 5	0, 6
Бор	10	5	7	20
Бром	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ванадий	10	20	80	1000
Висмут	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Вольфрам	Н.о.	Н.о.	50	40
Галлий	2	5	6	20
Германий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Индий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Йод	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Иттрий	10	5	2	10
Кобальт	10	Н.о.	20	100
Лантаноиды	10	10	10	130
Литий	200	30	20	40
Медь	50	10	5	30
Молибден	Н.о.	7	Н.о.	Н.о.
Мышьяк	20	2	3	5
Никель	10	10	30	400
Олово	Н.о.	Н.о.	Н.о.	10
Рубидий	100	20	20	10
Свинец	Н.о.	Н.о.	Н.о.	6
Селен	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Скандий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	7
Стронций	300	30	10	10
Сурьма	Н.о.	1	Н.о.	Н.о.
Таллий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Теллур	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Титан	500	200	200	1000
Торий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	20
Уран	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Фтор	10	2	10	100
Хлор	10	1	7	200
Хром	60	30	70	600
Цезий	Н.о.	6	Н.о.	Н.о.
Цирконий	10	30	30	20

**Содержание элементов-микропримесей  
в агломератах предприятий черной металлургии России**

Химический элемент	Содержание в агломерате, г/т		
	Северсталь	Тулачермет	НЛМК
Барий	300	200	100
Бериллий	0,2	До 0,5	0,1
Бор	20	30...100	40
Ванадий	60	30...200	100
Висмут	Н.о.	До 3	Н.о.
Вольфрам	4	50	Н.о.
Галлий	До 100	2	Н.о.
Германий	Н.о.	До 20	До 300
Йод	4	Н.о.	Н.о.
Иттрий	5	4...20	3
Кобальт	50	1...6	Н.о.
Лантаноиды	35...40	40...100	15...20
Литий	20	10	Н.о.
Медь	50	5...30	20
Молибден	100	До 10	Н.о.
Мышьяк	2	До 10	20
Никель	20	5...30	600
Олово	40	2...5	Н.о.
Рубидий	30	2...10	30
Свинец	60	30	30
Селен	Н.о.	1...2	Н.о.
Скандий	20	Н.о.	Н.о.
Стронций	300	200	400
Сурьма	3	5	3
Теллур	10	Н.о.	Н.о.
Технеций	Н.о.	2...4	7
Титан	600	400...1000	30
Уран	Н.о.	До 4	3
Фтор	40	20...40	До 200
Хлор	20	До 100	60
Хром	200	50...200	90
Цинк	100	5...55	60
Цирконий	70	20...60	10

**Содержание элементов-микропримесей в коксующихся углях некоторых месторождений Австралии, Канады и Польши, импортруемых металлургическими предприятиями Германии, г/т**

Химический элемент	Характерный интервал содержания в коксующихся углях	North Goonjella (Австралия)	Burton (Австралия)	Elkview (Канада)	Польские угли
Барий	110...150	30	20	100	100
Бериллий	1,8...2,2	2	1	0,7	2
Бор	40...70	8	5	20	10
Ванадий	25...35	50	30	70	40
Галлий	6...8	3	1	1	Н.о.
Иттрий	5...7	10	8	7	7
Кобальт	5...6	3	2	0,9	5
Лантаноиды	15...50	83	11	28	43
Литий	15...35	30	50	10	10
Марганец	80...110	10	8	100	7
Медь	15...20	7	10	3	20
Молибден	2...4	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3
Мышьяк	15...25	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3
Никель	10...20	5	4	Н.о.	20
Рубидий	12...20	Н.о.	Н.о.	Н.о.	7
Скандий	2...3	6	7	5	8
Стронций	50...100	90	100	20	50
Фтор	80...150	20	10	4	20
Хлор	500...2000	7	10	5	30
Хром	12...15	30	10	8	20
Цезий	1	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1
Цинк	20...25	3	2	Н.о.	3
Цирконий	35...40	200	90	50	20
Калий	До 2500	300	400	150	350
Натрий	До 600	10	20	2	20
Титан	1200...2000	1000	1000	1000	400

**Содержание элементов-микропримесей  
в коксах некоторых зарубежных предприятий, г/т**

Химический элемент	Металлургический кокс из углей			
	Австралии	США	Польши	Чехии
Барий	20	200	300	700
Бериллий	До 0,5	1	3...6	2
Бор	10	5	15	70
Бром	0,5	2	1	Н.о.
Ванадий	50	60	20	100
Галлий	3	6	5	10
Германий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Йод	0,5	5...10	Н.о.	Н.о.
Иттрий	3...5	30	10	30
Кобальт	2...4	10	10	10
Лантаноиды	100...250	150	50	250
Литий	60	20	30...60	100
Медь	15	30	20	5
Молибден	1	Н.о.	Н.о.	200
Мышьяк	3	4	3...5	6
Никель	6	30	30...50	30
Ниобий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Олово	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Рубидий	2...5	5...10	2...4	30
Свинец	Н.о.	3	До 0,3	Н.о.
Селен	Н.о.	4	Н.о.	Н.о.
Скандий	1	Н.о.	6	Н.о.
Стронций	200	200	60	400
Сурьма	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Торий	Н.о.	5	Н.о.	30
Уран	Н.о.	1...3	Н.о.	До 10
Фтор	5	10	5...15	50
Хлор	20	40	100	30
Хром	25	30	10...20	40
Цинк	3	5	5...10	10
Цезий	0,5	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Цирконий	300	100	10	100

## Микропримесный состав коксов некоторых предприятий России, г/т кокса

Химический элемент	Содержание в каменных углях месторождений России, г/т угля		Коксохимическое предприятие			
	среднее	максимальное	ОАО «Северсталь»	ОАО «НЛМК»	Алтайский КХЗ	Кемеровский КХЗ
Барий	110...150	—	220	600	200...1000	500
Бериллий	1,8...2,2	120	0,7	3	1...5	3...8
Бор	10...80	—	60	30	40	60
Бром	5...15	—	3	1	0,2	До 2
Ванадий	8...35	80	60	30	До 100	25
Галлий	4,5...6	35	Н.о.	8	До 30	До 40
Германий	До 3	—	4	Н.о.	0,7	7
Йод	н.д.	—	Н.о.	2	0,7	Н.о.
Иттрий	5...7	50	9	8	30...70	70
Кобальт	1...11	—	10	10	20	5
Лантаноиды	15...50	—	100	30	200...450	420...570
Литий	15...35	—	60	30	20	20
Медь	10...90	—	10	40	10	25
Молибден	1...5	—	Н.о.	1	1	Н.о.
Мышьяк	15...25	8000	7	5	0,5	20
Никель	2...40	65	50	30	15	8
Ниобий	1...7	—	Н.о.	Н.о.	До 20	20...35
Олово	1...12	—	1	1	Н.о.	7
Рубидий	12...20	—	Н.о.	100	До 20	20
Свинец	25...30	60	Н.о.	5	Н.о.	50
Селен	До 5	—	2	Н.о.	0,4	4
Скандий	2...4	400	7	Н.о.	До 10	13
Стронций	50...100	—	100	200	200	200
Сурьма	0,5...2	—	2	0,5	Н.о.	Н.о.
Торий	3...4,5	—	10	2	5	Н.д.
Титан	400...600	2500	1000	600	1300	600
Фтор	80...300	—	5	7	30	25
Хлор	500...600	15 000	200	20	15	10
Хром	1...20	20	40	10	35	55
Цинк	20...25	900	10	7	9	Н.д.
Цезий	1	—	Н.о.	Н.о.	До 8	Н.д.
Цирконий	9...35	—	70	70	150	200
Уран	До 2	—	Н.о.	1	Н.о.	н.д.

**Содержание элементов-микропримесей в известняках  
некоторых отечественных и зарубежных месторождений, г/т**

Химический элемент	Известняк				
	Барсуковского месторождения	Украины	Польши	Турции	Гуровского месторождения
Барий	50	30...300	20	200	150
Бериллий	2	До 2	Сл.	0,2	0,2
Бор	100	10...40	7	10	75
Бром	Н.о.	3...10	5	1	50
Ванадий	40	10...30	20	30	45
Вольфрам	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Галлий	Н.о.	Н.о.	Сл.	1	Н.о.
Йод	50	20...80	10	70	Н.о.
Иттрий	10	До 20	4	1	4
Кобальт	60	10...20	Сл.	3	5
Лантаноиды	100	До 100	10	20	55
Литий	50	30...80	10	20	45
Медь	40	До 50	5	40	30
Молибден	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	4
Мышьяк	60	5...30	10	9	12
Натрий	700	40...100	100	100	200
Никель	60	10...40	10	10	15
Олово	Н.о.	До 50	20	Н.о.	10
Рубидий	Н.о.	10...30	20	30	35
Свинец	Н.о.	Н.о.	40	Н.о.	35
Селен	Н.о.	До 30	Н.о.	3	3
Скандий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Стронций	700	600...2000	500	700	200
Сурьма	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Титан	100	100...300	80	1000	400
Фтор	200	50...600	60	100	1000
Хлор	600	50...1000	100	50	2000
Хром	100	20...70	10	40	35
Цинк	60	До 60	40	5	15
Цирконий	Н.о.	До 10	2	5	30



**Содержание элементов-микропримесей в металлургических флюсах  
некоторых зарубежных месторождений, г/т**

Химический элемент	Оливин (Норвегия)	Боксит (Греция)	Известняк Польша	Кварцит Турция
Барий	60	60	70	300
Бериллий	Сл.	20	0,2	0,3
Бор	4	200	40	10
Бром	Сл.	Сл.	Сл.	1
Ванадий	60	1000	60	60
Вольфрам	Н.о.	30	Н.о.	Н.о.
Галлий	Сл.	70	3	7
Йод	Сл.	Н.о.	4	100
Иттрий	Н.о.	60	10	7
Кобальт	200	40	2	4
Лантаноиды	Н.о.	500	105	75
Литий	2	400	70	10
Медь	20	10	40	20
Молибден	Н.о.	10	Н.о.	Н.о.
Мышьяк	Н.о.	1000	5	3
Натрий	70	40	5	100
Никель	0,7 %	700	200	800
Олово	Н.о.	7	Н.о.	Н.о.
Рубидий	10	Н.о.	30	100
Свинец	Н.о.	20	Н.о.	30
Селен	Н.о.	Н.о.	Н.о.	4
Скандий	10	1000	7	Н.о.
Стронций	60	60	40	20
Сурьма	Н.о.	6	Н.о.	Н.о.
Титан	200	1,4 %	800	0,34 %
Фосфор	70	250	300	80
Фтор	90	600	400	200
Хлор	300	100	90	200
Хром	3000	1000	600	500
Цинк	20	40	10	30
Цирконий	Н.о.	800	300	200

**Содержание элементов-микропримесей в чугунах металлургических предприятий европейской части России, г/т чугуна**

Химический элемент	Предприятие, вид выплавляемого чугуна				
	НЛМК	Северсталь		Тулачермет	
	передельный чугун	передельный чугун	передельный «холодный» чугун ([Si] < 0,5 % масс.)	передельный чугун	нодулярный чугун
Алюминий	8...10	До 50	5	8...10	8...10
Бериллий	Н.о.	2	Н.о.	0,5...1,0	Н.о.
Ванадий	70	100...400	400	50	40
Висмут	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3	Н.о.
Вольфрам	Н.о.	2	Н.о.	0,5	0,5...1,0
Галлий	20	30...70	70	100	15...20
Германий	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1	1
Калий	20	4...20	20	6...10	6...10
Кальций	80	10...80	80	20	5...10
Кобальт	3...5	20...50	50	3...5	3...5
Литий	Сл.	10	Сл.	Сл.	Сл.
Магний	10	До 10	3...5	До 3	До 3
Медь	60	30...60	60	30	20
Мышьяк	5...10	3...5	3...5	3...5	10
Молибден	3...5	1	Н.о.	Н.о.	Сл.
Натрий	8...10	До 40	1...3	3...7	1
Никель	20	40...60	40	10	10
Ниобий	3...5	3...5	3...5	1	1
Олово	5...8	До 10	Сл.	1...3	4...8
Рубидий	Сл.	0,5...1	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Свинец	Н.о.	До 10	1...3	200	До 50
Серебро	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0,5	0,3
Сурьма	5	2...8	2...5	5...8	5...8
Титан	100	500...700	700	350...400	200...300
Фтор	Сл.	До 5	5	20	Сл.
Хлор	5	10...20	10	10	5
Хром	100	80...300	80...90	170...200	80...100
Цинк	20	5...10	10	500	300
Итого	550	1250...1550	1550	1600	915

**Содержание примесных элементов в материалах, отобранных  
из доменной печи № 4 ОАО «Северсталь» после выдувки, г/т чугуна  
(или % при содержании элемента > 1 %)**

Элемент	Козловой чугун со шлаковыми включениями	Отложения на загрузочном устройстве	Цинковая настыль	Шлак из швов кладки горна	Металл из гарнисажа горна
Алюминий	1 %	2000	1	6 %	4
Барий	500	100	Сл.	2000	Сл.
Бериллий	1	2000	Сл.	6	Сл.
Бор	70	0,3	Н.о.	100	Сл.
Бром	Н.о.	30	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ванадий	600	200	Сл.	400	Сл.
Висмут	Н.о.	20	20	Н.о.	200
Галлий	10	20	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Германий	Н.о.	4	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Железо	Основа	18 %	200	4%	6
Индий	7	30	Н.о.	Н.о.	400
Йод	Н.о.	10	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Иттрий	8	6	Н.о.	60	Н.о.
Калий	1%	10 %	0,9	2 %	Сл.
Кальций	4%	1,2 %	5	29 %	4
Кобальт	10	5	Н.о.	50	Н.о.
Кремний	4 %	1,3 %	8	16 %	6
Лантаноиды	80	40	Н.о.	360	Н.о.
Литий	100	50	0,2	200	Сл.
Магний	2 %	3000	4	1 %	Сл.
Марганец	4000	900	Н.о.	2000	Н.о.
Медь	20	10	10	40	400
Мышьяк	Сл.	5	Н.о.	Н.о.	20
Молибден	10	2	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Натрий	500	300	Сл.	2000	Сл.
Никель	20	40	Сл.	40	Н.о.
Ниобий	30	Н.о.	Н.о.	30	Н.о.
Олово	Н.о.	4000	Н.о.	50	15 %
Рубидий	300	2000	Сл.	100	Сл.
Свинец	Сл.	1600	800	Н.о.	Основа
Селен	Сл.	30	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Сера	7000	1,6 %	7	1,4 %	10
Скандий	40	3	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Стронций	300	300	Сл.	400	Сл.
Сурьма	Сл.	30	Н.о.	2	1000
Титан	3000	1000	Сл.	7000	Н.о.
Фосфор	600	70	Н.о.	100	8
Фтор	200	80	Сл.	1000	Сл.

Элемент	Козловой чугун со шлаковыми включениями	Отложения на загрузочном устройстве	Цинковая настиль	Шлак из швов кладки горна	Металл из гарнисажа горна
Хром	300	100	Н.о.	100	Н.о.
Цинк	6	47 %	Основа	100	900
Цирконий	100	30	Н.о.	900	Сл.
Хлор	7	300	Сл.	60	6

**Полный микропримесный состав доменных шлаков металлургических  
предприятий европейской части России, г/т шлака**

Элемент	НЛМК	Северсталь	Тулачермет
Барий	800...1200	450...600	900...1200
Бериллий	До 5	До 1	2...4
Бор	200...300	60...80	250...300
Ванадий	20...30	20...25	До 40
Висмут	Н.о.	Н.о.	15...25
Вольфрам	Н.о.	1...3	До 25
Иттрий	15...25	10...15	30...60
Калий	2400...3500	3200...4500	До 12000
Кобальт	Следы	1...2	До 10
Лантаноиды	50...80	120...160	До 600
Литий	50...60	100...150	25...45
Медь	1...3	1...2	4...6
Молибден	Н.о.	До 20	1...3
Мышьяк	8...10	4...6	3...5
Натрий	1500...2000	800...1000	1600...2200
Никель	Н.о.	1...3	До 2
Рубидий	70...100	50...70	20...30
Свинец	2...3	6...10	5...12
Скандий	20...30	30...50	Н.о.
Стронций	400...800	40...70	600...1000
Титан	1200...1500	2200...3000	1300...1800
Торий	10	Н.о.	5...10
Уран	10	Н.о.	5...10
Фтор	120...150	120...150	20...30
Хлор	60...80	5...10	10...15
Хром	15...25	40...60	40...50
Цинк	200	До 300	До 300
Цирконий	90...140	250...400	300...450

**Полный микропримесный состав доменных шламов металлургических  
предприятий европейской части России, г/т шлама**

Элемент	НЛМК	Северсталь	Тулачермет
Барий	Сл.	Сл.	Сл.
Бериллий	1...3	1...3	2...5
Бор	5...10	5...10	3...5
Бром	1...2	1	1...3
Ванадий	300...350	100...120	100...120
Висмут	Н.о.	Н.о.	1...3
Вольфрам	Н.о.	Н.о.	1...2
Галлий	50...100	150...250	80...120
Германий	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Иод	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Иттрий	5...10	50...80	20...40
Кадмий	1...2	1...3	3...5
Кобальт	15...25	20...30	5...10
Лантаноиды	180...200	500...700	50...60
Литий	Сл.	80...120	4...6
Медь	Н.о.	Н.о.	20...40
Молибден	Сл.	Сл.	1...4
Мышьяк	Сл.	Сл.	5...7
Никель	200...250	100...120	80...150
Олово	200...240	600...800	80...120
Рубидий	10...20	5...10	10...20
Свинец	До 2500	До 1500	До 2000
Селен	1...2	5...8	1...2
Скандий	1...3	50...70	15...30
Стронций	До 2500	300...400	До 2000
Сурьма	Н.о.	3...5	8...10
Теллур	Н.о.	1	1
Титан	Н.о.	Н.о.	300...500
Торий	1...3	Н.о.	3...5
Уран	1...3	Н.о.	5...10
Фтор	80...100	220...250	100...120
Хлор	10...20	60...80	50...60
Хром	100...120	500...600	600...900
Цезий	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Цинк	До 5000	До 25000	До 1000
Цирконий	Н.о.	До 100	10...20

**Содержание примесных микроэлементов  
в некоторых металлургических материалах ЕКО-Шталь, г/т**

Химический элемент	Агломерат	Коксовая мелочь	Чугун	Шлак	Колошниковая пыль
Барий	300	700	Н.о.	200	200
Бериллий	2	2	Н.о.	10	2,5
Бор	20	70	9	300	20
Бром	2	Сл.	Н.о.	Н.о.	15
Висмут	–	–	260	100	350
Ванадий	200	100	Н.о.	Н.о.	Сл.
Вольфрам	30	Сл.	Н.о.	Н.о.	Сл.
Галлий	20	10	9	Н.о.	5
Индий	–	–	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Иттрий	10	30	Н.о.	60	20
Кобальт	20	10	40	Н.о.	40
Лантаниды	54	240	И.о.	254	44
Литий	5	100	Сл.	100	20
Медь	30	6	60	Н.о.	13
Молибден	30	200	30	Сл.	10
Мышьяк	60	6	50	Н.о.	30
Никель	100	30	150	Сл.	150
Олово	15	Сл.	35	Н.о.	20
Рубидий	100	30	Н.о.	20	35
Свинец	20	Сл.	Сл.	Сл.	25
Селен	3	Сл.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Скандий	8	Сл.	Н.о.	50	4
Стронций	300	400	Н.о.	1500	300
Сурьма	5	Н.о.	5	Н.о.	5
Теллур	Сл.	Сл.	Н.о.	Н.о.	Сл.
Титан	725	4000	400	4200	1100
Торий	Сл.	30	Н.о.	10	Сл.
Уран	Сл.	9	Н.о.	10	Сл.
Фтор	10	50	Сл.	70	10
Хлор	200	30	3	80	250
Хром	300	40	560	300	250
Цезий	Сл.	Сл.	Н.о.	Н.о.	2
Цинк	190	10	7	Н.о.	25
Цирконий	50	100	2	300	85

## Приложение 5. Характерные балансы микроэлементов при выплавке передельного чугуна

### Кобальт

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	55	5	10	35
с коксом	5	5	10	5
в том числе с ОЧК <sup>1</sup>	2	2	4	2
Приход и т о г о	60	10	20	40
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	60	10	20	40
в шлак	нет	нет	нет	нет
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлам	< 1	< 1	< 1	< 1

<sup>1</sup> ОЧК – органическая часть кокса.

### Хром

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	250	105	150	420
с коксом	15	5	15	10
в том числе с ОЧК	Нет	Нет	Нет	Нет
Приход и т о г о	265	110	165	430
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	235	100	140	360
в шлак	23	7	20	65
в колошниковую пыль	4	2	3	3
в доменный шлам	3	1	2	2
Переход в чугун, % (за вычетом пыли и шлама)	91	93	88	85

### Ванадий

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	65	110	300	270
с коксом	40	12	20	20
в том числе с ОЧК	10	3	5	5
Приход и т о г о	105	122	320	290
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	90	107	275	260
в шлак	10	12	24	25
в колошниковую пыль	< 1	< 1	1	1
в доменный шлам	5	3	20	4

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
$KK_{дш}$	2,5	2,5	3,0	2,5
Переход в чугун, % (за вычетом пыли и шлама)	90	89	92	91

**Молибден**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	3	4	8	35
с коксом	Нет	Нет	Нет	Нет
в том числе с ОЧК	Нет	Нет	Нет	Нет
Приход и т о г о	3	4	8	35
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	3	4	8	35
в шлак	Нет	Нет	Нет	Нет
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлам	< 1	< 1	< 1	< 1

**Сурьма**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	6	6	6	6
с коксом	Нет	Нет	Нет	Нет
в том числе с ОЧК	Нет	Нет	Нет	Нет
Приход и т о г о	6	6	6	6
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	6	6	6	6
в шлак	Нет	Нет	Нет	Нет
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлам	< 1	< 1	< 1	< 1

**Лантаноиды**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	38	20	120	75
с коксом	50	14	220	20
в том числе с ОЧК	25	7	110	10
Приход и т о г о	88	34	340	95
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	Нет	Нет	Нет	Нет
в шлак	20	24	110	65
в колошниковую пыль	< 1	< 1	< 1	< 1
в доменный шлам	2	2	< 1	< 1



Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
	68	8	230	30
Невязка баланса	(около 75 %)	(25 %)	(почти 70 %)	(свыше 30 %)

*Примечание.* Известны факты накопления лантаноидов на поверхности лежачи печи в виде самостоятельной фазы.

### Бериллий

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	0,3	1,5	0,8	2,7
с коксом	0,4	1,5	3,0	1,5
в том числе с ОЧК	0,3	1,2	2,5	1,2
Приход и т о г о	0,7	3,0	3,8	4,2
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун				
в шлак	0,3	1,5	0,8	2,7
в колошниковую пыль	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
в доменный шлам	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Невязка	0,4	1,5	3,0	1,5

### Литий

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	60	15	13	20
с коксом	18	20	8	15
Приход и т о г о	78	35	21	35
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	Нет	Нет	Нет	Нет
в шлак	64	25	14	25
в колошниковую пыль	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
в доменный шлам	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Невязка	14 (18,01 %)	10 (28,6 %)	7 (33,3 %)	10 (28,6 %)

### Рубидий

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи:				
с железорудной частью	30	40	13	35
с коксом	Следы	42	21	Следы
Приход и т о г о	30	82	34	
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугун	нет	нет	нет	нет
в шлак	25	30	10	5
в колошниковую пыль	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
в доменный шлак	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Невязка	5 (16,6%)	52 (64,6 %)	23 (67,0 %)	30

**Фтор**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи: с железорудной частью	206	210	31	25
с коксом	9	7	13	3
Приход и т о г о	215	217	44	28
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугуна	Сл.	Сл.	Сл.	–
в шлак	108	102	13	17
в колошниковую пыль	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
в доменный шлак	2	1	1	1
Невязка	105	114	30	10

**Хлор**

Статья баланса	Северсталь	НЛМК	Тулачермет	ЕКО-Шталь
Приход в доменные печи: с железорудной частью	64	66	123	240
с коксом	43	9	6	30
Приход и т о г о	107	75	129	270
Переходит в ходе доменной плавки:				
в чугуна	10	5	8	5
в шлак	3	25	5	20
в колошниковую пыль	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
в доменный шлак	1	Сл.	1	–
Невязка	93	45	115	245

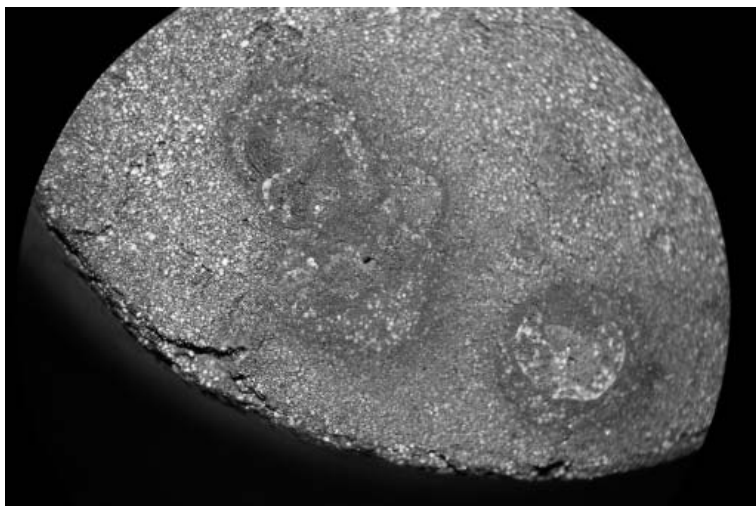
Суммарная невязка балансов хлора и фтора, составляющая для условий ЕКО-Шталь 256,5 г/т чугуна и обусловленная переходом этих элементов в газовую фазу процесса, сопоставима (и даже превосходит в 1,5–2,0 раза) с суммарной невязкой балансов щелочных металлов (включая литий и рубидий), составляющей для условий ЕКО-Шталь 133,5...208,3 г/т чугуна.

Учитывая высокую химическую активность щелочных металлов и галогенов, их близкое расположение в молекулах многих железорудных материалов и в структуре металлургического кокса, можно предположить, что в доменной печи происходит химическое взаимодействие этих микроэлементов и наряду с контуром циркуляции щелочных металлов формируется контур циркуляции галогенов.

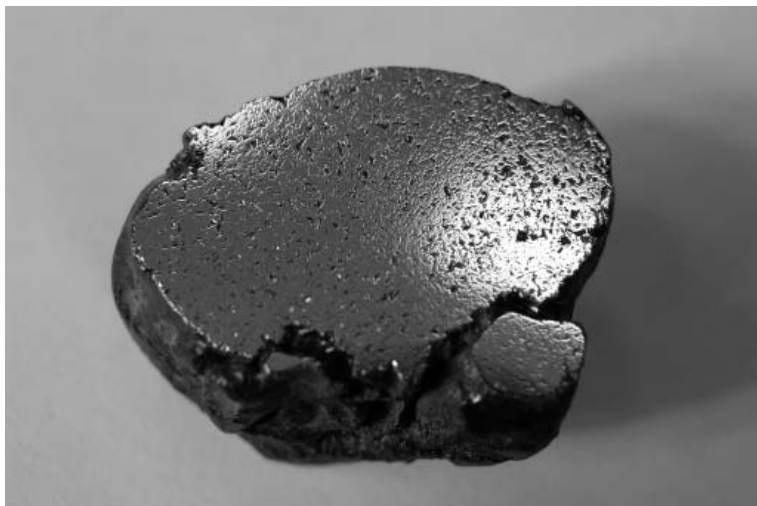
## Приложение 6. Лабораторные образцы брикетов, содержащие галлий



Содержащие галлий брикеты, до обжига и восстановления



Восстановленный галлийсодержащий брикет

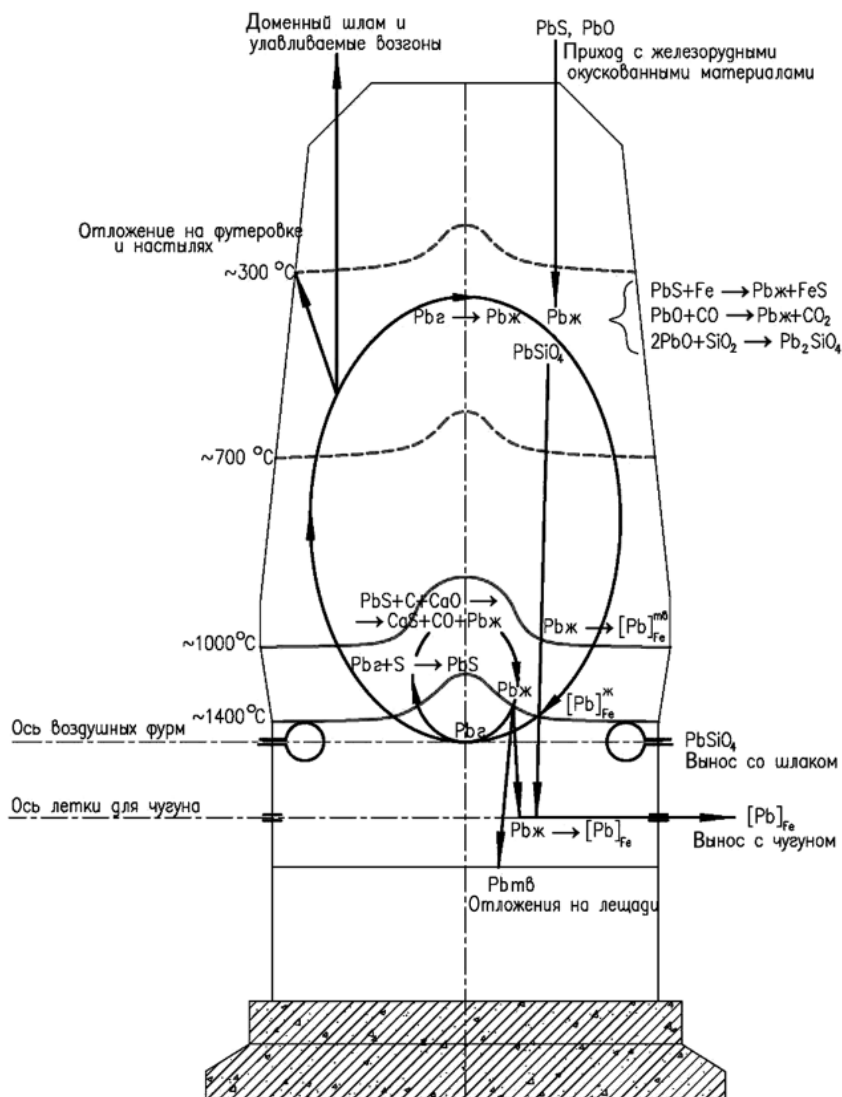


Чугун, содержащий галлий и мышьяк



Образец галлийсодержащего чугуна (справа) и свинца (слева)

## Приложение 7. Схема элементопотока свинца в доменной плавке



**Приложение 8. Химический состав  
гальваношламов некоторых промышленных  
предприятий г. Кургана**

Химический элемент	Минимальное содержание элемента в перерабатываемых полиметаллических рудах, % масс.	Содержание в пробах, % масс.			
		КЗСМ	КМЗ	КАЗ	КПЗ
Свинец	0,5	0,04	0,1	0,03	0,05
Цинк	1,0	3,0	0,4	1,0	1,0
Кадмий	0,006	0,02	0,2	Н.о.	0,008
Медь	0,15	0,2	0,1	0,3	0,8
Олово	0,26	0,008	0,4	0,003	0,1
Селен	0,001	0,01	0,0004	0,0003	0,0004
Висмут	0,001	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0,007
Никель	0,2	1,0	0,1	5,0	0,2
Кобальт	0,13	0,003	0,001	0,005	0,001
Сурьма	0,01	0,0004	0,004	0,0007	Н.о.
Мышьяк	0,01	0,02	0,003	0,003	0,003
Индий	0,0001	Н.о.	0,001	Н.о.	Н.о.
Галлий	0,002	0,07	Н.о.	0,002	0,0007
Германий	0,001	0,06	0,0007	Н.о.	Н.о.
Вольфрам	0,08	0,01	0,003	0,0004	0,001
Молибден	0,005	0,004	0,002	0,0009	0,001
Бериллий	0,03	0,002	0,00002	0,00004	0,00007
Литий	0,7	0,004	0,0004	0,0010	0,0008
Скандий	0,001	0,002	Н.о.	0,0001	0,0001
Лантаноиды	0,01	0,0015	0,0003	0,0015	0,001
Бор	—	0,03	0,007	0,08	0,002
Фтор	—	0,01	0,02	0,02	0,03
Хлор	—	0,1	0,4	0,6	0,1
Натрий	—	0,7	0,1	0,3	0,9
Калий	—	1,0	1,0	0,4	1,0
Рубидий	—	0,0006	0,0005	0,0009	0,001
Кальций	—	10,0	2,0	10,0	0,1
Магний	—	0,9	0,7	4,0	0,5
Алюминий	—	0,9	0,3	0,5	0,7
Кремний	—	4,0	0,2	4,0	2,0
Фосфор	—	0,1	1,0	4,0	0,2
Сера	—	0,9	0,9	2,0	1,0
Титан	—	0,05	0,04	0,2	0,03
Ванадий	—	0,007	0,001	0,005	0,002
Хром	—	4,0	2,0	1,0	1,0
Марганец	—	1,0	0,04	0,2	0,06
Железо	—	16,0	3,0	4,3	4,5

Химический элемент	Минимальное содержание элемента в перерабатываемых полиметаллических рудах, % масс.	Содержание в пробах, % масс.			
		КЗСМ	КМЗ	КАЗ	КПЗ
Стронций	–	0,2	0,03	0,1	0,07
Цирконий	–	0,01	0,001	0,003	0,002
Цезий	–	Н.о.	Н.о.	0,0001	0,0001
Иттрий	–	0,02	0,003	0,0003	0,0002
Бром	–	0,001	0,006	0,003	0,006
Барий	–	0,06	0,02	0,04	0,04
Уран	–	0,002	0,0007	0,001	0,0002
Серебро	–	0,0001	0,0001	Н.о.	0,003

### Приложение 9. Характерный состав ванадийсодержащих ЗШО ТЭС, % масс.

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Li	0,0004	Ga	0,01	Ce	0,00006
Be	0,0002	Ge	0,0003	Pr	0,00007
B	0,0002	As	0,006	Nb	0,0001
C	4,6	Se	0,002	Sm	0,0001
F	0,001	Br	0,0003	Eu	0,0001
Na	0,009	Rb	0,0005	Gd	0,0002
Mg	14,6	Sr	0,02	Tb	0,0001
Al	0,02	Y	0,0001	Dy	0,0003
Si	0,1	Zr	0,005	Ho	0,0001
P	0,005	Nb	0,0007	Er	0,0002
S	17,00	Mo	0,004	Tm	0,0001
Cl	0,006	Ru	0,0003	Yb	0,0004
K	0,04	Rh	0,0003	Lu	0,00009
Ca	0,73	Pd	0,00006	Hf	0,0005
Sc	0,0004	Ag	0,0002	Ta	–
Ti	0,15	Cd	0,0003	W	0,0006
V	10,4	In	0,0001	Re	0,0002
Cr	0,006	Sn	0,0004	Os	0,00007
Mn	0,02	Sb	0,0004	Ir	0,00005
Fe	0,92	Te	0,0005	Pt	0,0007
Co	0,004	I	0,0001	Au	0,00005
Ni	3,6	Cs	0,00007	Hg	0,0005
Cu	0,003	Ba	0,0001	Tl	0,0001
Zn	0,004	La	0,00007	Pb	0,0004
Th	0,0002	U	0,0002	Bi	0,0002

## **Приложение 10. Основные положения Европейской Директивы 2000/53/ЕС**

**Статья 4.** С 1 июля 2003 года все автомобильные материалы и компоненты не должны содержать регламентированных вредных веществ (РВВ) – свинца, ртути, кадмия и шестивалентного хрома, кроме исключений, разрешенных Приложением 2 к Директиве.

**Статья 5.** Страны-участницы должны принять необходимые меры для того, чтобы все отслужившие свой срок автомобили были отправлены на специализированные предприятия по обработке; чтобы имелось достаточное количество предприятий по сбору и обработке; чтобы разработать систему, согласно которой свидетельство об утилизации являлось бы условием для снятия с учета отслужившего автомобиля. Свидетельство об утилизации должно выдаваться владельцу, когда отслуживший свой срок автомобиль отправляется на предприятие по обработке; чтобы доставка автомобиля на официальное предприятие по обработке производилась бесплатно для последнего держателя и/или владельца и чтобы производители взяли на себя все или значительную часть расходов по реализации этой меры и/или забирали отслужившие свой срок автомобили при тех же условиях (в соответствии со статьей 12 данное положение вступает в силу с 1 января 2007 года).

**Статья 6.** Страны-участницы должны принять необходимые меры для того, чтобы отслужившие свой срок автомобили хранились и обрабатывались в соответствии с минимальными техническими требованиями, изложенными в Приложении 1 к Директиве и без ущерба национальным положениям в области здравоохранения и окружающей среды; чтобы любая организация или предприятие, выполняющие операции обработки, получили разрешение компетентного органа, а также обеспечили демонтаж или иное селективное разделение для опасных материалов или компонентов для того, чтобы не загрязнять материалы и отходы, полученные в результате измельчения отслуживших автомобилей.

**Статья 7.** Страны-участницы должны принять необходимые меры для того, чтобы достичь следующих целей: с 1 января 2006 года для всех отслуживших автомобилей должен обеспечиваться уровень вторичной переработки 80 % и уровень утилизации 85 % от массы автомобилей в среднем за год; для автомобилей, выпущенных до 1 января 1980 года, могут устанавливаться более низкие показатели, но не ниже 70 % для вторичной переработки и не ниже 75 % для утилизации. С 1 января 2015 года для всех отслуживших автомобилей должен



обеспечиваться уровень вторичной переработки 85 % и уровень утилизации 95 % от массы автомобилей в среднем за год.

**Статья 8.** Страны-участницы должны принять меры для того, чтобы производители автомобилей, во взаимодействии с поставщиками, использовали стандарты маркировки компонентов и материалов для обеспечения идентификации при утилизации; чтобы производители автомобилей в течение 6 месяцев после того, как автомобиль выведен на рынок, предоставляли информацию по демонтажу компонентов и материалов для каждого выведенного на рынок нового типа автомобиля, а также месторасположение в автомобиле опасных материалов и компонентов в объеме, необходимом для специализированных предприятий по обработке.

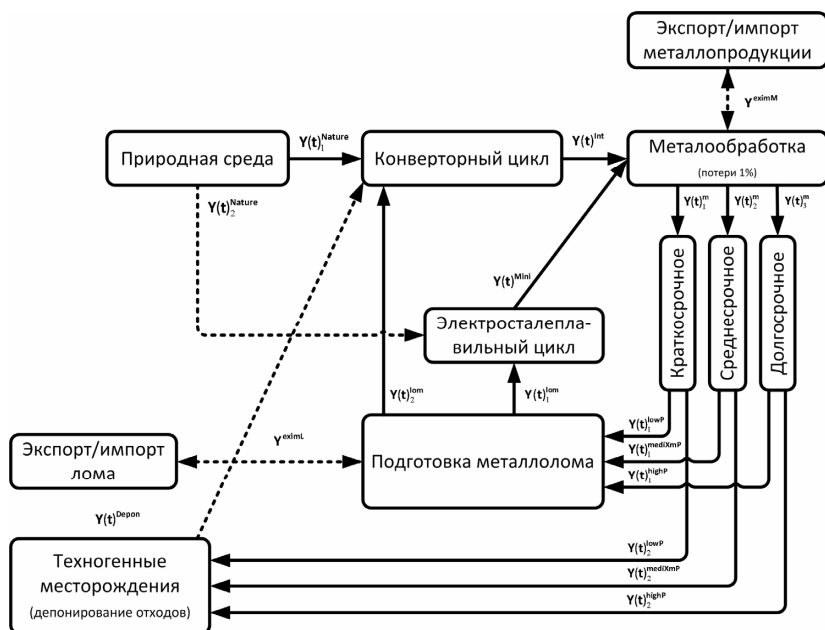
**Статья 9.** Страны-участницы должны раз в три года направлять в Комиссию отчеты об исполнении настоящей Директивы.

**Статья 10.** Предприятия, осуществляющие демонтаж автомобилей, должны иметь специальную лицензию и обеспечивать выполнение определенных технических требований. Такие предприятия должны иметь: непроницаемые поверхности с резервуарами для сбора и раздельного хранения всех сливаемых жидкостей, отстойниками и очистителями; оборудование для обработки и очистки воды в соответствии с санитарными нормами и нормами по защите окружающей среды; соответствующие требованиям пожарной безопасности места хранения для использованных шин, полимеров и других автомобильных компонентов.

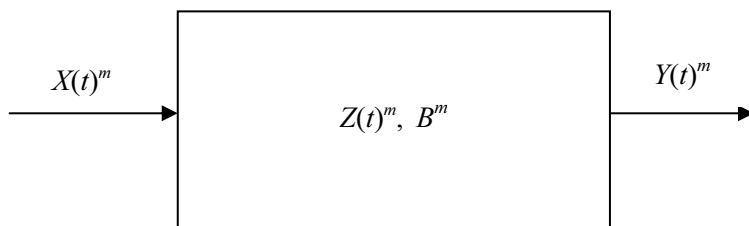
### **Приложение 11. Распределение некоторых элементов-металлов в результате авторециклинга, тыс. т**

Металл	Используется в составе вторичных ресурсов, тыс. т	Попадает в готовую продукцию, тыс. т		
		чугун	сталь	цветные металлы
Железо	618,5	8,1	504,0	10,0
Алюминий	105,2	0,00	2,25	71,0
Медь	56,4	5,36	10,30	39,1
Хром	18,0	1,38	0,26	12,11
Никель	18,0	2,46	0,38	12,12
Цинк	15,4	1,08	0,02	10,39
Свинец	21,9	1,98	0,005	14,71
Титан	10,3	0,66	0,04	6,93
Кобальт	2,6	0,18	0,1	1,74
Сурьма	1,9	0,04	0,07	1,29

## Приложение 12. Описание составляющих элементов и подсистем имитационной модели рециклинга



### Элемент «Металлообработка»



$X(t)^m$  – прогноз (ретропрогноз) производства металла в составе металлопродукции за исследуемый период по годам, где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде.

Прогноз (ретропрогноз) количества металла в производимой металлопродукции  $X(t)^m$  может быть задан следующим образом:

–  $X(t)^m = Y(t)^{\text{exim}} + K^m$ , где  $Y(t)^{\text{exim}}$  – прогноз (ретропрогноз) экспорта/импорта металла в составе металлопродукции,  $K^m$  – константа (задается по результатам статистических исследований региона);

–  $X(t)^m = f(t, \alpha)$  – рост монотонный:  $X(t)^m = X(t-1)^m (1 + \alpha^m)$ , где  $X(0)^m = K^m$ ,  $\alpha^m$  – шаг роста (задается по результатам статистических исследований для исследуемого региона);

–  $X(t)^m = f(t, \alpha)$  – монотонная стагнация:  $X(t)^m = X(t-1)^m (1 - \alpha^m)$ , где  $X(0)^m = K^m$ ,  $\alpha^m$  – шаг стагнации (задается по результатам статистических исследований региона);

–  $X(t)^m = f(t, \alpha)$  – функциональная зависимость роста/стагнации, присущая конкретному территориальному региону (по результатам статистических исследований региона).

$$B^m = \begin{Bmatrix} B_0^m \\ B_1^m \\ B_2^m \\ B_3^m \end{Bmatrix},$$

где  $B_0^m$  – коэффициент потерь металла при металлообработке;

$B_1^m$  – доля металла, поступающего в сферу краткосрочного потребления;

$B_2^m$  – доля металла, поступающего в сферу среднесрочного потребления;

$B_3^m$  – доля металла, поступающего в сферу долгосрочного потребления.

Прогнозируемое производство металла в составе металлопродукции по годам с учетом потерь:

$$Z(t)^m = f(t, X(t)^m, B_0^m) = X(t)^m (1 - B_0^m);$$

$$Y(t)^m = \begin{Bmatrix} Y(t)_1^m \\ Y(t)_2^m \\ Y(t)_3^m \\ Y(t)_4^m \end{Bmatrix},$$

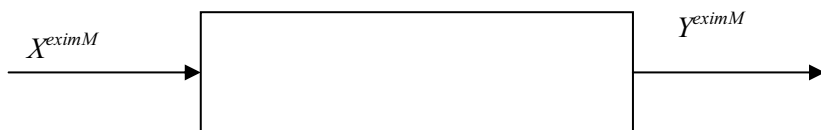
где  $Y(t)_1^m = f(t, Z(t)^m, B_1^m) = Z(t)^m B_1^m$  – количество металла, поступающего в сферу краткосрочного потребления;

$Y(t)_2^m = f(t, Z(t)^m, B_2^m) = Z(t)^m B_2^m$  – количество металла, поступающего в сферу среднесрочного потребления;

$Y(t)_3^m = f(t, Z(t)^m, B_3^m) = Z(t)^m \cdot B_3^m$  – количество металла, поступающего в сферу долгосрочного потребления;

$Y(t)_4^m = f(t, X(t)^m, B_0^m) = X(t)^m B_0^m$  – количество потерь металла при металлообработке.

### Элемент «Экспорт / Импорт металлопродукции»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$X(t)^{eximM}$  – прогноз (ретропрогноз) экспорта / импорта металла в составе металлопродукции за исследуемый период по годам, который может быть задан следующим образом:

$X(t)^{eximM} = 0$  – экспорт / импорт не учитывается;

$X(t)^{eximM}$  – прогноз (ретропрогноз) экспорта/импорта. Задается вручную (по результатам статистических исследований для рассматриваемого региона; если число положительное, то – экспорт; если число отрицательное, то – импорт);

$X(t)^{eximM} = -K^{imM}$  – импорт постоянен;

$X(t)^{eximM} = f(t, \alpha)$  – монотонный рост импорта:  $X(t)^{eximM} = X(t-1)^{eximM} (1 + \alpha^{imM})$  где  $X(0)^{eximM} = -K^{imM}$ ,  $\alpha^{imM}$  – шаг роста;

$X(t)^{eximM} = f(t, \alpha)$  – монотонная стагнация импорта:  $X(t)^{eximM} = X(t-1)^{eximM} \cdot (1 - \alpha^{imM})$ , где  $X(0)^{eximM} = -K^{imM}$ ,  $\alpha^{imM}$  – шаг стагнации;

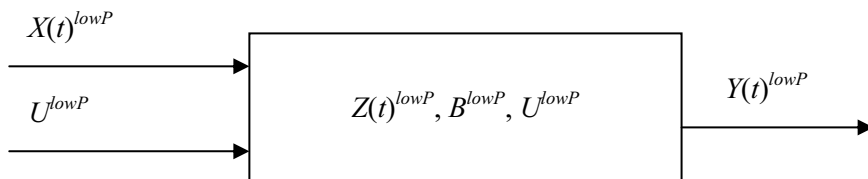
$X(t)^{eximM} = K^{exM}$  – экспорт постоянен;

$X(t)^{eximM} = f(t, \alpha)$  – монотонный рост экспорта:  $X(t)^{eximM} = X(t-1)^{eximM} \cdot (1 + \alpha^{exM})$ , где  $X(0)^{eximM} = K^{exM}$ ,  $\alpha^{exM}$  – шаг роста;

$X(t)^{eximM} = f(t, \alpha)$  – монотонная стагнация экспорта:  $X(t)^{eximM} = X(t-1)^{eximM} \cdot (1 + \alpha^{exM})$ , где  $X(0)^{eximM} = K^{exM}$ ,  $\alpha^{exM}$  – шаг стагнации;

$$Y(t)^{eximM} = X(t)^{eximM}.$$

### Элемент «Краткосрочное потребление»



$$U^{lowP} = \left\{ \begin{matrix} U_1^{lowP} \\ U_2^{lowP} \end{matrix} \right\} - \text{управляющие воздействия на стадии кратко-}$$

срочного потребления,

где  $U_1^{lowP}$  – срок нахождения металлопродукции в краткосрочном периоде;

$U_2^{lowP}$  – коэффициент сбора лома для изделий краткосрочной сферы потребления.

$$X(t)^{lowP} = \left\{ \begin{matrix} X(t)_1^{lowP} \\ X(t)_2^{lowP} \end{matrix} \right\} - \text{металл в продукции, поступившей в крат-}$$

косрочное потребление,

где  $X(t)^{lowP}$  – количество металла в продукции, поступившей в краткосрочное потребление, складывается из двух частей:

1) для периода времени в прошлом, а именно за  $U_1^{lowP}$  лет до отчетного периода:  $X(t - U_1^{lowP})^{lowP} = X(t)_1^{lowP}$  – количество металла в продукции, поступившей в краткосрочное потребление за

предыдущие  $U_1^{lowP}$  лет до начала прогнозного периода. Задается вручную согласно исследованиям изучаемого региона, где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, U_1^{lowP}$ ,  $t$  – рассматриваемый год;

2) для прогнозного периода, а именно за  $n$  лет:

$X(t)^{lowP} = X(t)_2^{lowP} = Y(t)_1^m$  – количество металла в продукции, поступающей в сферу краткосрочного потребления за период прогноза (ретропрогноза), где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде.

$$B^{lowP} = \left\{ \begin{matrix} B_0^{lowP} \\ B_1^{lowP} \end{matrix} \right\},$$

где  $B_0^{lowP}$  – коэффициент износа изделий краткосрочной сферы потребления, % в год;

$B_1^{lowP} = B_0^{lowP} U_1^{lowP}$  – коэффициент потерь металла в краткосрочном периоде.

Количество металла сферы краткосрочного потребления с учетом потерь:

$$Z(t)^{lowP} = f(t, X(t)^{lowP}, B_1^{lowP}, U_1^{lowP}) = X(t - U_1^{lowP})^{lowP} (1 - B_1^{lowP}),$$

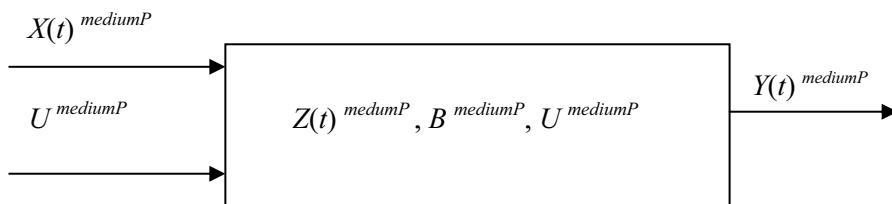
$$Y(t)^{lowP} = \left\{ \begin{matrix} Y(t)_1^{lowP} \\ Y(t)_2^{lowP} \\ Y(t)_3^{lowP} \end{matrix} \right\},$$

где  $Y(t)_1^{lowP} = f(t, Z(t)^{lowP}, U_2^{lowP}) = Z(t)^{lowP} U_2^{lowP}$  – металл продукции из сферы краткосрочного потребления, поступающий после сбора металлолома в стадию подготовки металлолома;

$Y(t)_2^{lowP} = f(t, Z(t)^{lowP}, U_2^{lowP}) = Z(t)^{lowP} U_2^{lowP}$  – металл продукции из сферы краткосрочного потребления, поступающий после сбора металлолома в техногенные месторождения;

$Y(t)_3^{lowP} = f(t, Z(t)^{lowP}, B_1^{lowP}, U_1^{lowP}) = X(t - U_1^{lowP})^{lowP} B_1^{lowP}$  – потери металла в краткосрочном периоде.

## Элемент «Среднесрочное потребление»



$$U^{mediumP} = \left\{ \begin{matrix} U_1^{mediumP} \\ U_2^{mediumP} \end{matrix} \right\} - \text{управляющие воздействия на стадии}$$

среднесрочного потребления,

где  $U_1^{mediumP}$  – срок нахождения металлопродукции в среднесрочном периоде;

$U_2^{mediumP}$  – коэффициент сбора лома для изделий среднесрочной сферы потребления;

$$X(t)^{mediumP} = \left\{ \begin{matrix} X(t)_1^{mediumP} \\ X(t)_2^{mediumP} \end{matrix} \right\} - \text{металл продукции, поступившей в}$$

сферу среднесрочного потребления,

где  $X(t)^{mediumP}$  – количество металла продукции, поступившей в среднесрочное потребление, складывается из двух частей:

1) для периода времени в прошлом, а именно за  $U_1^{mediumP}$  – лет до начала прогнозного периода:  $X(t - U_1^{mediumP})^{mediumP} = X(t)_1^{mediumP}$  – металл продукции, поступившей в среднесрочное потребление за предыдущие  $U_1^{mediumP}$  лет до начала прогнозного периода. Задается вручную согласно исследованиям изучаемого региона, где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, U_1^{mediumP}$ ,  $t$  – рассматриваемый год;

2) для прогнозного периода, а именно за  $n$  лет:

$X(t)^{mediumP} = X(t)_2^{mediumP} = Y(t)_2^m$  – металл продукции, поступающей в среднесрочное потребление в прогножном периоде, где

длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2 \dots n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде.

$$B^{mediumP} = \left\{ \begin{matrix} B_0^{mediumP} \\ B_1^{mediumP} \end{matrix} \right\},$$

где  $B_0^{mediumP}$  – коэффициент износа изделий среднесрочной сферы потребления, % в год;

$B_1^{mediumP} = B_0^{mediumP} U_1^{mediumP}$  – коэффициент потерь металла в сфере среднесрочной эксплуатации.

Количество металла сферы среднесрочного потребления с учетом потерь:

$$\begin{aligned} Z(t)^{mediumP} &= f(t, X(t)^{mediumP}, B_1^{mediumP}, U_1^{mediumP}) = \\ &= X(t - U_1^{mediumP})^{mediumP} (1 - B_1^{mediumP}); \\ Y(t)^{mediumP} &= \left\{ \begin{matrix} Y(t)_1^{mediumP} \\ Y(t)_2^{mediumP} \\ Y(t)_3^{mediumP} \end{matrix} \right\}, \end{aligned}$$

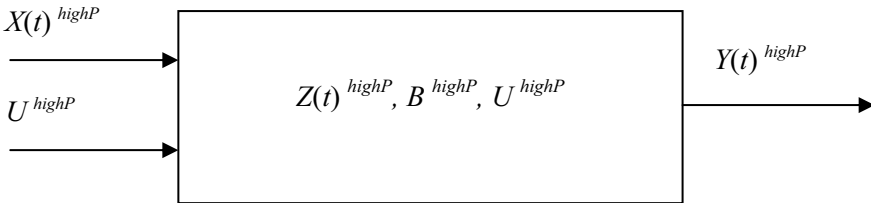
где  $Y(t)_1^{mediumP} = f(t, Z(t)^{mediumP}, U_2^{mediumP}) = Z(t)^{mediumP} U_2^{mediumP} =$   
 $= Z(t)^{mediumP} U_2^{mediumP}$  – количество металла продукции из сферы среднесрочного потребления, поступающего после сбора металлолома в стадию подготовки металлолома;

$Y(t)_2^{mediumP} = f(t, Z(t)^{mediumP}, U_2^{mediumP}) = Z(t)^{mediumP} U_2^{mediumP} =$  – количество металла продукции из сферы среднесрочного потребления, поступающего после сбора металлолома в техногенные месторождения;

$Y(t)_3^{mediumP} = f(t, Z(t)^{mediumP}, B_1^{mediumP}, U_1^{mediumP}) =$   
 $= X(t - U_1^{mediumP})^{mediumP} B_1^{mediumP}$  – потери металла в среднесрочном периоде.



## Элемент «Долгосрочное потребление»



$$U^{highP} = \left\{ \begin{matrix} U_1^{highP} \\ U_2^{highP} \end{matrix} \right\} - \text{управляющие воздействия на стадии средне-}$$

срочного потребления,

где  $U_1^{highP}$  – время нахождения металлопродукции в долгосрочном периоде;

$U_2^{highP}$  – коэффициент сбора лома для изделий долгосрочной сферы потребления.

$$X(t)^{highP} = \left\{ \begin{matrix} X(t)_1^{highP} \\ X(t)_2^{highP} \end{matrix} \right\} - \text{количество металла продукции, посту-}$$

пившей в сферу долгосрочного потребления,

где  $X(t)^{highP}$  – количество металла продукции, поступившей в сферу долгосрочного потребления, которое складывается из двух частей:

- 1) для периода времени в прошлом, а именно за  $U_1^{highP}$  – лет до начала прогнозного периода:  $X(t - U_1^{highP})^{highP} = X(t)_1^{highP}$  – количество металла продукции, поступившей в долгосрочное потребление за предыдущие  $U_1^{highP}$  лет до начала прогнозного периода. Задается вручную согласно результатам статистических исследований изучаемого региона, где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, U_1^{highP}$ ,  $t$  – рассматриваемый год;
- 2) для прогнозного периода, а именно за  $n$  лет:

$X(t)^{highP} = X(t)_2^{highP} = Y(t)_3^m$  – количество металла продукции, поступающей в долгосрочное потребление в прогнозном периоде, где длительность периода исследования составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде.

$$B^{highP} = \left\{ \begin{matrix} B_0^{highP} \\ B_1^{highP} \end{matrix} \right\},$$

где  $B_0^{highP}$  – коэффициент износа изделий для долгосрочной сферы эксплуатации, % в год;

$B_1^{highP} = B_0^{highP} U_1^{highP}$  – коэффициент потерь металла в долгосрочной сфере эксплуатации.

Количество металла сферы долгосрочного потребления с учетом потерь:

$$Z(t)^{highP} = f(t, X(t)^{highP}, B_1^{highP}, U_1^{highP}) = X(t - U_1^{highP})^{highP} (1 - B_1^{highP});$$

$$Y(t)^{highP} = \left\{ \begin{matrix} Y(t)_1^{highP} \\ Y(t)_2^{highP} \\ Y(t)_3^{highP} \end{matrix} \right\},$$

где  $Y(t)_1^{highP} = f(t, Z(t)^{highP}, U_2^{highP}) = Z(t)^{highP} U_2^{highP} = Z(t)^{highP} U_2^{highP}$  – количество металла продукции из сферы долгосрочного потребления, поступающей после сбора лома в стадию подготовки металлолома;

$Y(t)_2^{highP} = f(t, Z(t)^{highP}, U_2^{highP}) = Z(t)^{highP} U_2^{highP} = Z(t)^{highP} (1 - U_2^{highP})$  – количество металла продукции из сферы долгосрочного потребления, поступающего после сбора металлолома в техногенные месторождения;

$Y(t)_3^{highP} = f(t, Z(t)^{highP}, B_1^{highP}, U_1^{highP}) = X(t - U_1^{highP})^{highP} B_1^{highP}$  – потери металла в долгосрочном периоде.

## Элемент «Экспорт/Импорт металлолома»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$X(t)^{eximL}$  – прогноз (ретропрогноз) количества металла в составе экспорта/импорта лома за исследуемый период по годам, который может быть задан следующим образом:

$X(t)^{eximL} = 0$  – экспорт/импорт не учитывается в модели;

$X(t)^{eximL}$  – прогноз (ретропрогноз) экспорта/импорта задается вручную (по результатам статистических исследований для рассматриваемого региона, если число положительное, то – экспорт, если число отрицательное, то – импорт);

$X(t)^{eximL} = K^{imL}$  – импорт постоянен;

$X(t)^{eximL} = f(t, \alpha)$  – монотонный рост импорта:  $X(t)^{eximL} = X(t-1)^{eximL} (1 + \alpha^{imL})$ , где  $X(0)^{eximL} = K^{imL}$ ,  $\alpha^{imL}$  – шаг роста;

$X(t)^{eximL} = f(t, \alpha)$  – монотонная стагнация импорта:  $X(t)^{eximL} = X(t-1)^{eximL} (1 - \alpha^{imL})$ , где  $X(0)^{eximL} = K^{imL}$ ,  $\alpha^{imL}$  – шаг стагнации;

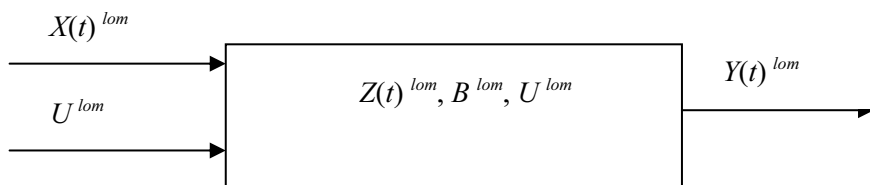
$X(t)^{eximL} = -K^{exL}$  – экспорт постоянен;

$X(t)^{eximL} = f(t, \alpha)$  – монотонный рост экспорта:  $X(t)^{eximL} = X(t-1)^{eximL} (1 + \alpha^{exL})$ , где  $X(0)^{eximL} = -K^{exL}$ ,  $\alpha^{exL}$  – шаг роста;

$X(t)^{eximL} = f(t, \alpha)$  – монотонная стагнация экспорта:  $X(t)^{eximL} = X(t-1)^{eximL} (1 - \alpha^{exL})$ , где  $X(0)^{eximL} = -K^{exL}$ ,  $\alpha^{exL}$  – шаг стагнации;

$Y(t)^{eximL} = X(t)^{eximL}$ .

## Элемент «Подготовка металлолома»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$$U^{lom} = \begin{Bmatrix} U_1^{lom} \\ U_2^{lom} \end{Bmatrix} - \text{управляющие воздействия на стадии подготовки}$$

металлолома,

где  $U_1^{lom}$  – доля металлического лома, поступающего в дальнейшую переработку в электросталеплавильный цикл;

$U_2^{lom}$  – доля металлического лома, поступающего в дальнейшую переработку в конверторный цикл;

$$X(t)^{lom} = \begin{Bmatrix} X(t)_1^{lom} \\ X(t)_2^{lom} \\ X(t)_3^{lom} \\ X(t)_4^{lom} \end{Bmatrix} - \text{количество металлолома, поступившего}$$

в стадию подготовки лома к металлургическому переделу,

где  $X(t)_1^{lom} = Y(t)_1^{lowP}$  – количество металла, покинувшего краткосрочную сферу потребления и поступившего после сбора металлолома в стадию подготовки лома к металлургическому переделу;

$X(t)_2^{lom} = Y(t)_1^{mediumP}$  – количество металла, покинувшего среднесрочную сферу потребления и поступившего после сбора металлолома в стадию подготовки лома к металлургическому переделу;

$X(t)_3^{lom} = Y(t)_1^{highP}$  – количество металла, покинувшего долго-

срочную сферу потребления и поступившего после сбора металлолома в стадию подготовки лома к металлургическому переделу;

$X(t)_4^{lom} = Y(t)^{eximL}$  – прогноз (ретропрогноз) экспорта/импорта лома.

$B^{lom}$  – коэффициент потерь металла на стадии подготовки металлолома.

$Z(t)^{lom} = (X(t)_1^{lom} + X(t)_2^{lom} + X(t)_3^{lom} + X(t)_4^{lom})(1 - B^{lom})$  – количество металла, прошедшего стадию подготовки металлолома с учетом потерь;

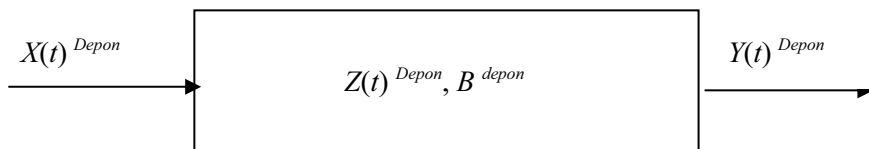
$$Y(t)^{lom} = \begin{cases} Y(t)_1^{lom} \\ Y(t)_2^{lom} \\ Y(t)_3^{lom} \end{cases},$$

где  $Y(t)_1^{lom} = X(t)^{lom} U_1^{lom}$  – количество металлического лома, поступающего в электросталеплавильный цикл;

$Y(t)_2^{lom} = X(t)^{lom} U_2^{lom}$  – количество металлического лома, поступающего в конверторный цикл;

$Y(t)_3^{lom} = (X(t)_1^{lom} + X(t)_2^{lom} + X(t)_3^{lom} + X(t)_4^{lom}) B^{lom}$  – потери металлического лома на стадии металлоподготовки.

### Элемент «Техногенные месторождения»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$X(t)^{Depon}$  – количество металла, поступающего после сбора металлолома в техногенные месторождения за период по годам,

где  $X(t)^{Depon} = Y(t)_2^{lowP} + Y(t)_2^{mediumP} + Y(t)_2^{highP}$ ;

$B^{Depon}$  – коэффициент диссипации металла из техногенных месторождений (территорий депонирования отходов металла);

$Z(t)^{Depon} = (Y(t-1)_1^{Depon} + X(t)^{Depon} - Y(t)_2^{Depon})(1 - B^{Depon})$  – накопление металла в техногенных месторождениях с учетом диссипации в природную среду.

$$Y(t)^{Depon} = \begin{cases} Y(t)_1^{Depon} \\ Y(t)_2^{Depon} \\ Y(t)_3^{Depon} \end{cases},$$

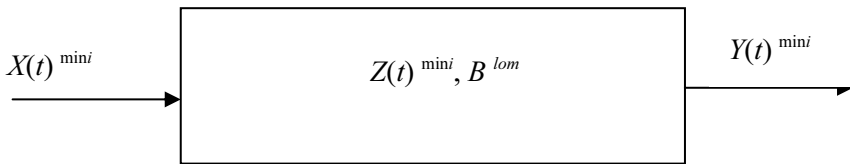
где  $Y(t)_1^{Depon} = X(t)^{Depon}$  – количество металла, накапливающегося в техногенных месторождениях;

$Y(0)_1^{Depon}$  – количество металла, накопленного в техногенном месторождении до прогнозного периода;

$Y(t)_2^{Depon}$  – количество металла, поступающего в конвертерный цикл для дальнейшего передела из техногенных месторождений (задается вручную, по результатам статистических исследований);

$Y(t)_3^{Depon} = (Y(t-1)_1^{Depon} + X(t)^{Depon} - Y(t)_2^{Depon})B^{Depon}$  – потери металла при диссипации металла из техногенных месторождений.

### Элемент «Электросталеплавильный цикл»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$$X(t)^{mini} = \begin{cases} X(t)_1^{mini} \\ X(t)_2^{mini} \end{cases},$$

где  $X(t)_1^{mini} = Y(t)_1^{lom}$  – количество металла вторичных ресурсов, по-

ступающего в электросталеплавильный цикл после стадии подготовки металлолома;

$X(t)_2^{\min i} = Y(t)_2^{\text{Nature}}$  – количество металла природного сырья (первичного сырья), которое поступает в электросталеплавильный цикл;

$B^{\min i}$  – коэффициент потерь в электросталеплавильном цикле;

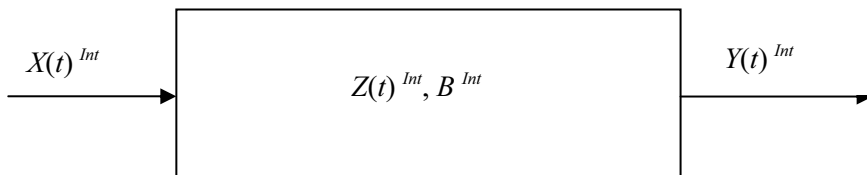
$Z(t)^{\min i} = (X(t)_1^{\min i} + X(t)_2^{\min i})(1 - B^{\min i})$  – количество металла, произведенного в электросталеплавильном цикле с учетом потерь;

$$Y(t)^{\min i} = \begin{cases} Y(t)_1^{\min i} \\ Y(t)_2^{\min i} \end{cases},$$

где  $Y(t)_1^{\min i} = X(t)^{\min i}$  – количество металла, произведенного в электросталеплавильном цикле, поступающего в металлообработку;

$Y(t)_2^{\min i} = (X(t)_1^{\min i} + X(t)_2^{\min i})B^{\min i}$  – количество потерь при производстве металла в электросталеплавильном цикле;

### Элемент «Конвертерный цикл»



Длительность периода исследования (прогноза) составляет  $t = 1, 2, \dots, n$ ,  $t$  – рассматриваемый год,  $n$  – число лет в рассматриваемом периоде;

$$X(t)^{\text{Int}} = \begin{cases} X(t)_1^{\text{Int}} \\ X(t)_2^{\text{Int}} \\ X(t)_3^{\text{Int}} \end{cases},$$

где  $X(t)_1^{\text{Int}} = Y(t)_2^{\text{Iom}}$  – количество металла вторичных ресурсов, поступающего в конвертерный цикл после стадии подготовки металлолома;

$X(t)_2^{Int} = Y(t)_1^{Nature}$  – количество металла природного сырья (первичного сырья), поступающего в конвертерный цикл из природной среды;

$X(t)_3^{Int} = Y(t)_2^{Depon}$  – количество металла техногенных ресурсов, поступающего в конвертерный цикл из техногенных месторождений;

$B^{Int}$  – коэффициент потерь в конвертерном цикле;

$Z(t)^{Int} = (X(t)_1^{Int} + X(t)_2^{Int} + X(t)_3^{Int})(1 - B^{Int})$  – количество металла, произведенного в конвертерном цикле с учетом потерь;

$$Y(t)^{Int} = \begin{Bmatrix} Y(t)_1^{Int} \\ Y(t)_2^{Int} \end{Bmatrix},$$

где  $Y(t)_1^{Int} = X(t)^{Int}$  – количество металла, произведенное в конвертерном цикле, и поступающее в металлообработку;

$Y(t)_2^{Int} = (X(t)_1^{Int} + X(t)_2^{Int} + X(t)_3^{Int})B^{Int}$  – потери при производстве металла в конвертерном цикле.

### Элемент «Природная среда»



$$Y(t)^{Nature} = \begin{Bmatrix} Y(t)_1^{Nature} \\ Y(t)_2^{Nature} \end{Bmatrix} - \text{количество металла природного сырья,}$$

необходимого для прогнозируемого объема производства  $Y(t)^{Nature} = Y(t)_1^{Nature} + Y(t)_2^{Nature}$ ,

где  $Y(t)_1^{Nature} = \frac{(X(t)^m - Y(t)^{\min i})}{(1 - B^{int})} - Y(t)_2^{lom} - Y(t)^{Depon}$  – количество

металла природного сырья (первичного сырья), которое необходимо переработать в конвертерном цикле, чтобы выполнить намеченный прогноз производства металлопродукции по годам;



$Y(t)_2^{Nature}$  – количество металла природного сырья (первичного сырья), которое поступает в электросталеплавильный цикл, может быть задано следующим образом:

$Y(t)_2^{Nature}$  – не учитывается в прогнозе;

$Y(t)_2^{Nature}$  – задается вручную (в случае ретропрогноза – по результатам статистических исследований для рассматриваемого региона);

$Y(t)_2^{Nature} = Y(t)_1^{lom} K^{N\min i}$  – задается автоматически, где  $K^{N\min i}$  – доля металла первичного сырья, поступающего в электросталеплавильный цикл, по отношению к металлу вторичных ресурсов, перерабатываемому в этом цикле.

**Приложение 13. Исходные данные для расчета движения  
железа в экономике Японии в период 1958 – 2008 гг.**

Год	Производство стали	Распределение железа готовой продукции между сферами потребления, %			Потери железа на интегрированных предприятиях, % от прихода
		Кратко- срочная	Средне- срочная	Долго- срочная	
1958	13,4	15	35	50	10,5
1959	16,3	15	35	50	10,4
1960	20,1	15	35	50	10,3
1961	24,3	15	35	50	10,2
1962	28,1	17	36	47	10,1
1963	26,2	17	36	47	10,0
1964	36,4	17	36	47	9,9
1965	43,5	17	36	47	9,8
1966	52,4	17	36	47	9,7
1967	60,1	18	38	44	9,6
1968	66,1	18	38	44	9,5
1969	72,6	18	38	44	9,4
1970	84,2	18	38	44	9,3
1971	83,6	18	38	44	9,2
1972	100,2	20	39	41	9,1
1973	100,0	20	39	41	9,0
1974	110,0	20	39	41	8,9
1975	120,0	20	39	41	8,8
1976	100,0	20	39	41	8,7
1977	104,3	21	41	38	8,6
1978	101,6	21	41	38	8,5
1979	118,3	21	41	38	8,4
1980	116,0	21	41	38	8,3
1981	108,8	21	41	38	8,2
1982	99,0	23	42	35	8,1
1983	100,0	23	42	35	7,9

Год	Производство стали	Распределение железа готовой продукции между сферами потребления, %			Потери железа на интегрированных предприятиях, % от прихода
		Кратко- срочная	Средне- срочная	Долго- срочная	
1984	108,0	23	42	35	7,8
1985	104,0	23	42	35	7,7
1986	98,2	23	42	35	7,6
1987	96,4	24	44	32	7,5
1988	101,5	24	44	32	7,4
1989	108,7	24	44	32	7,3
1990	110,1	24	44	32	7,2
1991	104,4	24	44	32	7,1
1992	100,3	26	45	29	7,0
1993	98,8	26	45	29	6,9
1994	100,2	26	45	29	6,8
1995	100,4	26	45	29	6,7
1996	100,7	26	45	29	6,6
1997	100,9	28	46	26	6,5
1998	101,7	28	46	26	6,4
1999	104,3	28	46	26	6,3
2000	96,6	28	46	26	6,2
2001	102,8	28	46	26	6,1
2002	100,7	30	47	23	6,0
2003	102,5	30	47	23	6,0
2004	111,8	30	47	23	6,0
2005	112,7	30	48	22	6,0
2006	112,8	30	48	22	6,0
2007	114,5	30	49	23	6,0
2008	120,2	30	50	20	6,0

*Научное издание*

Черноусов Павел Иванович

# **РЕЦИКЛИНГ. ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

**Монография**

Редактор *Л.М. Цесарская*

Компьютерная верстка *И.В. Воловик*

---

Подписано в печать 18.01.11	Бумага офсетная	
Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Печать офсетная	Уч.-изд. л. 26,75
Рег. № 003-м	Тираж 300 экз.	Заказ 2952

---

Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Издательский Дом МИСиС,  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел. (495) 638-45-22

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел. (495) 236-76-17, тел./факс (495) 236-76-35