

Федеральное государственное автономное учреждение  
«Научно-исследовательский институт «Центр экологической  
промышленной политики»

На правах рукописи



**КУРОШЕВ ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫБОРА  
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ**

2.5.22. Управление качеством продукции.  
Стандартизация. Организация производства.

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор экономических наук  
**Скобелев Дмитрий Олегович**

Москва – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ .....	15
1.1 Современный уровень развития моделей организации ресурсоэффективных производств алюминия .....	15
1.2 Стандарты и нормативная правовая база управления ресурсной эффективностью производственных систем .....	25
1.3 Анализ проблем повышения ресурсной эффективности и уровня применяемых технологий производства алюминия .....	35
Выводы по первой главе.....	45
2 КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ПОДХОДОВ К СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫБОРА РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА .....	48
2.1 Направления совершенствования подходов к управлению ресурсной эффективностью производства на основе наилучших доступных технологий .....	48
2.2 Систематизация инструментов повышения ресурсной эффективности производства алюминия .....	58
2.3 Системотехнические принципы и подходы к оценке эффективности функционирования и качества организации производственных систем .....	69
Выводы по второй главе.....	80
3 ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ .....	83
3.1 Стандартизация системы показателей оценки уровня технической эффективности функционирования производства алюминия.....	83

3.2 Структурно-организационная модель повышения уровня организации производства алюминия .....	86
3.3 Алгоритм методики сравнительного анализа производств для целей внедрения ресурсоэффективных технологий с применением эксергетического анализа.....	92
Выводы по третьей главе.....	111
<b>4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ .....</b>	<b>113</b>
4.1 Комплексная оценка уровня организации производства первичного алюминия в России .....	113
4.2 Стандартизация уровня ресурсоэффективности технологий получения алюминия .....	126
4.3 Разработка программного комплекса поддержки управленческих решений «Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением эксергетического анализа».....	135
Выводы по четвёртой главе.....	142
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>144</b>
<b>СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>168</b>
Приложение А .....	169
Потоки веществ на выходе из различных производственных систем.....	169
Приложение Б .....	174
Эксергетический КПД и ключевые параметры ресурсной эффективности технологий производства алюминия.....	174

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ОА – обожжённый анод
- АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом
- АПГ – автоматическая подача глинозема
- БТ – боковой токоподвод
- ВТ – верхний токоподвод
- ГОУ – газоочистная установка
- ИП – интегральный показатель
- ИТС – информационно-технический справочник
- ИТС НДТ – информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям
- КПД – коэффициент полезного действия
- КЭР – комплексное экологическое разрешение
- НВОС – негативное воздействие на окружающую среду
- НДТ – наилучшая доступная технология
- ПГ – парниковые газы
- ППТ – передовые производственные технологии
- ПР – показатели ресурсной эффективности
- ПУ – показатели углеродоёмкости
- ППЭЭ – программа повышения экологической эффективности
- ТП – технологические показатели
- ТРГ – техническая рабочая группа
- ТЭПАЛ – программный комплекс поддержки управленческих решений «Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением эксергетического анализа»
- ЭкоСодерберг – экологический Содерберг
- CART (Classification and Regression Tree) – алгоритм построения бинарного дерева решений

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) – методология выявления критических шагов с целью управления качеством продукции

PDCA (Plan-Do-Check-Act) – цикл Деминга как метод непрерывного улучшения в управлении качеством

VSM (Value Stream Mapping) – метод визуализации процессов в виде карты потока создания ценности

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В современных условиях технологической модернизации промышленное производство ориентировано на внедрение современных технологических систем, способных обеспечивать высокую эффективность, сбережение ресурсов, повышение качества продукции и процессов. Металлургические производства имеют специфику организации и сопряжены с высокотемпературными процессами и неизбежными тепловыми потерями, что обуславливает существенное потребление энергии. Поэтому условием организации высокоэффективного металлургического производства является акцент на управление потреблением материальных, энергетических и топливных ресурсов. Важным сектором выступает производство алюминия, играющее ключевую роль в металлургии лёгких металлов и превалирующее место в структуре экспорта цветных металлов России (включая изделия из алюминия). Ожидается продолжение роста мирового потребления алюминия до 121 млн тонн в год к 2030 г. Прогноз роста потребления алюминия подкрепляется дополнительным спросом со стороны сектора зелёной экономики и энергетики.

Объём российского экспорта алюминия к 2030 г. планируется на уровне 3,1 млн тонн, что на 30 % превышает уровень 2021 г.<sup>1</sup>. Доля российской алюминиевой промышленности в ВВП оценивается в 1,5%, производство – 4,7-4,8 млн тонн в год, что актуализирует направление повышения ресурсной эффективности и зафиксировано в: Федеральном законе от 31.12.2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в РФ», Указе Президента РФ от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», Распоряжении Правительства РФ от 28.12.2022 г. № 4260-р «Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 года,

---

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 г. № 4260-р «О Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года»

Распоряжении Правительства РФ от 20.05.2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» и других нормативных правовых актах.

Мировая практика организации производственных систем показывает, что обеспечение условий для роста производительности и совершенствования качества продукции возможно при внедрении современных методов и новых подходов повышения ресурсной эффективности на основе наилучших доступных технологий (НДТ). По мере становления и модернизации концепции НДТ в Российской Федерации ресурсная эффективность технологий вышла на первый план и стала ключевой составляющей механизма организации производства<sup>2</sup>.

Согласно российскому законодательству, крупные промышленные предприятия должны подтверждать соответствие требованиям наилучших доступных технологий; вывод о соответствии зависит от результатов сравнительного анализа фактических показателей расхода ресурсов (ресурсоёмкости) и технологических показателей, достигнутых предприятием, и официально установленных показателей НДТ. В этой связи существует необходимость разработки организационно-технических решений по стандартизации процесса выбора ресурсоэффективных технологий производства алюминия, что свидетельствует об актуальности выбранной темы исследования.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Исследователи уделяют большое внимание вопросам ресурсной эффективности в отраслях промышленности. В металлургии особое значение придается использованию топливных и энергетических ресурсов, что определяет приоритетность вопросов формирования единых подходов,

---

<sup>2</sup> Перечень поручений по результатам проверки исполнения положений законодательства об обращении с отходами производства и потребления, отнесенными к III классу опасности» (утв. Президентом РФ 16.09.2020 № Пр-1489

стандартов и методик оценки и оптимизации расходования ресурсов в формате организационно-технических решений, в том числе в рамках перехода на НДТ.

Вопросы методологии повышения ресурсной эффективности для обеспечения устойчивого развития промышленных производств рассмотрены в трудах Бабушкина В. М., Васина С. А., Гусевой Т. В., Кудрявцевой С. С., Малышевой Т. В., Мешалкина В. П., Скобелева Д. О., Сопина В. Ф., Череповицына А. Е., Шинкевич М. В., Шинкевича А. И. Gauch H., Handoyo S., Li S., Morgado A.O., Punjwani A. Wen Y., Wu H., Zhang. S. и др.

Концептуальные основы и частные вопросы технической, энергетической и экологической эффективности металлургических и машиностроительных производств изучены в трудах Боброва А. Л., Васильева В. А., Гашо Е. Г., Дмитриева А.Н., Клентак А. С., Козловского В. Н., Кудрявского И. П., Скуратова, А. П., Черниковой О. П., Чеснокова Ю.А, Чёрного С. А., Щёлокова Я. М., Ярошенко Ю. Г., Alex T.C., Ali Z., Barati M., Esfahani S., Gharfalkar M., Hillier G., Kumar S., Mehta K.D., Sahoo D.P., Utigard T.A. и др.

Проблемы автоматизации, моделирования замкнутого цикла, оптимизации расхода ресурсов в производственных системах получения алюминия рассмотрены в трудах российских и зарубежных ученых, таких как Бунтин О. В., Борисоглебский Ю. В., Галевский Г. В., Кулагин Н. М., Минцис М. Я., Сиразутдинов Г.А., Поляков П. В., Серджель Т., Степанов С.В. Усанов В.И., Шестаков А. К., Aciu C., Berlec T., Bleischwitz R., El Mofid W., Fernandes A. M., Geng Y., Hao H., Ilu-Varvara, D.-A., Kwon, H.-K., Smagowicz J., Szwed T., Tang C., Tian X., Zhao G. и др.

Однако организация металлургических производств в контексте повышения ресурсной эффективности сдерживается рядом недостаточно исследованных областей и отсутствием организационно-технических решений, формирующих управлеченческие рекомендации в области реализации концепции наилучших доступных технологий.

**Цель диссертационного исследования** состоит в разработке организационно-технических решений по стандартизации процесса выбора ресурсоэффективных технологий производства алюминия.

Для достижения поставленной цели исследования в диссертации сформулированы четыре **ключевые задачи**:

1) предложить новый подход к организации процесса управления ресурсной эффективностью производства на основе наилучших доступных технологий;

2) разработать способ комплексной оценки технической эффективности металлургического производства с применением современных методов анализа уровня организации производства;

3) разработать систему принятия управленческих решений по стандартизированному выбору ресурсоэффективных технологий металлургического производства;

4) провести апробацию предложенных научно-технических решений по реализации разработанного способа анализа уровня организации производства алюминия.

**Объектом диссертационного исследования** выступают процессы организации производственных систем получения алюминия в Российской Федерации.

**Предметом исследования** является процесс стандартизации выбора ресурсоэффективных промышленных технологий производства алюминия.

#### **Соответствие содержания диссертации избранной специальности.**

Область диссертационного исследования соответствует научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в части пунктов: 2. Научно-практические основы технического регулирования, стандартизации, типизации, каталогизации, метрологического обеспечения, управления качеством и подтверждения соответствия; 18. Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности

функционирования и качества организации производственных систем;

25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

**Научная новизна** заключается в формировании организационно-технических инструментов управления ресурсной эффективностью функционирования производственных систем в металлургии.

1. *Предложена структурно-организационная модель повышения уровня организации производственной системы, отличающаяся от типовых моделей организации metallургического производства внедрением программно-целевой структуры управления ресурсной эффективностью, включением разработанного алгоритма последовательных действий по её реализации и использованием комплексного критерия ресурсной эффективности, что позволяет обеспечить интеграцию концепций всеобщего управления качеством и наилучших доступных технологий (п. 18 паспорта специальности 2.5.22)*

2. *Разработана система показателей комплексной оценки эффективности функционирования производственной системы, включающая три взаимосвязанных алгоритма и детализирующая степень преобразования ресурсов в готовый продукт, отличающаяся учётом особенностей процесса производства алюминия, обусловившего выбор эксергетического подхода к оценке, что позволяет стандартизировать нормы потребления производственных ресурсов и выявить приоритеты в управлении качеством производственных процессов (п. 2 паспорта специальности 2.5.22).*

3. *Разработан алгоритм принятия управленческих решений в области организации производства алюминия, отличающийся формализацией выбора ресурсоэффективных производственных процессов на основе интегрального показателя, позволяющего комплексно оценивать эффективность организации производственного процесса на технологическом уровне, что позволяет*

учитывать энергоёмкость производства и степень зрелости технологий (п. 25 паспорта специальности 2.5.22).

### **Методология и методы исследования**

При проведении исследования использованы теоретические положения в области организации производства, теории устойчивого развития, концепции наилучших доступных технологий, бережливого производства, всеобщего управления качеством, энергетического и экологического менеджмента, представленные в теоретических и прикладных исследованиях отечественных авторов.

Для обоснования выдвинутых в диссертации положений применены такие общенаучные методы исследования как системный подход, анализ и синтез, индукция и дедукция, аналогия; статистические методы, а также методы построения детерминированных и стохастических математических моделей производственных процессов.

**Информационную базу исследования составили** статистические данные, работы теоретического и эмпирического характера, включающие монографии, научные статьи, диссертации отечественных и зарубежных исследователей по проблематике диссертационной работы; нормативные правовые акты, документы профильных министерств и ведомств, национальные и межгосударственные стандарты, регламентирующие процессы ресурсной эффективности в российской экономике, в том числе в производстве алюминия (ГОСТ 30167–2014, ГОСТ Р 70089–2022, ГОСТ Р 113.00.12–2023, ГОСТ Р 56828.32–2017, ГОСТ Р 56828.14–2016, ГОСТ Р 56407–2023, ГОСТ 4784–2019, ГОСТ 11069–2019 и др.), база данных Российского Бюро наилучших доступных технологий, отчётность Объединенной Компании «РУСАЛ» и её структурных подразделений.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии подходов к определению уровня развития производственной технологии, разработке критериев системы оценки при выборе технологий в качестве наилучших доступных с учётом современных трендов промышленности, включая

направленность на повышение ресурсной (в том числе энергетической) эффективности, сокращение углеродоёмкости и др.

Обобщены результаты исследований и разработок, прослежены тенденции и закономерности, отражающие современный уровень организации процессов металлургических производств, описанные в отечественных и зарубежных научных публикациях и документах практической направленности. Доказаны положения, подтверждающие целесообразность использования эксергетического метода анализа для оценки расхода энергетических ресурсов и степени зрелости технологий.

**Практическая значимость исследования.** Реализация поставленной в диссертации цели привела к формированию комплекса научно-технических и организационно-управленческих результатов, имеющих значение для повышения ресурсоэффективности металлургических производств за счёт снижения энергоёмкости, сокращения негативного воздействия на окружающую среду и снижения углеродоёмкости производства продукции и, тем самым, обеспечения соответствия принципам устойчивого развития. Результаты диссертационного исследования имеют существенную практическую значимость для развития национальной системы стандартов в области НДТ, реализации проектов по модернизации металлургических производств в части выбора и перехода к применению ресурсоэффективных технологий, разработки и реализации программ повышения ресурсной и экологической эффективности.

По итогам проведённого исследования разработан и внедрён ряд моделей, алгоритмов, методик оценки уровня развития технологий получения алюминия, представлены рекомендации и предложения по дальнейшему совершенствованию процессов модернизации металлургических предприятий в части управления параметрами ресурсной эффективности и контроля выходных потоков на основе математических зависимостей и моделей.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Структурно-организационная модель повышения уровня организации металлургического производства.

2. Система показателей комплексной оценки технической эффективности производственных систем в промышленности.

3. Алгоритм принятия управленческих решений в области организации производства алюминия

### **Степень достоверности и апробация результатов исследования.**

Достоверность научных результатов подтверждается соответием их положениям фундаментальной научной литературы по организации производственных процессов. Полученные теоретические результаты построены на известных научных положениях: практические результаты достигнуты с применением признанных информационных технологий, а результаты работы согласуются с результатами внедрения на металлургических производствах.

Основные результаты диссертации доложены и представлены на следующих научно-практических конференциях: Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием «Проблемы развития современного общества» (Курск, 2026 г.); “Society, Science, Practice” (Москва-Бишкек, 2025 г.); «Тенденции развития логистики и управления цепями поставок в условиях цифровизации» (Казань, 2024 г.); «Образование и наука для устойчивого развития» (Москва, 2024 г.); «Трансформация экономических процессов в условиях больших вызовов» (Казань, 2023 г.); «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (Курск, 2022 г., 2023 г.); «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2022» (Апатиты, 2022 г.) и др.

**Результаты диссертационного исследования прошли апробацию** на предприятиях ОК РУСАЛ при решении задач по определению ресурсоэффективных технологий: использованы Техническим комитетом ТК

113 Росстандарта для разработки ГОСТ Р «Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по оценке эффективности внедрения наилучших доступных технологий и эффективности реализации проектов по модернизации промышленных объектов», ГОСТ Р «Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по определению технологических показателей»; при актуализации информационно-технических справочников по НДТ и определении технологий в качестве наилучших доступных (в частности, для производства первичного алюминия), что подтверждено справками о внедрении результатов диссертации.

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 23 научных работы общим объёмом 13,51 п. л. (в т.ч. лично автора – 9,87 п. л.), из них 8 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России – «Компетентность», «Стандарты и качество», «Качество и жизнь»; 2 статьи в журналах, индексируемых в международной базе Scopus («Цветные металлы», «Теоретическая и прикладная экология»), 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и электронного ресурса.

**Структура и объём работы.** Диссертационное исследование состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложений, содержит 33 рисунка и 26 таблиц. Список литературы насчитывает 178 источников. Общий объём диссертационной работы – 176 страниц.

# 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

## 1.1 Современный уровень развития моделей организации ресурсоэффективных производств алюминия

Сокращение расхода ресурсов в металлургических организациях и производстве машин и оборудования является основополагающей задачей техников и технологов – разработчиков, решение которой в значительной степени влияет на уровень конкурентоспособности конечной продукции. В области ресурсной эффективности производства машиностроения и обрабатывающих предприятий в целом в настоящем научном пространстве опубликовано множество работ, в том числе в части повышения ресурсоэффективности на основе совершенствования производственного менеджмента.

Обзор научной электронной библиотеки диссертаций и авторефератов, публикаций российского информационно-аналитического портала Elibrary.ru, международной базы междисциплинарного цифрового издательского института MDPI позволил исследовать массив работ в области повышения ресурсной эффективности и провести их анализ с позиции научной полемики.

Разработке стратегии повышения ресурсной эффективности для обеспечения устойчивого развития российской промышленности посвящено исследование Скобелева Д. О., в котором автор предлагает подходы к формированию современной промышленной политики, в рамках чего обоснована необходимость формулирования новых принципов, основанных на содействии устойчивому развитию, повышении ресурсной эффективности, построении экономики замкнутого цикла, учете фактора роста технологической сложности производственных цепочек [117,119]. Щелоков Я. М. и Лисиенко В. Г. посвятили несколько десятилетий исследованию направлений повышения ресурсной (прежде всего –

энергетической эффективности металлургических производств), а также современных систем управления и убедительно доказали, что высокую энергетическую эффективность технологий следует считать одним из ключевых показателей качества [110,147,146,48]. Однако взаимосвязь между наилучшими доступными технологиями и менеджментом качества эти исследователи не рассматривали.

Над стратегическими задачами совершенствования производства алюминия и повышением ресурсоэффективности технологий работает научная школа под руководством Полякова П. В., исследователи которой публикуют статьи в ведущих рецензируемых изданиях и получили десятки патентов в этой области [113,101,165]. Однако коллектив не фокусирует внимание на НДТ производства алюминия несмотря на то, что вопросы повышения экологической эффективности рассматриваются в ряде трудов обсуждаемой научной группы.

Скобелев Д. О. рассматривает ресурсную эффективность как фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень, способный дать новый импульс к развитию производства. В его работах приведены результаты критического анализа промышленной политики на примере нефтегазового, металлургического, горно-химического и других производств во взаимосвязи с переходом на наилучшие доступные технологии. При этом исследователь не рассматривает в своих трудах подходы к идентификации технологий в качестве наилучших доступных и не дает разъяснение процесса управления внедрением прогрессивных технологий [120,121].

Шмелевой Н. В. разработаны методологические положения и практические рекомендации в части приоритетов развития промышленных предприятий в рамках экосистемного взаимодействия. Автором предложена методика оценки устойчивости систем промышленных систем с использованием критерия энтропии, позволяющая повысить эффективность коллaborативных взаимоотношений для всех акторов цепочки создания

конечного продукта. Однако Шмелева Н. В. не показывает особенностей развития экосистемного взаимодействия в зависимости от специфики производства, уровня его прогрессивности и используемых технологий [144].

Интерес для темы диссертации представляет работа Чёрного С. А. под руководством Боброва А. Л. и Кудрявского И. П., в которой представлено исследование эффективности технологий переработки отходов металлургического производства, основанное на морфологическом синтезе и системе дополнительных критериев результативности рециклинга в металлургии. Применение результатов для разработки новой технологии утилизации отходов редкометалльного производства на Соликамском магниевом заводе позволило оптимизировать процесс переработки отходов и повысить ресурсную эффективность производства. При этом авторами не учтены факторы, влияющие на уровень развития наилучших технологий в металлургии по сравнению с известными концепциями [134].

Гашо Е. Г. разработана методология совершенствования промышленных теплоэнергетических систем; рассмотрены резервы повышения энергетической эффективности и экологической безопасности. Методология опирается на системный подход, сопоставление расчётных и фактических данных, статических и динамических параметров сложных распределенных систем. Предложены механизмы увязки программ энергосбережения, экологической безопасности и проектов внедрения наилучших доступных технологий. Разработаны рекомендации по определению и внедрению наилучших доступных технологий в энергоёмких отраслях промышленности [28].

Щелчковым К. А. под руководством Тихоновой И. О. предложены подходы к эколого-технологическому регулированию деятельности промышленных предприятий на протяжении их жизненного цикла. Автором для практического применения разработан алгоритм использования справочников по наилучшим доступным технологиям в процедурах оценки НВОС в части обоснования показателей повышения ресурсной эффективности

промышленных производств. Однако в целях исследования и, соответственно, в результатах работы отсутствуют подходы к сравнительному анализу ресурсной эффективности промышленных технологий, позволяющие оценить уровень технологического развития предприятий отрасли [148].

В развитие тематики ресурсной эффективности Шинкевичем А. И. разработана методология организации ресурсосберегающих производственных систем, где представляют интерес подходы к оптимизации ресурсосбережения в цепях поставок, при этом уровень замкнутости и «отходности» процессов рассматриваются как основной признак малоотходного производства. Шинкевичем А. И. реализованы ряд моделей, алгоритмов оценки уровня ресурсосбережения, разработаны научно обоснованные рекомендации по совершенствованию структуры ресурсосберегающих систем в условиях цифровизации производства [139,141,164,172].

Малышевой Т. В. с позиции ресурсной и технической эффективности разработан инструментарий и получена методика определения вероятного резерва ресурсосбережения в производствах и выделены критерии неэффективной организации основных и вспомогательных производственных процессов, приводящей к простоям оборудования, перерасходу и потерям ресурсов. Автором предложена методология организации ресурсосберегающих экологически безопасных производств, как система принципов и способов, содержащая научные основы, нормы, средства, методы, инструменты, временную структуру. Методология построена на принципах зелёной химии, законах организации производства, концепций инжиниринга и бережливого производства и иных теориях. При всём многообразии научно-практических результатов, в том числе с использованием отдельных положений концепции наилучших доступных технологий, в работе автора отсутствуют подходы к проведению экспертной оценки проектов технологического развития промышленных предприятий [85,86,88,162].

Научный вклад Кудрявцевой С. С. и Шинкевич М. В. в развитие новых подходов к организации ресурсосберегающих производственных систем заключается в разработке системы параметров и математических моделей, характеризующих ресурсоёмкость производства и логистических систем [61]; использовании экологического инжиниринга для решения проблем ресурсосбережения с использованием метода функционального моделирования для построения логико-информационной модели инжинирингового проекта, метода кластерного анализа для кластеризации производств по уровню отходоёмкости и результативности оборота отходов [87]; моделировании трендов и взаимосвязей в процессах внедрения экологических инноваций на предприятиях с выделением фактора энергосбережения как наиболее результативной инновацией [62].

Бабушкиным В. М. предложен подход к организации ресурсоэффективного производства, где повышение производительности рассматривается как результат реализации предиктивной модели аналитики данных и прогноза развития событий на каждом уровне планирования производственного процесса [7]. Автором также активно исследована сфера автоматизации технологической подготовки производства: методы и средства подготовки управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением [77].

Для повышения технической и ресурсной эффективности производства с позиции управления качеством продукции и сокращения брака Сопиным В. Ф. разработаны научные подходы к организации производства, в частности способ сокращения потерь на основе инструментов бережливого производства на примере Казанского завода точного машиностроения, метод оценки надежности поставщиков и тип входного контроля для исключения дефектов сырья на примере машиностроительного производства деталей автомобиля, статистические методы управления качеством продукции и процессов на производстве [124,125,126].

Smagowicz J., Szwed C., Berlec T. рассматривают задачу оптимизации ресурсов в дискретном производстве в металлообрабатывающей и полиграфической промышленности с использованием имитационного моделирования. Авторами представлен метод планирования ассортиментно-количественного производства, основанного на изучении используемых производственных технологий и построении имитационных и оптимизационных моделей процесса. Имитационные модели отражают технические аспекты производственного процесса и бизнес-требования. Оптимизационные модели предоставляют решения, которые позволяют сбалансировать выход продукции в соответствии с техническим условием расхода ресурсов и производственными графиками [175].

Предполагается, что методика позволит технологам принимать ресурсосберегающие решения (сырьё, вода, энергия) по реализации выбранных производственных планов с учетом текущих условий производства. Благодаря возможности анализа процесса без вмешательства в него, обеспечиваемой имитационным моделированием, метод практически исключает затраты и время, необходимые для подготовки к выполнению новых производственных заказов. Метод масштабируемый и может применяться к задачам различной сложности и производственным системам различных типов и размеров [175].

Способ организации ресурсосберегающего производства катодов литий-серных аккумуляторов методом композитной гальванопластики предложил El Mofid W. Автор разработал способ производства без добавок, где формование фольги токоприемника производится в одностадийном процессе, а активный материал вводится в металлическую матрицу посредством композитного покрытия. Сокращение технологических этапов, повышение производительности и ресурсосбережение производства в сочетании с потенциально более простым и высокоэффективным способом утилизации электродов являются перспективным подходом к организации производства. Морфологические и электрохимические характеристики,

соответственно, показывает существенную разницу с точки зрения распределения серы и морфологии поверхности, а также значительное улучшение скоростных характеристик [153].

Зарубежные исследователи Ilu-Varvara D.-A. и Aciu C. предложили рассматривать металлургические отходы как ресурс устойчивого развития сталелитейной промышленности. Снижение расхода ресурсов и устойчивое развитие сталелитейной промышленности авторы видят в рециклинге металлургических отходов. Методика организации производства замкнутого цикла основана на оценке химического и минералогического состава металлургических отходов с точки зрения сохранения металлов. Апробация методики показала, что оксид магния потенциально может использоваться в качестве дополнительного сырья в цементной промышленности. Присутствие таких оксидов, как  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составах образцов металлургических отходов указывает на то, что они потенциально могут быть использованы в качестве клинкерных материалов при производстве цемента. Содержание железа и марганца в металлургических отходах может быть повторно использовано в чёрной металлургии. Кроме того, авторами были проведены теоретические оценки потенциала извлечения металлов для шлаковых отвалов и оценён потенциал извлечения металлов из шлаковых отвалов: медь, ванадий, молибден и никель обладают высоким потенциалом извлечения [159].

Kwon H.-K. в целях сбережения ресурсов и энергии разработал способ проектирования макетов и литье алюминиевых сплавов под давлением с использованием САЕ-моделирования, поскольку в настоящее время в литейном производстве чугунные изделия заменяются алюминиевыми за счёт использования литья под высоким давлением. Разработка компоновки литейных форм, проектирование и изготовление макетов отливок производится с использованием технологий CAD/CAM/САЕ, где САЕ не только прогнозирует дефекты при массовом производстве, но и выполняет анализ заполнения пресс-форм перед производством, обеспечивая

оптимальные методы проектирования. Предлагаемые автором на основе научных расчётов и анализа решения с использованием технологии САЕ, позволяют минимизировать ресурсы и производственные затраты в целом при проектировании и изготовлении пресс-форм [160].

Fernandes A. с коллективом соавторов разработал научно-практический подход к производству первичного алюминия замкнутого цикла, заключающийся в использовании программных средств в процессе производства на основе нейронных сетей с использованием методов кластеризации. Замкнутое производство работает на основе компьютерного моделирования процесса без непосредственного воздействия на установку в целях снижения стоимости производства, уменьшения риска и временных затрат. Данную проблему авторы решают путём объединения числовых параметров, метода искусственных нейронных сетей и методов кластеризации для создания гибких датчиков оценки температуры, процентного содержания фторида алюминия в электролитической ванне и уровня металла в ячейках восстановления алюминия. Результаты демонстрируют эффективность предлагаемого подхода к гибким датчикам в алюминиевой промышленности, который может улучшить управление технологическим процессом и снизить расход ресурсов [154].

Металлургические производства являются важным объектом для внедрения методик оптимизации расхода ресурсов, как в части используемой технологии, так и в части системы управления качеством продукции и процессов. Внедрение наилучших доступных технологий в машиностроение позволит запустить процессы ресурсосбережения как основу обеспечения роста промышленного производства и его рентабельности. В свою очередь, ресурсосберегающие технологии невозможны без использования для сложных промышленных процессов математического моделирования. По мере научного совершенствования методов идентификации задача моделирования решается более просто, но сложность выполнения динамического моделирования нелинейных процессов остается.

Процесс моделирования и идентификации динамических нелинейных систем значительно продвинулся вперед благодаря использованию искусственного интеллекта и методов машинного обучения, которые применялись в последние несколько десятилетий с высокой результативностью [152,157,166]. Ввиду сложности процесса производства первичного алюминия зачастую для моделирования процессов используют искусственные нейронные сети. Более того, поскольку электролитический процесс восстановления окисленного оксида алюминия является очень агрессивным, невозможно проводить измерения температуры в режиме реального времени, так как химическая ванна приводит в негодность термопару.

Зарубежные исследования в сфере повышения эффективности алюминиевого производства в процессе выплавки алюминия показывают хорошую результативность моделирования процессов при использовании нейросетей. В производстве алюминия параллельно функционирует множество технических ёмкостей, что способствует усложнению процесса в целом и часто требует вмешательства человека. Нейронное моделирование применяют в рамках одного из следующих подходов [132,154]:

- для всех электролизных ёмкостей, что позволяет получать не всегда удовлетворительные результаты, поскольку нейросети сложно уловить различия в поведении всех ёмкостей;
- для каждой ёмкости, что может быть также сложным в применении, поскольку необходимо обучить и настроить большое количество нейросетей;
- для конкретного комплекса ёмкостей обучают и моделируют одну нейросеть, что дает удовлетворительные результаты и высокое качество модели нейросети, т.к. ёмкости демонстрируют схожее поведение.

Значительный вклад научной школы Полякова П. В. в развитие производства алюминия связан, прежде всего, с разработкой и внедрением высокоэффективных анодных масс и технологий их приготовления для алюминиевых электролизёров, что позволило существенно повысить

стабильность и энергоэффективность процесса электролиза, снизить удельный расход углеродных материалов и выбросы вредных веществ, а также увеличить срок службы анодов, что в совокупности дало значительный экономический и экологический эффект для алюминиевой промышленности [60,113,114]. Поляков П. В. и его научная школа создали фундаментальную основу повышения ресурсоэффективности производства, которой, однако, не достает масштаба системной, сквозной оптимизации всего жизненного цикла алюминия.

Научно обоснованный подход к определению необходимого объема контрольных операций, используя инструменты статистического управления качеством (статистические методы) предлагают в своей научной работе Васин С. А., Маликов А. А., Никольский С. М. [19]. Это позволяет предприятиям, в частности в черной металлургии, находить баланс между надежностью проверки продукции и экономической эффективностью, избегая как избыточного, так и недостаточного контроля.

Таким образом, проанализированные публикации и разработки отечественных и зарубежных исследователей содержат интересные с научной и практической точек зрения материалы для развития ресурсоэффективных производственных систем, формирования новых подходов к организации производства и управления качеством продукции в циклах минимизации потерь энергии, сырья и материалов. Обзор научной литературы позволил сделать выводы о необходимости развития темы ресурсной эффективности в части:

- разработки концепции повышения ресурсной эффективности производства в проекции концепции всеобщего управления качеством с учетом соответствия наилучшим доступным технологиям и специфики металлургических предприятий;
- исследования возможности упрощения процедуры экспертизы проектов технологического развития предприятий на основе разработки

алгоритмов с использованием специального математического аппарата и методов интеллектуального анализа данных;

– исследования тенденций и выделения маркеров, в наибольшей степени оказывающих влияние на уровень положительного или отрицательного процесса внедрения наилучших доступных технологий в металлургии;

– возможности разработки оптимального набора критериев системы оценки при выборе технологий в качестве наилучших доступных, учитывая при этом современные тренды развития промышленности, такие как углеродное регулирование, производство алюминия полного цикла и другие.

## 1.2 Стандарты и нормативная правовая база управления ресурсной эффективностью производственных систем

В настоящее время промышленные предприятия все больше ориентируются на устойчивые ресурсосберегающие методы ведения бизнеса. Основные положения и рекомендации по организации ресурсоэффективных производственных систем определены в законодательных и нормативных требованиях, национальных и международных стандартах, а также получили отражение в ожиданиях отечественного и международных рынков. Инженеры-технологи и менеджеры должны учитывать аспекты повышения ресурсной (в том числе энергетической) эффективности, требования сокращения негативного воздействия на окружающую среду и минимизации отходов, а также снижения углеродоёмкости продукции [142].

В ряде научных работ Клентак А. С. со соавторами рассматривается один из ключевых аспектов эффективности промышленного предприятия – энергопотери. Авторы фокусируются на оценке потерь именно тепловой энергии, что является критически важным для энергоемких производств. Исследование направлено на разработку методологии выявления и

количественной оценки этих потерь, что служит основой для последующего внедрения энергосберегающих мероприятий и повышения общей экономической результативности предприятия. Также в своих исследованиях они затрагивают CORE-процессы системы менеджмента качества. Авторы исследуют требования СМК к производственным процессам и предлагают пути их совершенствования, цель которых модернизация нормативной и методической базы, регламентирующей производство, для достижения более стабильного качества продукции, повышения управляемости процессов и соответствия современным стандартам [57,4].

Международный опыт свидетельствует о том, что относительно невысокая «цена углерода» (стоимость выбросов парниковых газов) приводила в течение некоторого времени к тому, что многие промышленные предприятия предпочитали оплачивать эти расходы, а не инвестировать в совершенствование технологий и производственных процессов. Однако значительные изменения в глобальной климатической повестке, наряду с повышением «цены углерода» и активизацией различных схем торговли выбросами парниковых газов и ужесточением квот, формированием пограничных корректирующих механизмов (Carbon Border Adjustment Mechanism, СВАМ) и др. способствуют изменению позиции предприятий. В текущей законодательной среде промышленные предприятия отдают приоритет модернизации технологий для повышения ресурсной эффективности и как следствие сокращения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, что может значительно изменить модели эффективности и прибыльности производства [11,8,9,102].

Сектор промышленных процессов в мировой экономике признан вторым по величине источником выбросов CO<sub>2</sub> после сектора энергетики [128]. Правовая основа ограничения выбросов парниковых газов и развития ресурсосберегающих производств заложена в Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), Киотском протоколе и Парижском соглашении 2015 г. [81]. В настоящее время

ведутся дискуссии о том, как повысить действенность международных соглашений.

Отражение цели достижения нулевых выбросов CO<sub>2</sub> к 2050 г., принятой на международном уровне, в существующую систему производственного планирования и контроля в секторе производства алюминия требует подхода, который органично интегрируется с целями индустрии 4.0. Это заключается не только в оптимизации организации производства для минимизации затрат, но и во внедрении устойчивых методов сокращения углеродоёмкости в основу моделей производственных затрат на основе концепции наилучших доступных технологий. Развитие устойчивых методов сокращения выбросов CO<sub>2</sub> промышленными производствами также заключается в следующих возможных проектах:

- переход на возобновляемые источники энергии, что позволит снизить зависимость от ископаемого топлива и уменьшит углеродный след производственных операций;
- использование технологий индустрии 4.0, таких как Интернет вещей (IoT) и искусственный интеллект (ИИ), что может улучшить управление энергопотреблением, сделав его более эффективным;
- минимизация отходов и развитие вторичного использования материалов, снижения спроса на сырьё путём внедрения принципов экономики замкнутого цикла.

В комплексе все вышеперечисленные проекты позволят ускорить развитие производства с точки зрения технологических инноваций, ресурсной эффективности, обеспечат переход к устойчивым производственным практикам, которые имеют решающее значение для достижения нулевого уровня выбросов углерода к 2050 г.

Несмотря на волатильность «цены углерода», можно говорить о постепенном её повышении одновременно с развитием и совершенствованием механизмов стимулирования сокращения углеродоёмкости производств и продукции [165,120,121,122].

На рисунке 1.2.1 на основе изучения портала правовой информации России структурирована база нормативных правовых документов РФ в сфере наилучших доступных технологий и повышения ресурсной эффективности промышленных производств [55,53].

Изучение каталога национальных стандартов позволило выделить основные национальные и межгосударственные стандарты, регламентирующие процессы ресурсной эффективности в российской экономике, в том числе в производстве алюминия:

- ГОСТ 30167–2014 Ресурсосбережение. Порядок установления показателей ресурсосбережения в документации на продукцию [30];
- ГОСТ Р 70089–2022 Ресурсосбережение. Общие подходы к реализации принципов экономики замкнутого цикла на предприятиях [40];
- серия стандартов по наилучшим доступным технологиям (ГОСТ Р 113.00);
- ГОСТ Р 56407–2023 Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения [38];
- ГОСТ Р 54531–2011 Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии [37];
- ГОСТ 4784–2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки [31];
- ГОСТ 11069–2019 Алюминий первичный. Марки [29].

Нормативная правовая база РФ в сфере наилучших доступных технологий, ресурсной эффективности промышленных производств

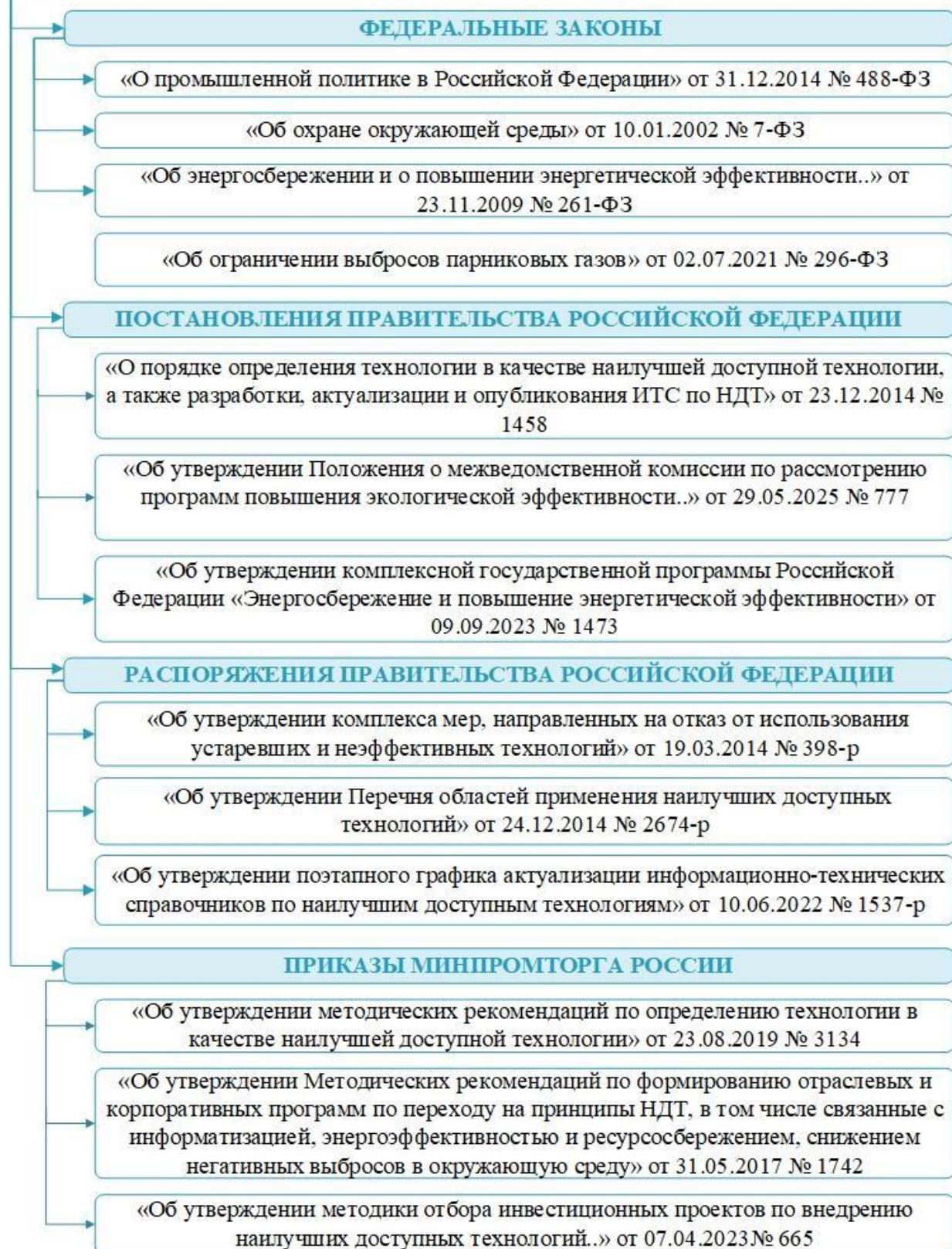


Рисунок 1.2.1 – Нормативная правовая база РФ в сфере наилучших доступных технологий и ресурсной эффективности промышленных производств (составлено автором по [94,95])

Основными требованиями ресурсосбережения, согласно ГОСТ 30167–2014 [30], являются требования к ресурсоёмкости, ресурсоэкономичности и утилизируемости. Расход материальных ресурсов при производстве продукции и возможные потери (отходы) определены требованиями ресурсоёмкости. В стандарте оговорено, что объектами стандартизации требований ресурсосбережения являются все виды деятельности: добыча, переработка, транспортирование, хранение, распределение, потребление материальных ресурсов и т.д.

Новым стандартом в части ресурсосбережения является ГОСТ Р 70089–2022 [40], где описана специфика взаимосвязи экономики замкнутого цикла со стратегией ресурсосбережения и бережливого производства. Это общие положения и подходы к организации замкнутых систем в различных секторах и их применение. ГОСТ Р 54531–2011 [37] в качестве альтернативных источников энергии определяет в том числе и возобновляемые и невозобновляемые источники, использование энергии которых приобретает хозяйственную значимость.

Усовершенствованный обобщающий регламент по бережливому производству (ГОСТ Р 56407–2023) [38] разработан для применения в организациях, ориентированных на повышение эффективности производства на основе инструментов и методов бережливого производства. Стандарт ориентирован на такие параметры производства, как безопасность, качество продукции, время производственного цикла, потери в процессах, которые могут быть устранины или минимизированы.

Серия стандартов по наилучшим доступным технологиям (НДТ) активно развивается в течение последних 10–15 лет [51]. Кроме национальных стандартов, следует отметить особые документы по стандартизации – информационно-технические справочники (ИТС), которые содержат описание производственных процессов, технологического оборудования, подходы к проведению сравнительного анализа ресурсоэффективности и определению НДТ, информацию о потреблении ресурсов и эмиссиях [115].

Стандарты в сфере производства алюминия (классификация, состав, марки, методы контроля качества и др.) представлены двумя базовыми документами – ГОСТ 4784–2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки» [31] и ГОСТ 11069–2019 «Алюминий первичный. Марки». Наилучшее доступные технологии в производстве алюминия представлены в ИТС 11–2022 «Производство алюминия» [54]. В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 10.06.2022 г. № 1537-р актуализация данного справочника запланирована на 2026 г.

Полагаем, что серия стандартов в области повышения ресурсной и технической эффективности, а также непосредственно в части внедрения наилучших доступных технологий может быть дополнена системой рекомендаций по управлению ресурсной эффективностью с применением системы показателей наилучших доступных технологий, при разработке которых целесообразна диагностика параметров процессов преобразования энергии в производстве.

На рисунке 1.2.2 структурирована система основных национальных и межгосударственных стандартов, регламентирующих процессы повышения ресурсной эффективности, в том числе в производстве алюминия. В целом система включает четыре блока стандартов: ресурсосбережение, включая материало- и энергосбережение; наилучшие доступные технологии, направленные на повышение ресурсной эффективности; инструменты бережливого производства для сокращения потерь; правила и рекомендации в производстве алюминия.

Основные национальные и межгосударственные стандарты, регламентирующие процессы ресурсной эффективности, в том числе в производстве алюминия



Рисунок 1.2.2 – Основные национальные и межгосударственные стандарты, регламентирующие процессы повышения ресурсной эффективности, в том числе в производстве алюминия (составлено автором)

Важным стандартом для исследуемой темы является ГОСТ Р 56828.32–2017 «Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Методологии идентификации» [39]. В данном документе предметом стандартизации является ресурсосбережение, а аспектом стандартизации является взаимоувязанный комплекс методологий идентификации и оценки наилучших доступных технологий. Стандарт описывает механизм оценки технологий и определение на её основе наилучших доступных технологий для производственной деятельности.

Следует отметить также важность методологии PDCA (планирование – осуществление – проверка – действие) для минимизации образования брака и снижения расхода ресурсов в результате нестабильности технологических процессов в металлургической промышленности. Данный подход описан в стандарте ГОСТ Р 53647.3–2015 «Менеджмент непрерывности бизнеса» [36].

PDCA предполагает статистические и организационные инструменты для повышения производительности процессов. За этапом «Планирование» (Plan) следует этап «Реализация» (Do) запланированных действий с последующей всесторонней оценкой результатов на этапе «Проверка» (Check). Если результаты окажутся удовлетворительными, то этап «Действие» (Act) проводится под непрерывным контролем изменений в ходе процесса с постоянным акцентом на дальнейшую их корректировку. Цикл PDCA является ценным инструментом для контроля ресурсной эффективности металлургической промышленности, где системный подход очень важен для достижения высокой результативности.

PDCA показывает высокую синергию с различными инструментами, разработанными для совершенствования производственного процесса. Адаптируемый характер PDCA позволяет функционировать в качестве базовой основы и дополнять другие подходы в рамках гибридных моделей [167]:

- сокращение отходов и потерь ресурсов: применение PDCA совместно с матрицей SIPOC (поставщики, входные данные, процессы, выходные

данные, потребители), контролем производственных графиков и визуальным управлением производства в машиностроении;

- оптимизация производственных процессов: применение PDCA совместно с 5С и другими инструментами бережливого производства на производстве, что приводит к сокращению времени производственного цикла, снижению материальных затрат и повышению прибыльности;
- экологический менеджмент: применение PDCA совместно с методом VSM (картирование потока создания ценности), а также с использованием метода Кайдзен для сокращения материальных отходов;
- энергетический менеджмент: применение PDCA предполагает аудит энергопотребления, разработку и реализацию программ повышения энергоэффективности;
- сокращение брака и дефектов продукции: использование цикла PDCA в качестве инструмента совершенствования в организациях в сочетании с базовыми статистическими инструментами контроля качества, контролем процесса FMEA (анализ видов и последствий потенциальных отказов (дефектов)).

Таким образом, обзор действующих межгосударственных и национальных стандартов показал значительный охват инженерных инструментов, методов, алгоритмов организации ресурсосберегающего производства. Вместе с тем, на наш взгляд, серия стандартов в области повышения ресурсной и технической эффективности, а также непосредственно в части внедрения НДТ может быть дополнена системой рекомендаций по управлению ресурсной эффективностью с применением системы показателей наилучших доступных технологий и термодинамического анализа. Проблема разработки параметров, оценивающих «потенциал полезной работы», является задачей настоящего диссертационного исследования для количественной оценки качества энергии в производственных процессах и её потенциала для выполнения полезной работы.

### 1.3 Анализ проблем повышения ресурсной эффективности и уровня применяемых технологий производства алюминия

Производственный процесс на металлургических предприятиях достаточно сложен и требует четкой координации между различными технологическими операциями и подразделениями. Повышение эффективности производственного цикла металлургических предприятий является важной проблемой отрасли и требует решения задач совершенствования планирования производства, выстраивания межструктурной координации, оптимизации цепей поставок, внедрения передовых технологий в производственный процесс. Перечисленные направления позволяют снизить производственные затраты, увеличить эффективность и производительность, сократить длительность цикла производства, повысить качество продукции и минимизировать потери ресурсов.

В ряде случаев на металлургических предприятиях всё ещё можно встретить устаревшие технологии и способы организации производства, что не может не приводить к чрезмерно высокой энергоёмкости процессов и создаёт риски для безопасности. Кроме того, существуют проблемы интеграции материальных потоков и планирования рабочего процесса, что также приводит к перерасходу ресурсов и дополнительным затратам без добавления стоимости, т.е. к низкой эффективности процесса производства. Разбалансированность производственных линий может быть также обусловлена отсутствием чётких стандартов в построении методов работы, спецификации инструментов и технологий [43].

Помимо внутренних проблем, металлургические предприятия вынуждены учитывать изменения, происходящие во внешней среде, в том числе – изменения в законодательстве, в требованиях внутреннего и международных рынков. Подчеркнём: на международных рынках все большее внимание уделяется углеродоёмкости как ключевому показателю качества

металлургической продукции: чем ниже этот показатель, тем больше востребованность продукции. В частности, это обстоятельство стало одной из причин, побудивших производителей алюминия создать бренд ALLOW, характеризующийся существенно более низким углеродным следом, чем в мире в среднем. В свою очередь, в связи с сокращением импорта промышленного оборудования растёт спрос отечественных машиностроительных предприятий испытывают на сырьевые ресурсы – металлы в первичных формах, что ещё более актуализирует вопросы повышения ресурсоэффективности металлургических производств и оптимизации производственных циклов.

В мировой практике активно исследуются различные формы организации производства для выявления и решения проблем, связанных с необходимостью повышения эффективности производства. Многие исследователи выделяют интеграцию систем менеджмента, таких как всеобщее управление качеством, бережливое производство, системы энергетического менеджмента в качестве решения проблем неэффективных производственных процессов металлургической отрасли [2,161]. Специальный критерий для оценки целесообразности и величины снижения запасов выпуска изделий разработан Гречниковым Ф. В., Кобенко А. В. [42]. Данные исследования позволяют принимать обоснованные решения по сокращению «замороженных» средств в оборотных активах, ускорению оборачиваемости и повышению гибкости производства без риска срывов выпуска продукции. Вместе с тем результаты исследований показывают, что применение принципов бережливого производства может в ряде случаев приводить к увеличению сроков выполнения заказа [169].

Несмотря на внедрение современных систем менеджмента, в различных производственных секторах металлургии сохраняются проблемы их адаптации в условиях применения существующих технологий и традиционных форм организации производства. Следовательно, возникает необходимость пересмотра и определения наиболее эффективных технологий

производства и рациональных методов управления, которые могут оптимизировать производственный цикл.

Планирование сроков и стоимости реализации проектов по модернизации производственных технологий представляет собой ещё два метода бережливого производства, которые минимизируют потери за счёт сокращения времени выполнения заказа инженером и оценки эффекта от перспективных технологий. В концепции бережливого производства индикатор бережливости или показатель эффективности выполнения задач производства может способствовать инженеру-аналитику в определении временных ресурсов на производственную операцию и выявлении скрытых (нерезультативных) потерь, затрачиваемых на ручную сборку.

Полагаем, что интеграция эффективных систем управления, использование передовых технологий и внедрение устойчивых практик являются ключевыми стратегиями повышения эффективности производственного процесса. Вместе с тем, необходимы дальнейшие глубокие исследования практической реализации вышеперечисленных стратегий на примере производственной деятельности российских металлургических производств с условием возможности масштабирования предлагаемых решений.

За период с 2015 г. по данным Росстата индекс промышленного производства металлургических предприятий, характеризующий изменение масштабов производства, имеет нестабильную динамику (рисунок 1.2.1).

По металлургическому производству наблюдаются точки отрицательной динамики, а максимальный прирост производства в 5,2% наблюдался в 2017 г. Предприятия по производству готовых изделий из металла показывают более позитивную динамику без снижения объёмов выпуска продукции, а пиковые значения в 2016 и 2023 гг. превышают 127 %.

В целом, линии тренда (линейная аппроксимация) по предприятиям металлургии имеют положительный угол наклона, что означает рост производства в 2015–2024 гг. Динамика развития металлургических

производств несколько отстает от динамики развития производств готовых металлических изделий, что обосновывается коэффициентами регрессии в уравнениях аппроксимации:  $y = 1,3088x + 106,53$  для производств изделий из металла ( $\beta = 1,31$ ) и  $y = 0,26x + 99,4$  для металлургических производств ( $\beta = 0,26$ ). Причём прогнозирование объёмов производства на 2026–2027 гг. показывает, что отставание будет увеличиваться, если в секторе производства металлов не произойдет организационных, технологических или иных изменений.



Рисунок 1.3.1 – Динамика индекса производства предприятий металлургии и производства металлических изделий, в % к предыдущему году (составлено автором по [150])

В 2024 г. российскими металлургическими организациями самостоятельно разработано или приобретено у разработчиков 490 передовых производственных технологий, представляющих собой «...однородный набор технических приемов (серии манипуляций или комплекса операций),

предназначенных для выполнения одной или нескольких производственных функций» [99]. В своем большинстве своём передовые производственные технологии направлены на внедрение цифровых инструментов для автоматизации производства или управления процессами с помощью компьютера. Интеграция цифровых технологий в практику управления качеством является объектом ряда исследований Васильева В. А., Александрова С. В. и др. Авторы анализируют, как такие инструменты, как большие данные, IoT, AI и цифровые двойники, трансформируют традиционные подходы к контролю, анализу несоответствий и прогнозированию качества, делая эти процессы более точными, оперативными и предиктивными. Ими также исследуются потенциальные возможности и конкретные пути трансформации СМК под воздействием цифровых решений, что может привести к повышению ее гибкости, интегрированности с другими бизнес-системами и общей эффективности как инструмента стратегического управления [18,1]. Ещё одну теоретическую разработку в области Industry 4.0 – концептуальную модель киберфизической системы – представляют авторы в исследовании под руководством Антиповой О. И. [5]. Такая система предполагает глубокую интеграцию физических производственных активов с цифровыми вычислениями и сетями в режиме реального времени. Модель служит основой для создания интеллектуальных самоуправляемых производственных комплексов, где управление качеством становится неотъемлемой частью технологического цикла.

На рисунке 1.3.2 представлена статистика количества разработанных и приобретённых производственных технологий, а также рассчитано их соотношение. Из графика исключен 2011 г., показывающий по официальным данным 12544 технологии, полученные предприятиями от разработчиков или иных организаций: требует пояснения многократное увеличение числа технологий и их разнообразия.

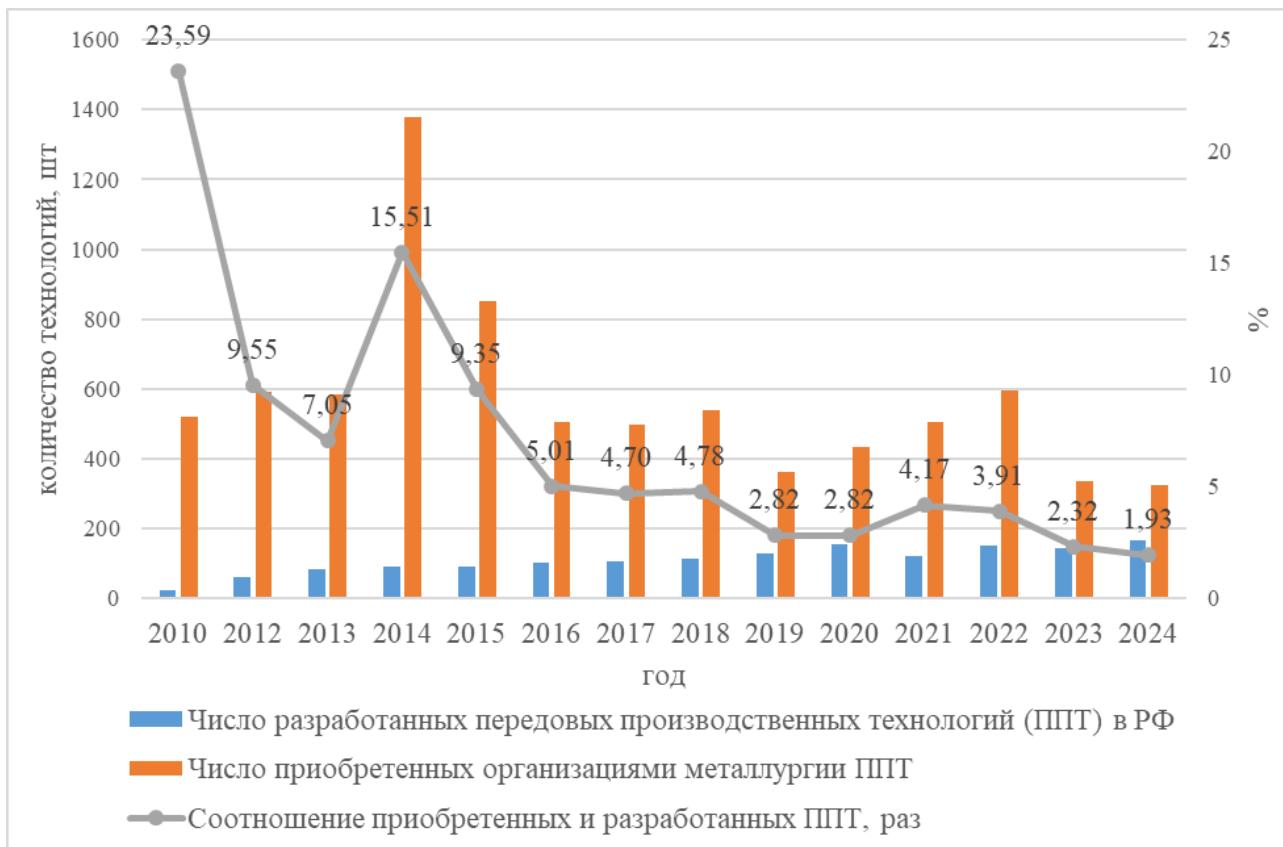


Рисунок 1.3.2 – Передовые производственные технологии для металлургических предприятий: разработанные и приобретённые организациями (составлено автором по [129])

Можно наблюдать увеличение числа разработанных технологий с 2010 г. по 2024 г. и некоторое снижение приобретённых способов производства за данный период, что вероятно, обусловлено расширением спектра отечественных разработок и сокращением импорта технологий. Анализ используемых передовых технологий предприятиями металлургии показывает значение числа технологий более 15 тысяч в 2023 г. при стабильной положительной динамике, поскольку данные имеют накопительный характер.

Внедрённые в производственную эксплуатацию технологии, результатом которых является выпуск продукции, имеют прирост внедренных технологий в 2024 г. (+215). Число разработанных и приобретённых технологий (490 в 2024 г.) незначительно увеличилось. Вероятно, это обусловлено временным лагом, требуемым для подготовки новой

технологической линии к эксплуатации, донастройкой или адаптацией технологии к условиям действующего производства и др.

Таблица 1.3.1 – Используемые передовые производственные технологии (ППТ) металлургическими предприятиями, единиц (составлено автором по [129])

Год ППТ	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2021	2022	2023	2024
Число используемых (внедрённых) ППТ	9025	9529	10967	14972	14474	12842	13010	14466	15043	15258
Число разработанных ППТ (новых для России)	22	62	89	101	113	154	121	152	144	167
Число приобретённых предприятиями ППТ	519	592	1380	506	540	434	505	594	334	322

Помимо цифровой производственной технологии для автоматизации процессов и повышения уровня организации производства, которые конечно же оказывают влияние на ресурсную и техническую эффективность, важны также технологии, направленные на снижение расхода ресурсов и минимизацию отходов. Анализ эффективности управления материальными потоками и производственной деятельностью позволяет выявлять узкие места, требующие модернизации технологий для оптимизации рабочего процесса.

Металлургические предприятия осуществляют внедрение технологических и ресурсно-экологических инноваций, обеспечивающих в процессе производства:

- сокращение удельных материальных затрат на производство продукции;

- сокращение удельных энергетических затрат на производство продукции;
- сокращение углеродоёмкости продукции;
- замену сырья и материалов на безопасные или менее опасные материалы;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду (сокращение выбросов загрязняющих веществ в воздух, их сбросов в водные объекты);
- минимизацию отходов, осуществление их переработки и обеспечение рецикла.

На рисунке 1.3.3 представлена структура внедрения технологий предприятиями metallurgии, направленных на повышение ресурсной эффективности и экологической безопасности.

Изучение опыта предприятий, внедряющих новые технологии, позволяет получить информацию о том, какой результат ожидается или уже достигнут при эксплуатации нового способа производства продукции. Подчеркнём, что внедрение одной и той же современной (или инновационной) технологии может способствовать как сократить расход сырья, материалов, топлива, энергии за счёт принципиально новых решений, так и улучшить показатели экологической эффективности производства.

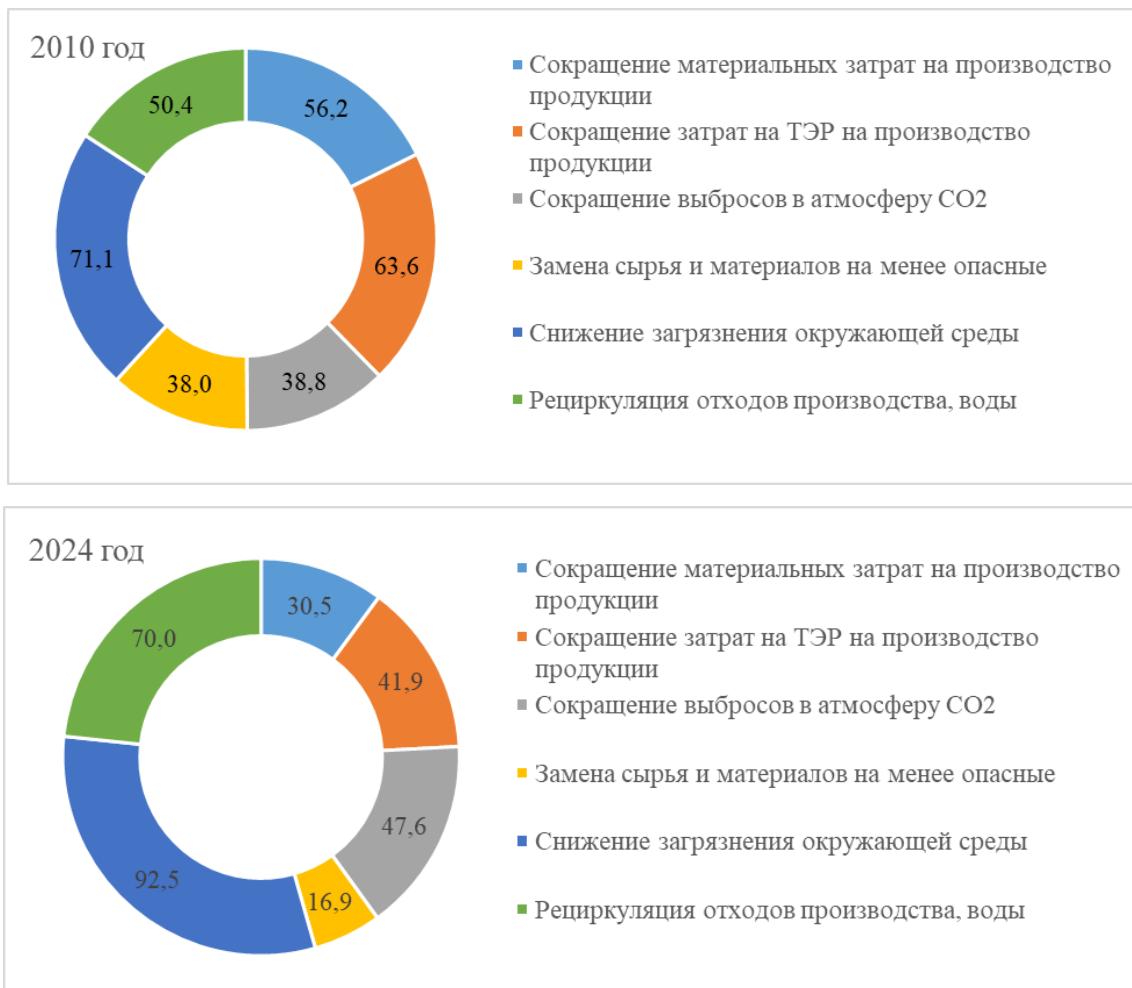


Рисунок 1.3.3 – Структура технологий в металлургии, направленных на повышение ресурсной эффективности и экологической безопасности: доля организаций, внедряющих технологии (в % от числа организаций, осуществлявших инновации) (составлено автором по [129])

В порядке сравнения исследованы данные деятельности предприятий металлургии в 2010 г. и 2024 г.: можно наблюдать единое наиболее приоритетное воздействие технологии – снижение загрязнения окружающей среды (92,5% предприятий в 2024 году и 71% в 2010 г.). В 2024 г. возросло число производств, где внедряемые технологии ориентированы на изменение углеродоёмкости производства: 47,6% в 2024 году против 38,8% в 2010 г. С развитием технологий также возрастает значение рецикла отходов производства и иных производственных ресурсов: 70 % в 2024 г. против 50% в 2010 г.



Рисунок 1.3.4 – Затраты металлургических предприятий, связанные с внедрением технологий, направленных на повышение ресурсной и экологической эффективности производства (составлено автором по [129])

Вместе с тем существенные изменения наблюдаются в целях внедрения технологий – сокращению удельных материальных затрат и топливно-энергетических ресурсов в ряде случаев уделяется меньшее, «вторичное» внимание. Возможно, политический акцент на достижение углеродной нейтральности оказывает влияние на приоритетные цели промышленных предприятий.

Тем не менее, полагаем, что в настоящее время важны новые технологии, позволяющие одновременно обеспечивать повышение ресурсной эффективности и снижение углеродоёмкости производства. Таковыми в большинстве своём являются наилучшие доступные технологии, представляющие собой способы и методы производства, соответствующие лучшим практикам и достижениям науки и техники.

На рисунке 1.2.4 показаны удельные затраты российских металлургических предприятий, связанные с внедрением технологий, направленных на повышение ресурсной и экологической эффективности производства. Вполне объяснимо снижение уровня расходов предприятий на

внедрение технологий с 2021 г. – в период COVID-19 и в период изменения условий и требований к производственной деятельности с 2022 г. Как можно видеть, до 2021 г. каждое металлургическое предприятие ежегодно направляло на эколого-технологическую модернизацию от 75 до 280 млн рублей.

Таким образом, при выборе технологий, направленных на повышение ресурсной эффективности металлургических предприятий, необходимо в качестве основного механизма использовать переход на наилучшие доступные технологии (и требования последовательного отказа от устаревших технологий и оборудования), которые охватывают все этапы жизненного цикла производства.

### Выводы по первой главе

1. Проведённый обзор электронной библиотеки диссертаций, публикаций российского портала Elibrary.ru, международных баз Academia, Research Gate, MDPI и др. позволил сделать вывод о необходимости развития тематики повышения ресурсной эффективности производства в проекции концепции всеобщего управления качеством с учетом соответствия наилучшим доступным технологиям и специфики металлургических предприятий.

2. Установлено, что современные модели организации ресурсоэффективных металлургических производств не в полной мере описывают процедуру определения уровня развития производственной технологии и не учитывают возможность разработки оптимального набора критериев системы оценки при выборе технологий в качестве наилучших доступных, учитывая при этом современные тренды промышленности.

3. Определено приоритетное направление совершенствования моделей организации металлургического производства, требующее исследования тенденций и выявления ключевых параметров, в наибольшей степени

оказывающих влияющие на уровень положительного или отрицательного процесса внедрения наилучших доступных технологий в металлургии.

4. Обосновано, что для целей повышения уровня ресурсной и технической эффективности металлургических производств в условиях реализации требований российского законодательства о переходе на наилучшие доступные технологии необходимо рассмотреть возможности дополнения процедуры экспертной оценки проектов технологического развития предприятий на основе разработки алгоритмов оценки ключевых параметров технологий.

5. Структурирована база нормативных правовых документов РФ в области ресурсной и технической эффективности промышленных производств, являющаяся основой для разработки стандартов по наилучшим доступным технологиям, устанавливающая правила функционирования промышленных предприятий для повышения ресурсной и экологической эффективности производства.

6. Систематизированы основные национальные и межгосударственные стандарты, в области повышения ресурсной эффективности, в том числе в производстве алюминия. Выделено четыре блока стандартов в сфере ресурсосбережения, материально- и энергосбережения, наилучших доступных технологий, бережливого производства, производства алюминия, каждый из которых описывает технологические, технические и управленические инструменты, методы, алгоритмы развития ресурсоэффективных производственных систем.

7. Предложено дополнить стандарты в области ресурсной и технической эффективности, а также непосредственно в части внедрения наилучших доступных технологий, системой рекомендаций по управлению ресурсной эффективностью с применением показателей наилучших доступных технологий и термодинамического анализа для количественной оценки качества энергии в производственных процессах и её потенциала для выполнения полезной работы.

8. Выявлены тенденции масштабов и динамики производства продукции отечественными металлургическими предприятиями, в целом описывающие положительный прирост объёмов производства в 2016–2024 гг., но отмечающие отставание в темпах развития металлургических предприятий ( $\beta = 1,31$ ) от производств готовых металлических изделий ( $\beta = 0,76$ ) на основании коэффициентов линейной регрессии в уравнениях аппроксимации. Прогнозирование объёмов производства на 2025–2026 гг. показывает, что отставание будет увеличиваться, если в секторе производства металлов не произойдут организационные и технологические изменения.

9. Проведён анализ внедрения передовых производственных технологий на предприятиях металлургии, где сделаны выводы, во-первых, об увеличении числа разработанных технологий в 2010–2024 гг. и некотором снижении числа приобретённых способов производства, что вероятно, обусловлено развитием отечественных разработок и сокращением импорта технологий. Во-вторых, число внедрённых в эксплуатацию технологий характеризуется большим приростом (+215 внедрённых технологий в 2024 году) по сравнению с числом разработанных и приобретённых технологий, что может быть связано с временным лагом, требуемым для подготовки новой технологической линии к эксплуатации.

10. Исследована структура внедрения различных технологий предприятиями металлургии, направленных на повышение ресурсной и экологической эффективности, где выявлены более приоритетные направления новых технологий – на снижение затрат материальных и энергетических ресурсов, снижение загрязнения окружающей среды (92,5% предприятий в 2024 году), сокращение углеродоёмкости (47,6% в 2024 году). Возможно, политический акцент на достижение углеродной нейтральности оказывает влияние на приоритетные цели промышленных предприятий. Тем не менее, полагаем, что в настоящее время важно разрабатывать и внедрять новые технологии, позволяющие одновременно обеспечивать повышение ресурсной эффективности и снижение углеродоёмкости производства.

## 2 КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ПОДХОДОВ К СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫБОРА РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА

### 2.1 Направления совершенствования подходов к управлению ресурсной эффективностью производства на основе наилучших доступных технологий

Сложный характер взаимосвязей между технологическими и техническими инновациями и управлением в сфере использования природных ресурсов с позиций устойчивого развития, неослабевающее внимание заинтересованных сторон к проблемам изменения климата и задачам построения низкоуглеродного производства требуют поиска подходов, позволяющих согласованно и эффективно решать задачи, стоящие перед промышленностью.

Технологические изменения являются основой для повышения ресурсной и экологической эффективности производства. Достижения в области возобновляемых источников энергии, такие как разработка эффективных солнечных панелей, решений для хранения энергии и интеллектуальных сетевых систем, актуальны в контексте международного внимания к скорейшему обеспечению энергоперехода. Более того, развитие технологий в области обращения с отходами способствуют созданию более замкнутой и ресурсоэффективной экономики. Исследования показывают, что во многих отраслях экономики наблюдается последовательное вытеснение устаревающих ресурсоёмких технологий более современными, отличающимися высокой ресурсоэффективностью [121,158,174].

В свою очередь, финансовые вложения в устойчивую инфраструктуру предполагают выделение средств для модернизации производственной инфраструктуры, поддерживающей ресурсоэффективные практики. Поскольку спрос на ресурсы продолжает расти, рациональное управление ими становится императивом. Достижение баланса между использованием и

сохранением ресурсов обеспечивает долгосрочную жизнеспособность глобальной экономической и экологической системы. В связи с этим возрастаёт роль разработки и внедрения производственных процессов, отличающихся высокой ресурсной эффективностью.

Кроме того, с развитием эколого-технологического регулирования в ряде случаев может происходить дополнительное увеличение затрат на производство продукции (связанное с разработкой и реализацией для крупных предприятий системообразующих отраслей, не выполняющих в настоящее время требования НДТ) программ эколого-технологической модернизации), что может приводить к снижению прибыли. Некоторые предприятия пытаются компенсировать возрастающие затраты за счёт расширения масштабов производства («эффект компенсации затрат»). Однако такой подход при сохранении основных технологий производства может привести к дисбалансам в планировании производства, что скажется на дальнейшем повышении себестоимости продукции [155]. В итоге сокращение масштабов инвестиций в технологическое развитие создаёт серьезные препятствия для развития как ресурсоёмких, так и высокотехнологичных отраслей в промышленности.

Концепция развития подходов к стандартизации процесса управления ресурсной эффективностью производства на основе НДТ является важным элементом организации производства для повышения конкурентоспособности и обеспечения соответствия требованиям законодательства:

- технологии (методы производства) – понятие включает как используемую технологию, так и способ проектирования, внедрения, эксплуатации, обслуживания и вывода из эксплуатации;
- доступные технологии – это технологии, разработанные в масштабах, позволяющих внедрять их в соответствующем промышленном производстве в технически приемлемых условиях, с учётом региональных особенностей (в том числе – климатических) затрат и преимуществ, при условии, что

предприятие может приобрести саму технологию (имеет к ней доступ) или соответствующий патент;

– наилучшие – понятие относится к наиболее ресурсо- и экологически эффективным технологиям.

В работах Скобелева Д. О. дано определение НДТ, которое отражает все описанные особенности: «Наилучшие доступные технологии – это совокупность организационных, технологических и технических решений, практическое применение которых позволяет промышленным предприятиям добиваться высокой ресурсной и экологической эффективности и ограничивать углеродоёмкость производства экономически целесообразными методами» [115].

Как отмечено в первой главе, в России разработаны 54 информационно-технических справочника и серия национальных стандартов по НДТ (более 80), формирующих научно-методическую базу внедрения наилучших доступных технологий в отраслях промышленности. Таким образом, лучшие практики производства стандартизируются и гарантируют при их внедрении повышение ресурсной, технической и экологической эффективности. Основная идея диссертационного исследования заключается в развитии методов идентификации технологий в качестве наилучших доступных, а именно, в модернизации процедуры оценки ресурсной эффективности и принятия решений об отнесении технологии к НДТ с применением эксергетического анализа (рисунок 2.1.1).

В контексте анализа понятия «ресурсная эффективность» существует необходимость в сравнительной оценке. В настоящее время активно изучается проблема технологической сложности производства: как её измерить и какие факторы влияют на изменение ресурсоэффективности технологий. Если производственное предприятие демонстрирует более высокую ресурсную эффективность в сравнении с аналогичными производствами, следует говорить о более высокой эффективности в целом в сравнении с конкурентами. Также эффективность может быть оценена в динамике, что

свидетельствует о том, что в текущем году производственные операции были более продуктивными.

Повышение ресурсной эффективности требует применения процессов управления и подходов к производственному планированию в традиционных производственных средах и в киберфизических производственных системах.

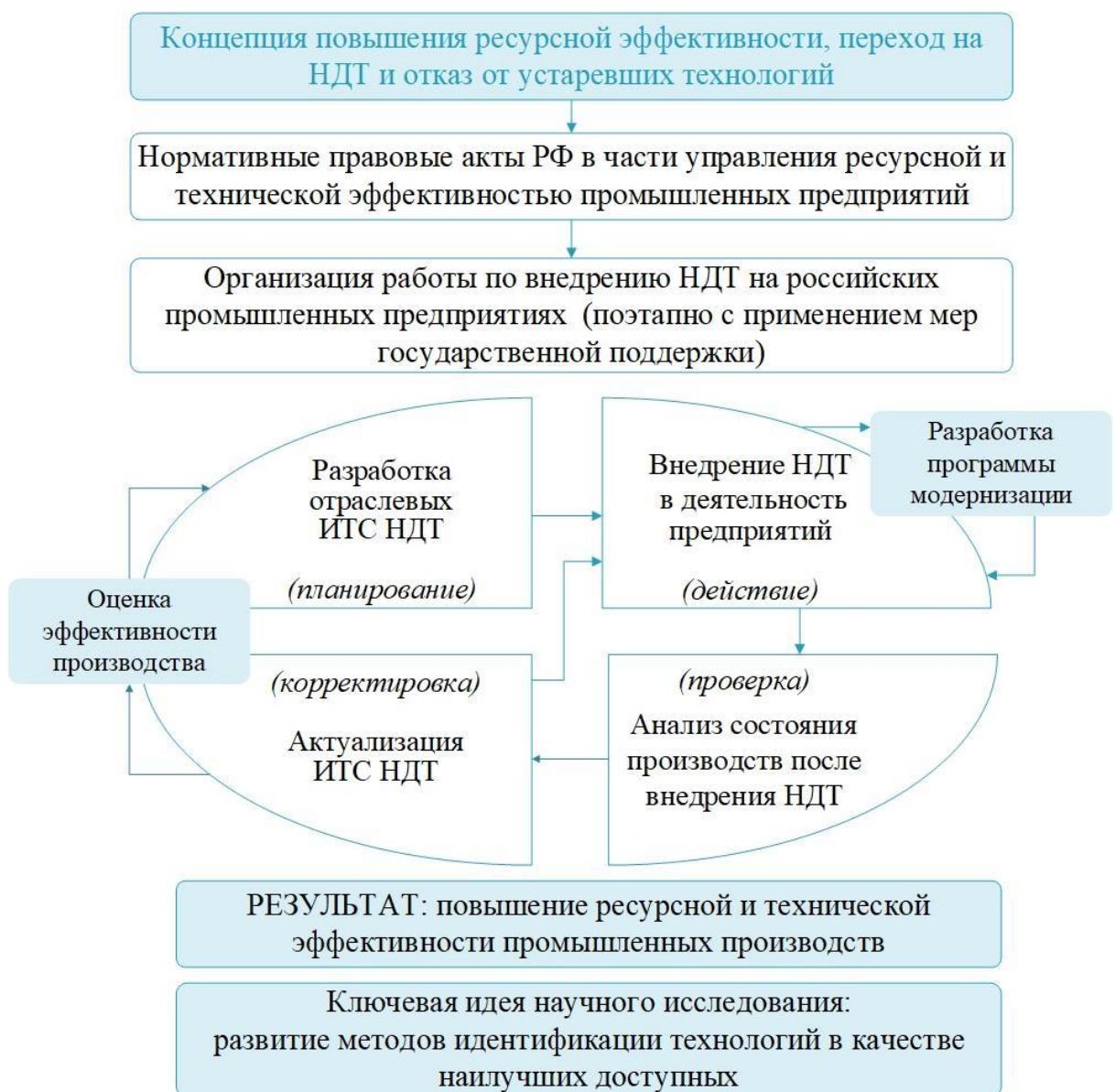


Рисунок 2.1.1 – Структурно-организационная модель стандартизации процесса управления ресурсной эффективностью производства на основе наилучших доступных технологий (разработано автором)

Как правило, требуется комбинация парадигм и подходов управления для решения сложных задач распределенного производственного планирования. Для металлургических предприятий проблема интеграции ресурсов является одним из типичных примеров решения проблемы планирования среди технологической цепи производств, которые совместно используют производственные ресурсы, как правило, представляет собой довольно сложные задачи комбинаторной оптимизации [82,173].

Ресурсная эффективность играет фундаментальную роль в концепции НДТ. Выделим ключевые аспекты понятия «ресурсная эффективность» с позиции НДТ (рисунок 2.1.2):

1. Ресурсная эффективность играет ключевую роль и прямо или косвенно влияет на выходные параметры производственного процесса – производительность, показатели экологической эффективности (технологические показатели), углеродоёмкость;
2. Высокая ресурсная эффективность производства – результат целенаправленной деятельности по внедрению НДТ (организационных, технологических и технических мер или их сочетаний), осуществляющейся для сокращения потребления материальных и энергетических ресурсов на всех этапах производства продукции при сохранении (или повышении) её качества;
3. Повышение ресурсной эффективности базируется на совершенствовании структуры потребления ресурсов, более глубокой переработке материальных ресурсов, вовлечении вторичных ресурсов в технологический процесс и достигается за счёт изменения (модернизации) основной технологии производства (перехода на качественно новый уровень).

Требования к уровням промышленных эмиссий для процессов, соответствующих НДТ, определяются как диапазон значений концентраций или удельных значений выбросов и (или) сбросов загрязняющих веществ, характерных для нормальных условий эксплуатации оборудования с использованием соответствующей совокупности технологических, технических и организационных решений. Вместе с тем, значительную роль

играют распределённое планирование, управление техническим обслуживанием, а также другие задачи, обусловленные динамично меняющимися условиями производства и внешней среды предприятия.

Международный и российский опыт свидетельствует о том, что во многих случаях наилучшие доступные технологии могут становиться действенным инструментом снижения ресурсно- и энергопотребления [170,156,151].



Рисунок 2.1.2 – Концепция «ресурсной эффективности» с позиции НДТ  
(составлено автором)

При этом, в настоящее время стоимость производства энергии из возобновляемых источников (исключая гидроэлектростанции) в большинстве случаев выше, чем стоимость существующих методов выработки тепловой

энергии с использованием ископаемого топлива. Однако, по мере развития технологий использования возобновляемых источников энергии, стоимость электроэнергии будет постепенно приближаться к таковой, характерной для теплоэлектростанций, поэтому можно ожидать изменения приоритетов предприятий в части ориентации на те или иные источники. Такую тенденцию уже можно наблюдать в Китае [10,178].

Наряду с термином «ресурсная эффективность» в теории и практике используется понятие «производственная эффективность» (или эффективность производства), означающее, что производственная система, действующая в рамках ограничений текущей промышленной технологии, не может увеличить производство одного вида продукции без ущерба для производства другого вида продукции [64]. На рисунке 2.1.3 концепция проиллюстрирована на границе производственных возможностей, где все точки на кривой являются точками производственной эффективности. Точки В, С и D продуктивно эффективны, но экономия в точке А не была бы такой, потому что D предполагает увеличение производства обоих товаров. При этом точка Х не может быть достигнута.

Вопросы обеспечения высокой производственной эффективности фокусируются на том, как максимизировать выпуск выбранного ассортимента продукции. Производственная эффективность отрасли требует, чтобы все предприятия работали с использованием передовых технологических и управлеченческих процессов, и чтобы не было необходимости в дальнейшем перераспределении, которое обеспечивало бы больший объём целевой продукции при тех же затратах и той же технологии производства [53]. В целом, снижение эффективности производства может возникать по причине нерационально используемых производственных ресурсов или по причине простоя производственных мощностей.

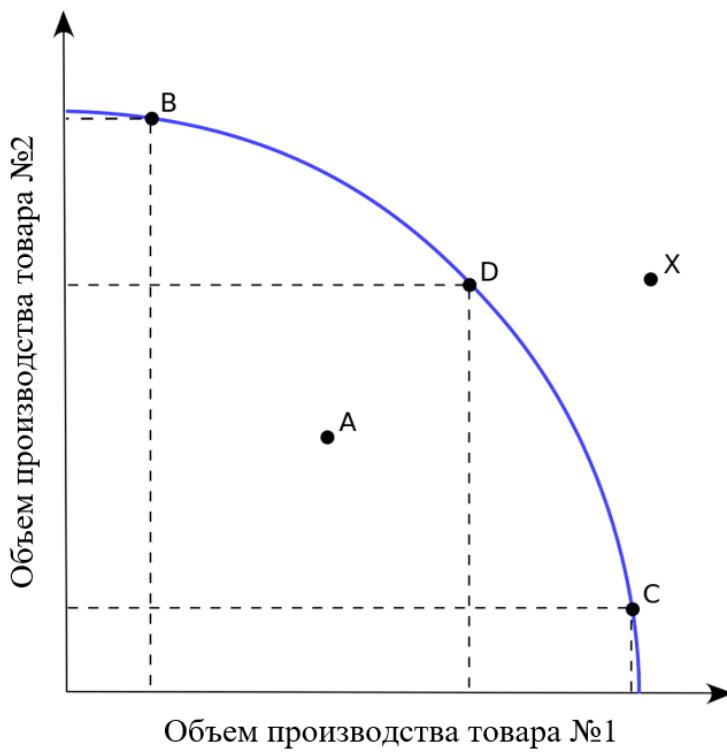


Рисунок 2.1.3 – Кривая производственных возможностей в контексте производственной эффективности [123]

Непосредственное отношение к задачам повышения ресурсоэффективности имеет концепция экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ). На микроуровне (уровне производственных площадок) и мезоуровне (уровне территории, региона), концепция ЭЗЦ предусматривает сокращение ресурсоёмкости, возврат в технологические процессы отходов, образовавшихся на данной площадке, а также «внутренних» и «сторонних» вторичных ресурсов; кроме того, рассматривается создание замкнутых циклов (например, водопотребления). Фундаментальная основа организации замкнутых циклов в металлургии предполагает, что система производства продукции должна быть спланирована, спроектирована по принципам ЭЗЦ таким образом, чтобы обеспечить условия и бизнес-модели, необходимые для повторного использования продукции и вторичных ресурсов в конце срока службы.

В настоящее время на ряде предприятий металлургии всё ещё используется модель линейной экономики: отработавшие срок изделия, в соответствии с принципом «от колыбели до могилы», не предназначены для «деконструкции» или «демонтажа», чтобы в итоге обеспечить повторное использование или переработку входящих в их состав их материалов или компонентов. Для создания замкнутых производственных циклов требуется комплексная модернизация систем, процессов и продуктов. Бесшовная интеграция принципа «от колыбели к колыбели» для всего жизненного цикла металлических изделий является сложной задачей. Тем не менее, это преобразование может быть достигнуто с помощью лучших практик, технологий и подходов.

Организационным барьером в развитии замкнутого производства в российской промышленности зачастую является отсутствие согласованных протоколов и процессов для управления данными по всей цепочке создания стоимости. Отсутствие организационных процедур и методов управления данными препятствует обмену информацией между заинтересованными сторонами, что затрудняет повторное использование материалов. Кроме того, существует потребность в профессиональных кадрах, обладающих компетенциями в области замкнутых производственных циклов [112].

В целом, для создания замкнутого производственного цикла ГОСТ Р 70089–2022 Ресурсосбережение. Общие подходы к реализации принципов экономики замкнутого цикла на предприятиях [40] выделяет такие инструменты реализации, как:

- эффективность использования ресурсов в пределах производственных площадок, при взаимодействии различных предприятий, а также в процессе использования продукта;
- повышение энергоэффективности и применение возобновляемых источников энергии;
- продление жизненного цикла продукта;
- промышленный симбиоз;

- формирование платформенной экономики и др.

До недавнего времени в России система стандартов, создающих основу для развития технологий ресурсоэффективных производств, развивалась достаточно медленно. Отсутствие или несовершенство базы стандартов препятствовало повышению ресурсной эффективности технологий и производств, создавая проблемы совместимости, безопасности и функциональности. Внедрение высокоэффективных технологий требует создания системы адекватных показателей, стандартов, механизмов и мер поддержки (в том числе государственной).

Согласно требованиям законодательства, на предприятиях, обязанных соответствовать требованиям НДТ, необходимо устанавливать системы автоматического контроля эмиссий (в зависимости от особенностей технологических процессов – выбросов и (или) сбросов загрязняющих веществ). Альтернативным решением может стать применение предиктивных систем, которые разрабатываются на основе сведений производственного контроля предприятий (данные автоматизированной системы управления технологическим процессом, АСУ ТП) с использованием математических моделей [163]. Предиктивные системы отражают связь входных потоков в технологический процесс (сырьё, топливо, электроэнергии и т. д.) и выходных потоков (различного рода эмиссии). За счёт этого возможно более глубокое управление технологическим процессом, направленное на сокращение расхода ресурсов и повышение экологической эффективности за счёт подбора оптимального технологического режима.

Таким образом, несоответствия и неэффективность в цепочке создания стоимости в металлургии до определённой степени могут быть обусловлены отставанием в развитии стандартов в области повышения ресурсной эффективности технологий. Преодолевая эти сложности, промышленные предприятия сотрудничают с отраслевыми научно-исследовательскими и конструкторскими организациями для разработки стандартизованных протоколов, охватывающих различные аспекты внедрения передовых (в том

числе наилучших доступных) технологий, организации замкнутых производственных циклов и вовлечения в производство вторичных ресурсов.

## 2.2 Систематизация инструментов повышения ресурсной эффективности производства алюминия

С 2014 г. в Российской Федерации осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям, направленный на отказ от устаревших технологий, повышение ресурсной и экологической эффективности производства, а также достижение технологического суверенитета. К областям применения НДТ в России отнесены крупные промышленные производства, в том числе и металлургические предприятия. Более 5000 российских предприятий – объектов I категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) должны были до начала 2025 г. оценить ресурсную и экологическую эффективность производства, определить степень соответствия требованиям наилучших доступных технологий и получить комплексные экологические разрешения (КЭР). В тех случаях, когда объекты I категории не соответствуют требованиям НДТ, они разрабатывают и реализуют программы модернизации, называемые программами повышения экологической эффективности (ППЭЭ).

По состоянию на конец 2025 г. комплексные экологические разрешения получили более 3667 предприятий I категории НВОС; свыше 297 предприятий разработали ППЭЭ, которые были одобрены в установленном законодательством порядке. Наблюдающееся отставание вызвано целым рядом причин. Во-первых, некоторые компании заняли выжидательную позицию, предполагая, вероятно, что переход к эколого-технологическому нормированию будет приостановлен (отложен). Другие, учитывая сложности процедуры выдачи КЭР, ошибки коллег по отрасли, особенности взаимодействия с консультационными компаниями, стремятся (надеются) перейти в категорию, для которой не установлены требования соответствия НДТ. Третий, «балансируя» между второй и третьей группами, поздно

приступили к систематизации информации, оценке ресурсной и экологической эффективности производства, подготовке документации и подаче заявок.

В целом, система разработки организационных, нормативных и технологических мер по повышению ресурсной эффективности на основе НДТ и их внедрения состоит из следующих элементов:

1) основы повышения ресурсной эффективности производства на основе наилучших доступных технологий:

- законодательно закреплённая концепция наилучших доступных технологий;
- комплексные экологические разрешения и программы модернизации;
- информационно-технические справочники по НДТ как новые документы национальной системы стандартизации;
- национальные стандарты по НДТ, имеющие методический характер, дополняющие ИТС НДТ;
- инструменты поддержки внедрения наилучших доступных технологий (в том числе инструменты государственной поддержки в рамках действия постановления Правительства РФ от 30.04.2019 г. № 541;

2) анализ и контроль ресурсной и экологической эффективности предприятий:

- производственный экологический контроль: основные требования и практика (в том числе установленные национальными стандартами);
- системы автоматического контроля выбросов и сбросов загрязняющих веществ при внедрении наилучших доступных технологий;
- предиктивные системы автоматического контроля;
- расчётные модели и их валидация.

3) добровольная экспертная оценка наилучших доступных технологий:

- современные системы менеджмента (менеджмент качества, экологический, энергетический менеджмент, менеджмент инноваций), требования к которым установлены соответствующими стандартами;
- социально-экологическая ответственность и прозрачное корпоративное управление (в том числе в соответствии с ГОСТ Р 71198–2023 Методика оценки и порядок формирования ЭКГ-рейтинга ответственного бизнеса);
- проекты устойчивого (в том числе зелёного) развития, требования к которым установлены постановлением Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587.

Несмотря на сложные внешние условия, металлургические производства активно осуществляют модернизацию производственного оборудования с применением современных технологий и технических решений (рисунок 2.2.1). Вместе с тем появились новые подходы, которые потребовали уточнений в реализации стратегического курса на декарбонизацию металлургии, а также актуализации информационно-технических справочников по НДТ [115].



Рисунок 2.2.1 – Инвестиции в модернизацию металлургической отрасли по одобренным программам повышения экологической эффективности (составлено автором)

Среди большого разнообразия отраслевых и межотраслевых справочников значительное внимание удалено технологиям металлургического производства. Структурно систематизация технологических и организационных мер, направленных на сокращение расхода ресурсов и минимизацию выбросов (как загрязняющих веществ, так и парниковых газов) металлургических производств, представлена на рисунке 2.2.2.

Технологические меры повышения ресурсоэффективности включают девять направлений наилучших доступных технологий производства цветных и чёрных металлов: производства меди, алюминия, никеля, кобальта, свинца, цинка, кадмия, драгоценных металлов, редких и редкоземельных металлов, чугуна, стали и ферросплавов, а также изделий дальнейшего передела чёрных металлов и литейного производства изделий из чёрных металлов [118].

Организационные меры можно структурировать на три блока: методы повышения энергетической эффективности, методы обращения с отходами, методы производственного контроля. Все обозначенные направления представляют собой стандартизованные подходы и методы, разработанные путём изучения деятельности профильных российских промышленных производств с дальнейшим определением лучших практик.

Межотраслевые технологии и методы обращения с отходами включают методы утилизации (термическим и иными способами), обезвреживания, захоронения отходов производства. Специфика металлургии в переработке отходов учитывается также в отраслевых документах по конкретному производству. Технологии повышения энергетической эффективности описывают особенности топливно-энергетического баланса в чёрной и цветной металлургии, наилучшие технологии, методы и практики совершенствования использования энергетических ресурсов, резервы повышения энергоэффективности и методы их выявления. Организация производственной деятельности в части оптимизации расхода топливно-энергетических ресурсов основана на концепции энергетического

менеджмента, способах эффективного сжигания топлива, оптимизации паровых систем, использования вторичных энергетических ресурсов и т.д.



Рисунок 2.2.2 – Систематизация технологических и организационных мер, направленных на сокращение расхода ресурсов и минимизацию выбросов металлургических производств (составлено автором с использованием [54])

Обратимся к ИТС НДТ 11–2022. Наилучшие доступные технологии в производстве алюминия содержат описание технологических процессов, оборудования, технических способов, методов, применяемых при

производстве первичного и вторичного алюминия, технического кремния, позволяющих снизить водопотребление, повысить энергоэффективность, обеспечить ресурсосбережение. Среди описанных процессов на основе результатов бенчмаркинга технологических показателей и показателей ресурсной эффективности определены решения, являющиеся наилучшими доступными технологиями.

Несмотря на то, что чистый алюминий (Al) является одним из наиболее распространенных элементов, его извлечение из природных минералов невозможно без протекания химической реакции. Алюминий входит в состав минералов в форме солей или оксидов. Ещё в прошлом веке был разработан процесс Холла-Эру путём электролитического разложения глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), растворённого в электролите, представляющем собой расплавленный криолит ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) с добавками). Технологический процесс осуществляется при 950–965° в электролизных ваннах [98].

Способ электролитического восстановления оксида алюминия, растворённого в расплавленном электролите, используется и в настоящее время. Основным сырьём в производстве алюминия являются глинозём, фтористые соли и анодная масса. В процессе электролиза жидкий алюминий оседает на катоде электролизёра, и далее расплавленный металл извлекается и передаётся в литейный цех (рисунок 2.2.3) [55].

В производстве первичного алюминия одновременно функционирует множество ёмкостей, что усложняет производственный процесс в целом [16]. Определение наилучшей доступной технологии производства алюминия, соответствующей оптимальным параметрам расхода ресурсов и образования отходов, возможно путём математического моделирования. Вместе с тем, для сложных нелинейных промышленных процессов динамическое моделирование является непростой задачей, и полное аналитическое представление процесса производства становится невыполнимым. Решение задачи видится в разработке приближённых гибридных моделей, что даёт

достаточно удовлетворительные результаты благодаря использованию искусственного интеллекта и методов машинного обучения.

Полагаем, что одним из способов определения наилучшей доступной технологии производства алюминия может быть моделирование с помощью нелинейных структур, таких как искусственные нейронные сети, векторы регрессии гауссовского процесса. Наиболее распространён для подобных задач тип нейронной сети – многослойный персепtron и сети радиальных базисных функций. Данные модели генерируют моделируемые значения с небольшой ошибкой и позволяют получать достоверные результаты [84,172].

Алгоритм предлагаемого метода поиска оптимальных параметров технологического процесса с позиции ресурсной эффективности в обобщенном виде представлен на рисунке 2.2.4.



Рисунок 2.2.3 – Блок-схема производства первичного алюминия в электролизерах с обожжёнными анодами [55]

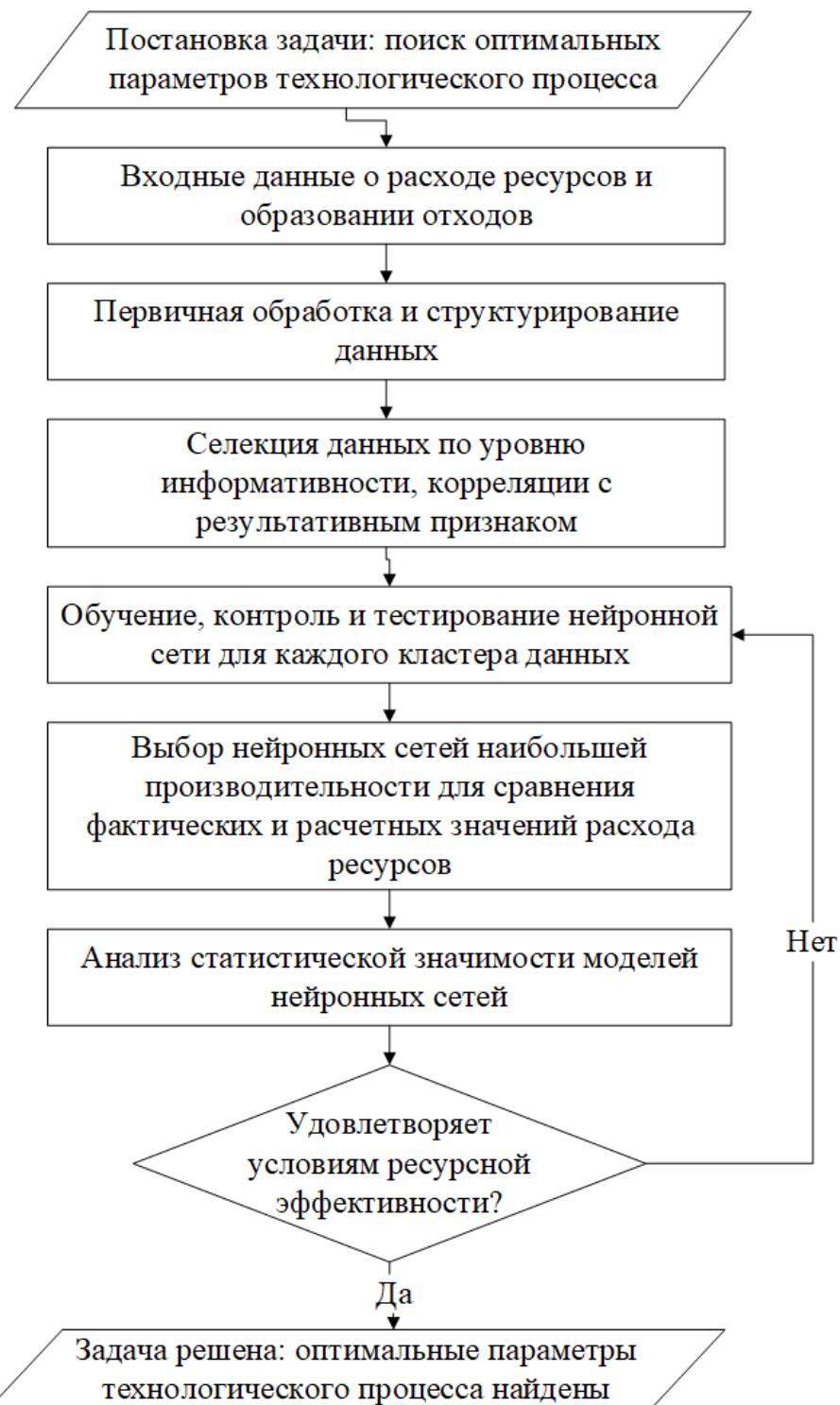


Рисунок 2.2.4 – Алгоритм определения оптимальных параметров технологического процесса с позиции ресурсной эффективности на основе метода нейронных сетей (составлено автором)

Так, основные технические характеристики и удельные расходы сырья и энергии для производства алюминия по использующимся технологиям можно

моделировать на основе методов машинного обучения. В информационно-техническом справочнике ИТС НДТ 11–2022 «Производство алюминия» для определения наилучшей технологии использован метод сравнения ключевых показателей, характеризующих различные технологии электролиза (таблица 2.2.1).

По нашему мнению, использование современных технологий интеллектуального анализа данных позволяет автоматизировать поиск наилучших решений организации производства на основе готовых алгоритмов. Выявление взаимосвязей между параметрами процесса, расходом ресурсов и выбросами загрязняющих веществ – это концептуальная основа моделирования, где возможна предиктивная диагностика, прогнозирование хода течения процесса и пр.

Таблица 2.2.1 – Определение НДТ путём сравнения технических характеристик для различных технологий электролиза [55]

Технология	Сила тока, кА	Выход по току, %	КПД газоотсоса, %
Обожжённые аноды первого поколения (ОА < 300 кА)	< 300 кА	92,7 - 93,0	96,6 - 97,0
Обожжённые аноды второго поколения (ОА > 300 кА)	> 300 кА	< 94,5	< 98,7
Рядовая технология с верхним токоподводом (ВТ)	140 - 175	87,5 - 89	86,3 - 88
Рядовая технология с верхним токоподводом с автоматической подачей глинозема и «сухой» газоочистной установкой	165 - 175	87,5 - 89	< 90
«ЭкоСодерберг»	172 - 176	88 - 91	96,0 - 97,5
Технология с верхним токоподводом с производственной системой	167 - 170	87,7 - 90	89 - 93
Технология с боковым токоподводом (БТ)	83 - 85	89 - 90	93 - 96

Для ведения непрерывного мониторинга и контроля необходима система датчиков, позволяющая охватить весь процесс, получить данные о каждом производственном цехе: параметры процесса, расход ресурсов, выход металла и эмиссии. Данные являются крайне важным инструментом управления, хранятся в базах данных, поддерживают работу автоматических систем принятия решений для инженеров-технологов. Так, для систем управления заводом по выплавке алюминия существуют два режима работы [106]:

- 1) автоматическое управление: данные собираются и обрабатываются компьютерами, далее осуществляют управляющее воздействие на завод без прямого вмешательства человека; примеры: контроль количества оксида алюминия, добавляемого в электролитическую ванну, с помощью математических моделей;
- 2) ручное управление: данные собираются с помощью датчиков или вручную операторами технологического процесса, а расчёт выходных данных выполняется инженерами-технологами с учетом математических моделей и их опыта; например, термопара для измерения температуры ёмкостей, процентное содержание фтористого оксида алюминия в ванне (лабораторный результат), уровень металла в ёмкости, замена анодов и отвод алюминия из ёмкости.

Одним из вариантов оценки ресурсной эффективности может быть использование методов анализа термодинамических параметров производственной системы – эксергетического анализа, позволяющего получать показатели эффективности, основанные на сравнении приближения фактической производительности к оптимальной (идеальной), выявлять причины и локализацию термодинамических потерь. Следовательно, эксергетический анализ и моделирование процессов целесообразны для улучшения и оптимизации технологий производства, решения задач снижения расхода ресурсов и выявления непроизводительных потерь.

## 2.3 Системотехнические принципы и подходы к оценке эффективности функционирования и качества организации производственных систем

Стандартизация процесса управления ресурсной эффективностью производств на основе НДТ предполагает, во-первых, измерение текущего расхода ресурсов при существующих технологиях и, во-вторых, сравнение значений с оптимальными параметрами лучших технологий.

В настоящее время как в России, так и за рубежом определение технологий в качестве НДТ, а также установление показателей зачастую основываются на экспертных мнениях [22]. Решения, принимаемые в условиях недостаточной научно-методической базы, могут привести к недостижению значений целевых показателей, т.е. технологии не обеспечат ожидаемого эффекта ресурсосбережения.

В целях объективности оценки ресурсной эффективности производства необходима разработка методического подхода, который позволит оценивать ресурсосберегающий потенциал текущих технологий и лучших практик. По нашему мнению, такой подход может быть основан на функциональной концепции эффективности управления производством, когда управление предприятием рассматривается с позиции организации производства, а эффективность производства характеризуется сравнением результатов и затрат в производственной системе.

Функциональной концепции эффективности управления производством, как и любой теории эффективности присущ принцип коэффициента полезного использования (действия) (КПД). КПД является критерием, показывающим, насколько эффективно работает единичное устройство или в целом производственная система. КПД показывает, какова доля полезной работы (производство целевого продукта) в общих затратах осуществления технологического процесса.

Адаптируя принцип работы коэффициента полезного действия к оценке эффективности производства или оценке ресурсозатратности применяемой в

производстве технологии, для целей данного исследования можно определить следующее понятие: «Коэффициент полезного действия (КПД) технологии – это доля ресурсов, преобразованных в конечный продукт, в общем количестве израсходованных ресурсов и потерь при осуществлении производственного процесса».

На практике можно наблюдать существенную дифференциацию КПД производств однородной продукции, что может быть обусловлено, в первую очередь, характером или типом используемой в производстве технологии. К примеру, при производстве первичного алюминия с использованием технологии электролизёров с обожжёнными анодами выход по току составляет до 94,5 %, в электролизерах с боковым токоподводом – 90 %, в рядовых электролизерах с верхним токоподводом – 89 %.

Обозначим КПД технологии традиционно символом  $\eta$  и запишем общую формулу определения коэффициента полезного действия технологии, как:

$$\text{КПД технологии } (\eta_t) = \frac{\text{Масса продукции } (Q_p)}{\text{Масса сырья и материалов } (Q_r)}. \quad (2.3.1)$$

Для обоснования предложения об использовании коэффициента полезного действия (КПД) технологии для оценки ресурсной эффективности технологии и эффективности производства в целом проведем исследование параметров работы: 51 предприятие металлургии, производства чугуна, стали и ферросплавов, готовых металлических изделий и др. Конечно, следует отметить разный ассортимент продукции предприятий и, соответственно, связанные с продукцией технологии. Но тем не менее, для первичного анализа ресурсной эффективности предприятий одного вида производственной деятельности данный подход считаем приемлемым. В дальнейшем, после определения дифференциации в ресурсоэффективности должен следовать более глубокий анализ с дополнительными переменными на уровне конкретных производств и их технологий.

Исходная база данных параметров работы предприятий включает следующие показатели:

- количество готовой продукции на выходе;
- количества использованных для производства продукции сырья и материалов;
- количества использованных для производства энергии, топлива, воды;
- произведённая добавленная стоимость.

Условно примем, что КПД технологии для целей исследования – это есть КПД использованного сырья и материалов и КПД топливно-энергетических ресурсов. В этой связи, исходные показатели преобразуем в аналитические, необходимые для оценки ресурсной эффективности предприятий и используемой ими технологии.

Так, для расчёта коэффициента полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}}$ ) предлагаем формулу:

$$\eta_{\text{см}} = \frac{\text{Масса продукции } (Q_p)}{\text{Масса сырья и материалов } Q_{\text{см}}} \quad (2.3.2)$$

Коэффициент полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{\text{тэр}}$ ) рассчитаем, как:

$$\eta_{\text{тэр}} = \frac{\text{Масса продукции } (Q_p)}{\text{Масса сырья и материалов } Q_{\text{тэр}}} \quad (2.3.3)$$

Общую эффективность производственной системы, зависящую конечно же в том числе и от эффективности использования ресурсов, т.е.  $\eta_{\text{см}}$  и  $\eta_{\text{тэр}}$ , обозначим как коэффициент  $E_p$  и рассчитаем по формуле:

$$E_p = \frac{\text{Добавленная стоимость } (\text{ДС})}{\text{Масса продукции } (Q_p)} \quad (2.3.4)$$

Таким образом, общую эффективность производственной системы определяем, как производство добавленной стоимости с единицы произведенной продукции. Чем выше добавленная стоимость производства, тем меньше промежуточное потребление (материальные и нематериальные производственные ресурсы), и, соответственно, выше эффективность производственной системы.

Ключевыми показателями исследования ресурсной эффективности предприятий будут:

- коэффициент полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}}$ );
- коэффициент полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{\text{тэр}}$ );
- коэффициент общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ).

Все разработанные показатели для анализа ресурсной эффективности предприятий являются «прямыми», т.е. их увеличение означает положительную тенденцию. Для первичного анализа и качества выборки данных о работе предприятий metallurgии используем инструменты дескриптивного анализа данных (таблица 2.3.1).

Таблица 2.3.1 – Дескриптивная аналитика вариации коэффициентов эффективности предприятий metallurgии и машиностроения

Наименование статистического параметра	Коэффициент полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}}$ )	Коэффициент полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{\text{тэр}}$ )	Коэффициент общей эффективности производственной системы ( $E_p$ )
Среднее значение (M)	1,90	94,46	0,36
Стандартное отклонение (S)	0,14	18,18	0,03
Дисперсия (D)	0,95	16857,52	0,04
Коэффициент эксцесса (E)	7,77	7,88	- 0,34
Коэффициент асимметрии (A)	2,58	2,65	0,60
Минимальное значение (Min)	1,11	5,59	0,07
Максимальное значение (Max)	6,08	661,94	0,82

Мера разброса значений коэффициентов относительно среднего значения определена на основе дисперсии величин ( $D$ ), составляющих массив данных предприятий по формуле:

$$D = M[(x - M[x]^2], M = \frac{\sum_1^n x}{n}, \quad (2.3.5)$$

где  $x$  – величина коэффициента,  $M$  – среднее значение коэффициента в выборке предприятий,  $n$  – число предприятий.

Дисперсия коэффициентов полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{cm}$ ) и общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ) менее 1, что говорит о высокой однородности массива предприятий по данному признаку. При этом, дисперсия коэффициента полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{ter}$ ) имеет пятизначное значение и характеризуется высокой степенью разброса данных. Т.е., уже на основании дескриптивной аналитики можно увидеть существенное различие  $\eta_{ter}$  по предприятиям, что, возможно, обусловлено разными видами применяемых технологий.

Стандартное отклонение совокупности данных о ресурсной эффективности производств ( $S$ ) рассчитывается как положительный квадратный корень из дисперсии выборки:

$$S = \sqrt{M[(x - M[x]^2]}, M = \frac{\sum_1^n x}{n}. \quad (2.3.6)$$

Данный параметр является более понятным для интерпретации данных и подтверждает высокий разброс  $\eta_{ter}$  по предприятиям ( $S \eta_{ter} = 18,18\%$ ), а значения отклонений  $S \eta_{ter} < 1$ ,  $S E_p < 1$ .

Положительная асимметрия  $A$  для коэффициентов полезного использования ресурсов  $\eta_{cm}$  и  $\eta_{ter}$  означает правостороннюю «скошенность» или преобладание в выборке предприятий с более высокими значениями

коэффициентов полезного использования относительно среднего значения. Коэффициент эксцесса ( $E$ ) показывает положительные значения для выборок  $\eta_{\text{см}}$  и  $\eta_{\text{тэр}}$ , т.е. визуально можно представить «острый» пик распределения данных. Распределение значений коэффициента общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ) более сглажено ( $E_p = -0,34561$ ).

На рисунках 2.3.1–2.3.3 представлены гистограммы, показывающие характер распределения данных о ресурсной эффективности предприятий металлургии и машиностроения. Как видно, коэффициенты  $\eta_{\text{см}}$  и  $\eta_{\text{тэр}}$  распределились по экспоненциальному закону, т. е. непрерывно с положительной асимметрией.

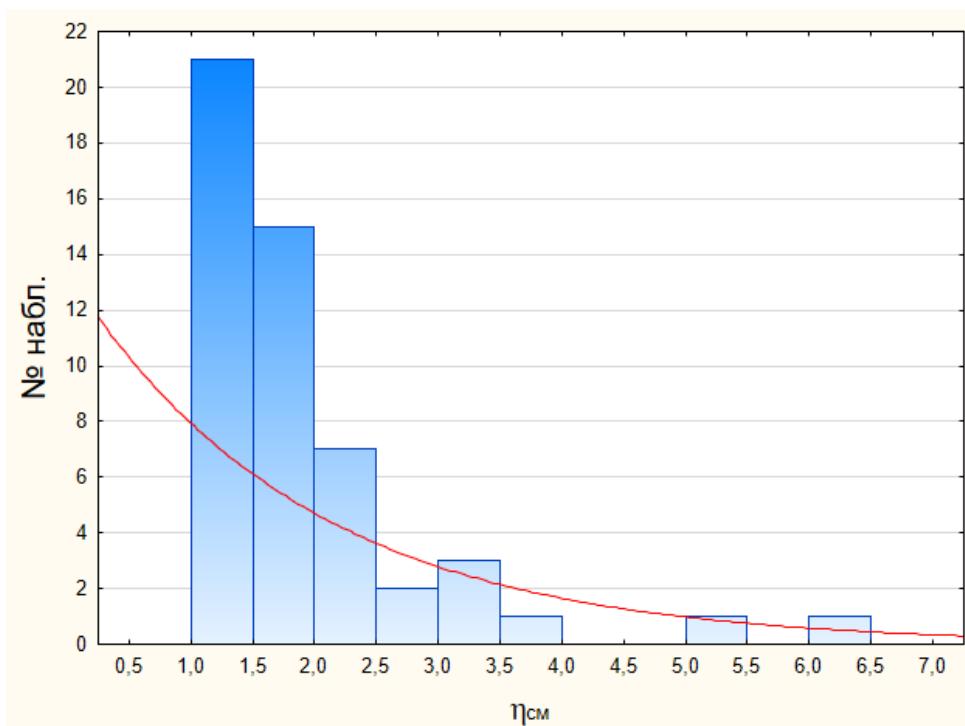


Рисунок 2.3.1 – Экспоненциальное распределение коэффициента полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}}$ ) (составлено автором)

Распределение коэффициента общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ) имеет форму распределения Гаусса, где крайние наименьшее и наибольшее значения признака отмечаются редко. Вероятно, можно предположить, что нормальное распределение общей

эффективности производственной системы при экспоненциальном распределении коэффициентов полезного использования сырья, материалов, энергии сглаживается расходом нематериальных ресурсов на производство продукции, которые также входят в промежуточное потребление.

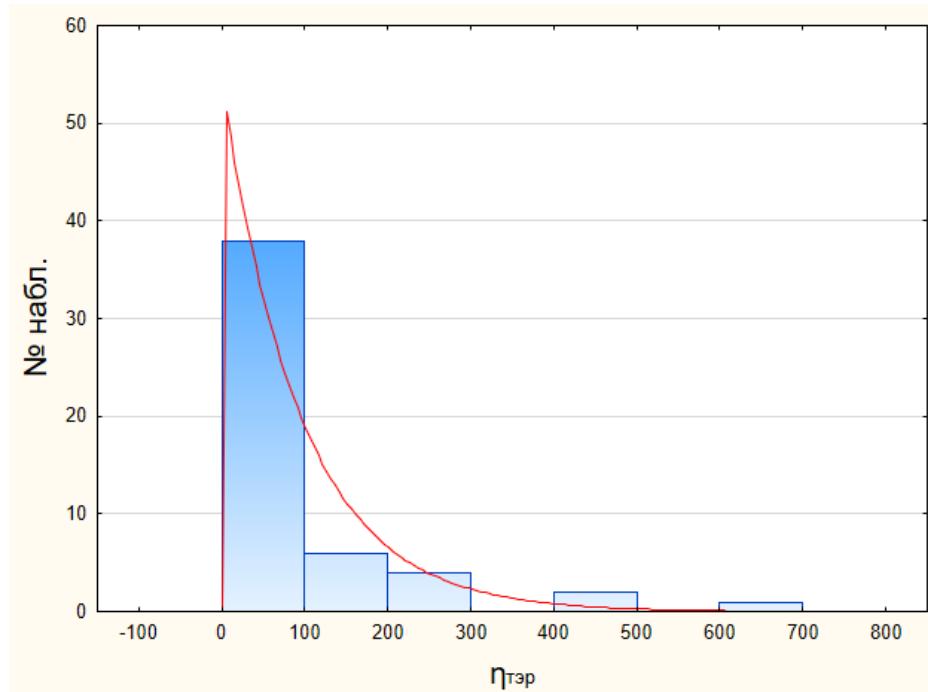


Рисунок 2.3.2 – Экспоненциальное распределение коэффициента полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{\text{тэр}}$ ) (составлено автором)

Дескриптивная аналитика вариации коэффициентов эффективности предприятий metallurgii и машиностроения показала пригодность выборки для дальнейшего исследования дифференциации ресурсной эффективности. Используя ансамблевый метод машинного обучения – построение дерева классификации и регрессии (CART) выделим группы предприятий по уровню полезного использования ресурсов.

Воспользуемся программным комплексом Statistica, который позволяет выполнять интеллектуальный анализ данных. Для выполнения анализа выбираем переменные:

- зависимая переменная – коэффициент общей эффективности производственной системы ( $E_p$ );

- категориальная переменная – коэффициент общей эффективности производственной системы в текстовом выражении: высокий, выше среднего, ниже среднего, низкий;
- предиктор 1 – коэффициент полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{cm}$ );
- предиктор 2 – коэффициент полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{ter}$ ).

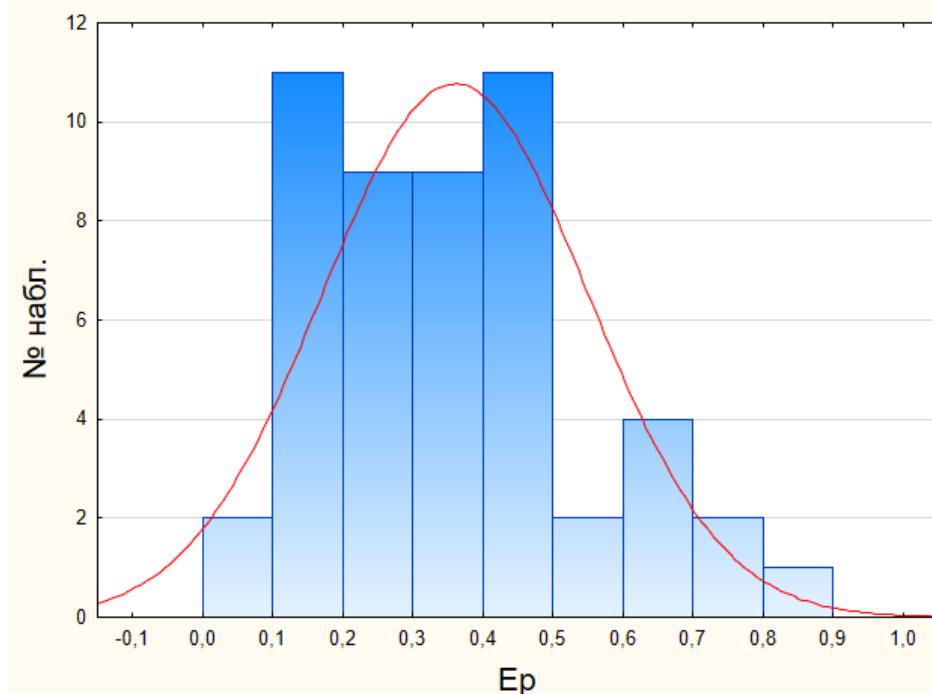


Рисунок 2.3.3 – Нормальное распределение коэффициента общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ) (составлено автором)

При условии критерия останова ветвления дерева, равному 5 объектов в узле, получаем древовидный граф из 35 узлов, где 18 узлов являются терминальными (рисунок 2.3.4).

В таком исполнении дерева затрудняется его интерпретация, поэтому посредством обрезки ветвления остановимся на третьей итерации и примем её как терминальную (рисунок 2.3.5). На все итерации выбрана категория ответа

– предиктор 1 «коэффициент полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{cm}$ )».

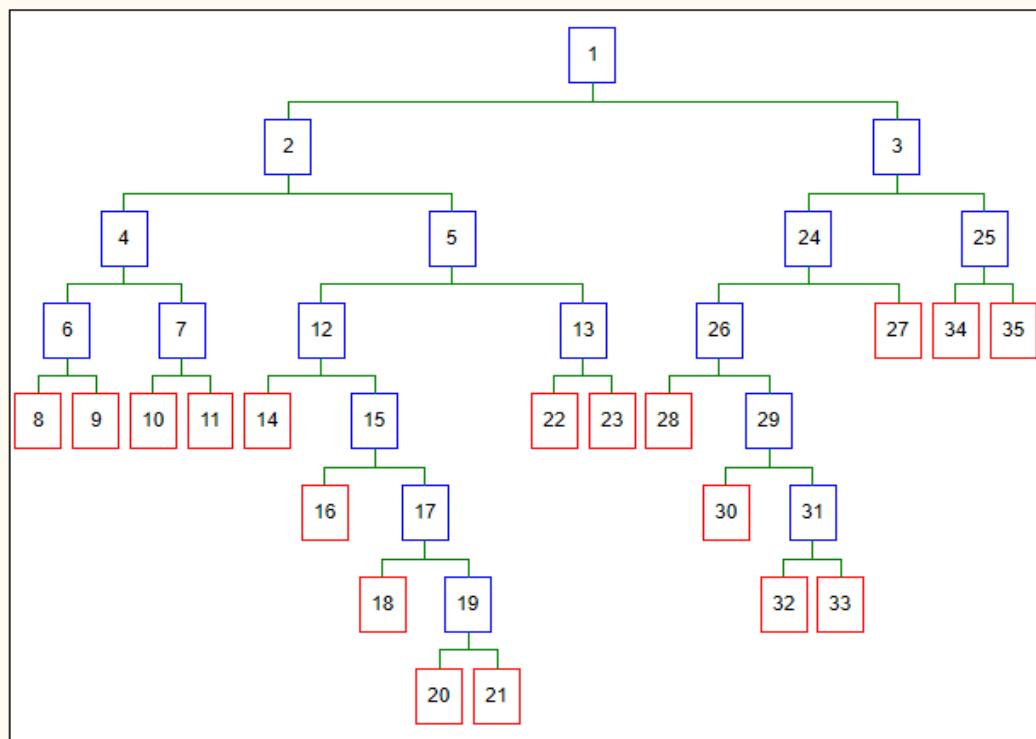


Рисунок 2.3.4 – Граф CART классификации предприятий металлургии и машиностроения по уровню ресурсной эффективности (составлено автором)

Этот параметр является наиболее информативным коэффициент важности составляет 1,0, в то время как коэффициент важности  $\eta_{ter}$  равен 0,162. Т.е. большее влияние на зависимую переменную «коэффициент общей эффективности производственной системы ( $E_p$ )» оказывает коэффициент  $\eta_{cm}$ , соответственно, он и является ключевым при классификации предприятий. Граф также содержит информацию о размере узла или числа входящих в него предприятий, среднем значении по  $E_p$ , вариации по  $E_p$  и указывает переменную для ветвления узла.

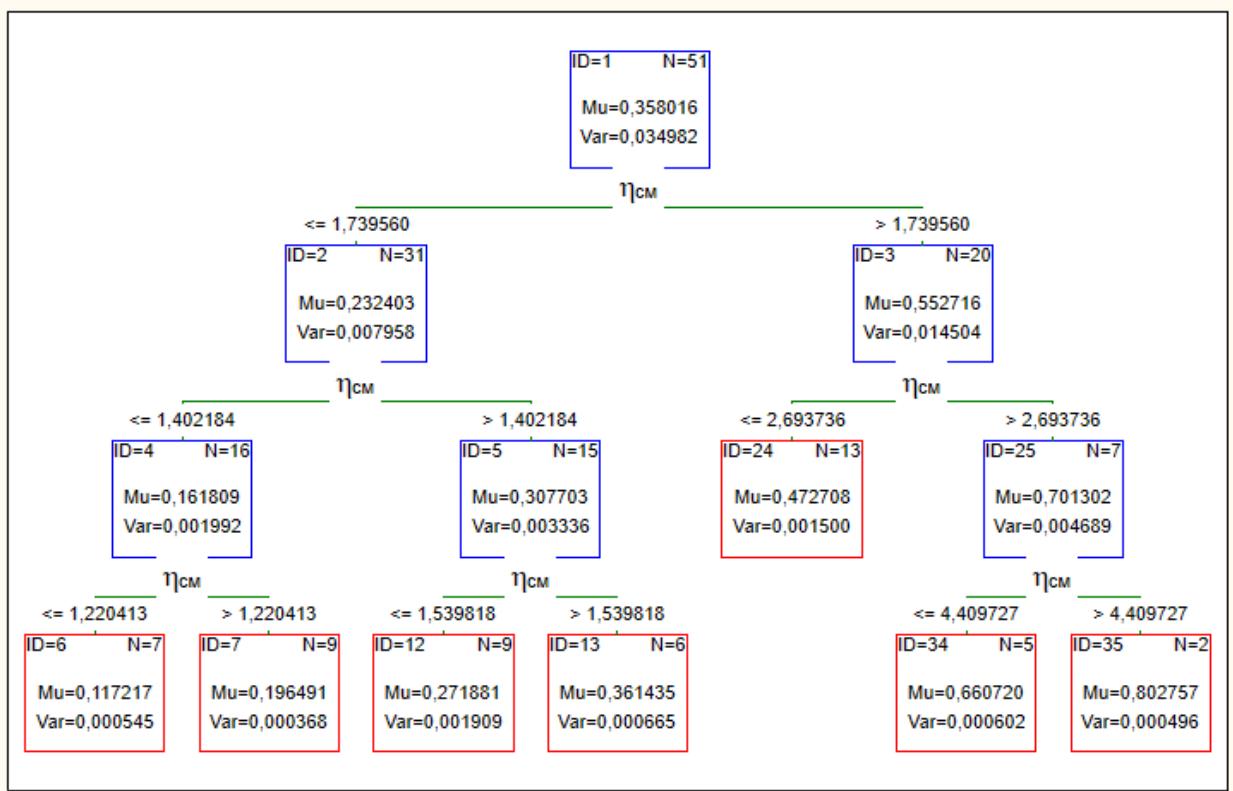


Рисунок 2.3.5 – Итоговый древовидный график классификации предприятий металлургии и машиностроения по уровню ресурсной эффективности  
(составлено автором)

Интерпретируя построенный древовидный график, получим шесть групп предприятий по уровню ресурсной эффективности – узлы № 6, 7, 12, 13, 34, 35 (таблица 2.3.2). Каждая группа имеет свои характеристики по коэффициенту полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}}$ ) и коэффициенту общей эффективности производственной системы ( $E_p$ ). Наибольшим КПД сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}} > 4,409$  руб.) обладают предприятия шестой группы (2 предприятия). В этой же группе отмечена самая высокая средняя эффективности производственной системы в целом ( $E_p$  среднее = 0,8027 руб.). Наименьший КПД сырья и материалов ( $\eta_{\text{см}} > 1,220$  руб.) наблюдается в 1 группе предприятий при минимальной эффективности производственной системы ( $E_p$  среднее = 0,1172 руб.).

Таблица 2.3.2 – Результаты классификации предприятий по уровню ресурсной эффективности методом дерева CART (составлено автором)

Группы предприятий по ресурсной эффективности	Параметры дерева CART		
	Условие отнесения предприятия на основе «коэффициента полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{cm}$ ), руб.»	Размер узла N (количество предприятий)	Среднее значение узла Mi по параметру «коэффициент общей эффективности производственной системы (Ep), руб.»
1 группа	$\eta_{cm} < 1,220$	7	0,1172
2 группа	$1,220 < \eta_{cm} < 1,402$	9	0,1964
3 группа	$1,402 < \eta_{cm} < 1,539$	9	0,2718
4 группа	$1,539 < \eta_{cm} < 2,693$	6	0,3614
5 группа	$2,693 < \eta_{cm} < 4,409$	5	0,6607
6 группа	$\eta_{cm} > 4,409$	2	0,8027

Таким образом, условно можно определить резерв повышения КПД сырья и материалов:

для группы №4 – резерв повышения  $\eta_{cm} = [0; 1,716]$ ;

для группы №4 – резерв повышения  $\eta_{cm} = [1,716; 2,870]$ ;

для группы №3 – резерв повышения  $\eta_{cm} = [2,870; 3,007]$ ;

для группы №2 – резерв повышения  $\eta_{cm} = [3,007; 3,187]$ ;

для группы №1 – резерв повышения  $\eta_{cm} > 3,187$ .

Характеристики коэффициента полезного использования энергии, топлива, воды также могут быть рассчитаны по группам как средняя величина.

Обратим внимание, что полученные различия в уровне КПД сырья и материалов предприятий metallurgii и машиностроения могут быть обусловлены как некоторым отличием ассортимента продукции, так и используемой технологией производства, и организацией работы основного, вспомогательного производства и обслуживающих структур.

Таким образом, предлагаемый подход оценки ресурсной эффективности технологии или производства в целом, где в основу формирования оценочных показателей положены коэффициенты полезного использования (действия) ресурсов, может быть использован для первичного анализа расхода ресурсов с последующим выходом на наилучшие доступные технологии.

### Выводы по второй главе

1. Обосновано, что концепция развития методов стандартизации процесса управления ресурсной эффективностью производства на основе НДТ является наиболее эффективным подходом к развитию производства и его эколого-технологической модернизации.

2. Сформирована структурно-организационная модель стандартизации процесса управления ресурсной эффективностью производства на основе наилучших доступных технологий, отражающая алгоритм последовательных действий по повышению эффективности использования ресурсов с выходом на ключевую идею диссертационного исследования – развитие методов идентификации технологий в качестве наилучших доступных, а именно, модернизация процедуры оценки ресурсной эффективности на основе эксергетического анализа.

3. Сформированы ключевые аспекты понятия «ресурсная эффективность» с позиции НДТ. Фундаментальной концепцией повышения ресурсной эффективности определено (1) совершенствование структуры потребления различного рода ресурсов, (2) более глубокая переработка материальных ресурсов, вовлечение вторичных ресурсов в технологический процесс за счёт модернизации основной технологии производства (переход на качественно новый уровень).

4. Выделены организационные барьеры в развитии замкнутых производственных циклов, обусловленные необходимостью комплексной модернизации производственных систем, процессов и продуктов, организацией бесшовной интеграции принципа «от колыбели к колыбели» для

всего жизненного цикла металлических изделий, а также отсутствием согласованных протоколов и процессов для управления данными по всей цепочке создания стоимости, отсутствием стандартов вторичных ресурсов.

5. Разработана система технологических и организационных мер, направленных на сокращение расхода ресурсов и минимизацию эмиссий металлургических производств, где технологические меры включают девять направлений лучших доступных технологий металлургического производства, организационные меры, структурирована на три блока: принципы производственного экологического контроля, технологии ресурсной эффективности, технологии обращения с отходами.

6. Предложен алгоритм определения оптимальных параметров технологического процесса с позиции ресурсной эффективности и определения лучшей доступной технологии производства на основе метода нейронных сетей, что позволит автоматизировать поиск лучших решений организации производства на основе готовых алгоритмов. Выявление взаимосвязей между параметрами процесса, расходом ресурсов и эмиссиями – это концептуальная основа моделирования, где возможна предиктивная диагностика и прогнозирование хода течения процесса. Эксергетический анализ и моделирование процессов целесообразны для улучшения и оптимизации технологий производства, решения задач расхода ресурсов и выявления непроизводительных потерь.

7. Обосновано, что для объективности оценки ресурсной эффективности и степени развития производства может быть использован метод термодинамического анализа производственной системы с применением коэффициента полезного использования (действия) (КПД), являющегося критерием эффективности работы технологии или производственной системы в целом в части доли полезной работы в общих затратах. В порядке адаптации оценки ресурсоэффективности технологии предложено определение понятия «коэффициент полезного действия (КПД) технологии».

8. Предложена методика оценки коэффициентов полезного использования производственных ресурсов и общей эффективности производственной систем, позволяющая на первичном этапе анализа ресурсной эффективности предприятий одного вида производственной деятельности выявлять неэффективные технологии или непроизводительный расход ресурсов. Разработаны формульные выражения показателей КПД технологии ( $\eta$  технологии), коэффициента полезного использования сырья и материалов ( $\eta_{см}$ ), коэффициента полезного использования энергии, топлива, воды ( $\eta_{тэр}$ ).

9. Показано применение метода дескриптивной аналитики данных для выявления разброса коэффициентов полезного использования производственных ресурсов предприятий одного вида производственной деятельности с целью выявления неэффективных производств. Смоделированы шесть групп предприятий металлургии и машиностроения по уровню ресурсной эффективности методом машинного обучения – построение дерева классификации и регрессии (CART), определен численный резерв повышения КПД сырья и материалов для групп предприятий. Результаты предлагаемого подхода оценки ресурсной эффективности предназначены для первичного анализа расхода ресурсов с последующим выходом на наилучшие доступные технологии.

### 3 ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

#### 3.1 Стандартизация системы показателей оценки уровня технической эффективности функционирования производства алюминия

В целях стандартизации показателей оценки уровня ресурсной эффективности технологий в контексте концепции НДТ проведён анализ современного уровня развития наилучших доступных технологий в цветной металлургии. Сведения об НДТ систематизированы в информационно-технических справочниках, которые являются документами национальной системы стандартизации и рассматриваются в качестве основного инструмента внедрения НДТ [115].

ИТС НДТ содержат описание наилучших доступных и перспективных (инновационных) технологий производства продукции, устанавливают показатели ресурсной и экологической эффективности технологий, а также удельные показатели выбросов парниковых газов (углеродоёмкости производства), использующиеся для сравнения технологий и принятия дальнейших управлеченческих решений на уровне предприятий (рисунок 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 – Стандартная структура информационно-технического справочника НДТ (по [41], с изменениями)

В настоящее время ИТС НДТ содержат три группы показателей (показатели НДТ):

- показатели ресурсной эффективности производства (ПР). Допустимый уровень показателей устанавливается для ключевых материальных, энергетических и топливных ресурсов, исходя из специфики отрасли; показатели являются целевыми и находят применение как при проектировании новых и модернизации действующих производств, так и при экспертной оценке проектов, претендующих на получение мер государственной поддержки, или для потенциально зелёных проектов;
- показатели углеродоёмкости (ПУ) (удельные выбросы парниковых газов); ПУ характеризуют углеродоёмкость производства и продукции, напрямую зависят от ресурсной эффективности;
- технологические показатели (показатели экологической эффективности) (ТП); допустимый уровень содержания загрязняющих веществ (ЗВ) в выбросах отходящих газов и сбросах сточных вод предприятия; ПУ устанавливаются для наиболее существенных ЗВ, характеризующих производственный процесс – маркерные вещества.

Три группы показателей применяются в различных регуляторных конструкциях – в рамках промышленной, экологической и климатической политики.

В целях разработки комплексного подхода к внедрению НДТ на уровне предприятий предложено показатели НДТ рассматривать как единую взаимосвязанную систему для оценки промышленных технологий.

Существующая система ИТС НДТ в металлургии включает в себя ряд отраслевых справочников (рисунок 3.1.2).

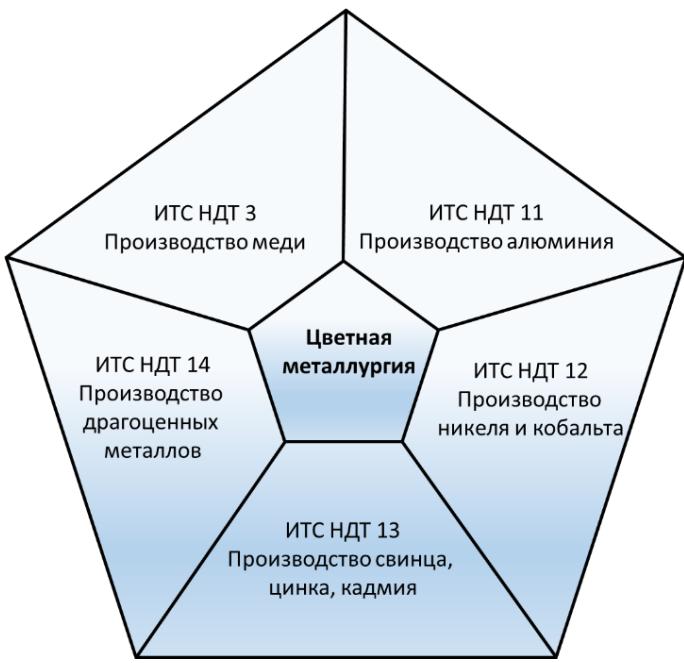


Рисунок 3.1.2 – Система ИТС НДТ в цветной металлургии  
(составлено автором)

По результатам анализа наилучших доступных и перспективных технологий выделены и систематизированы основные направления внедрения НДТ на уровне предприятий:

- внедрение НДТ в целях повышения ресурсной эффективности производства (модернизация основной технологии, вовлечение вторичных ресурсов (материальных, энергетических) в производственный процесс);
- внедрение НДТ в целях повышения экологической эффективности производства (модернизация основной и вспомогательной технологии, установка или модернизация газоочистного оборудования, установка или модернизация системы водоочистки, внедрение замкнутого цикла водооборота);
- организационные мероприятия (внедрение системы менеджмента качества, энергетического и экологического менеджмента, других систем менеджмента);
- автоматизация технологических процессов и контроля протекания технологического процесса.

Общей тенденцией совершенствования современных металлургических технологий является снижение энергетических затрат на единицу продукции, в том числе за счёт модернизации и технического перевооружения предприятий. Важно иметь объективные показатели для сравнения технологий и оценки потенциала их модернизации.

Управляя входными параметрами технологического процесса, (показателями ресурсной эффективности) можно добиться повышения эффективности производства в целом, включая экологические аспекты осуществления технологического процесса.

Основой повышения ресурсной эффективности производственных процессов является комплексное использование природных и материальных ресурсов, максимальное устранение потерь и нерациональных расходов. Современная промышленная политика рассматривает НДТ в качестве одного из основных механизмов повышения ресурсной (в том числе энергетической) и экологической эффективности, технологичности российского производства, а также обеспечения высокого качества продукции.

В целом концепция НДТ представляет собой многофункциональную методологическую основу управления производственным процессом, основные элементы и процессы которой в России (и это выгодно отличает нашу страну от других государств и регионов) стандартизированы. Для крупных промышленных объектов, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, внедрение принципов НДТ является ключевым элементом стратегии развития [118].

### 3.2 Структурно-организационная модель повышения уровня организации производства алюминия

Современное общество неразрывно связывает качество продукции с высокими показателями ресурсной эффективности и низким воздействием на окружающую среду при её производстве. Такие же принципы заложены в

концепции НДТ – модернизация базовой, основной технологии с целью повышения её ресурсной эффективности и, тем самым, ограничения негативного воздействия.

На уровне предприятия актуальной проблемой остается достижение современных требований на основе постоянного совершенствования всех процессов и улучшения их качества. Применение базовых принципов концепции всеобщего менеджмента качества (TQM) позволяет обеспечить на основе процессного подхода устойчивое развитие деятельности предприятия в долгосрочной перспективе.

Внедрение концепции НДТ и TQM направлены на эффективное планирование и осуществление процессов управления с применением системного подхода с целью достижения единых целей – повышения качества продукции, оптимального использования имеющихся ресурсов, обеспечение бесперебойного функционирования технологических процессов. При этом важным аспектом является постоянное (последовательное) улучшение систем менеджмента и достигаемых показателей и учёт текущих мировых тенденций развития и динамично меняющихся требований (в том числе законодательных), а также запросов общества.

Таким образом, на современном этапе реформирование промышленности, а также развитие TQM на уровне предприятий невозможны без учёта принципов НДТ.

Предлагается концепцию НДТ рассматривать в качестве одного из ключевых элементов всеобщего менеджмента качества (рисунок 3.2.1).

Ресурсоэффективная производственная система промышленного предприятия имеет иерархическую структуру, состоит из подсистем, компонентов и элементов.

Можно выделить следующие основные этапы организации таких систем:

1. Оценка значимости факторов ресурсоэффективности, влияющих на состояние производственной системы.

2. Достижение показателей наилучших доступных технологий по ключевым факторам ресурсоэффективности.
4. Диагностика результативности системы.



Рисунок 3.2.1 – Построение модели ТQM с применением концепции НДТ (составлено автором)

Структурный или объектный подход к определению производственной системы характеризуется разделением её на составляющие элементы по определенным признакам и сложившимся связям между ними.

В концепции НДТ есть инструменты и механизмы для успешной реализации задач, перечисленных выше, а также для управления различными элементами производственных систем. В отраслевых и межотраслевых ИТС НДТ приводится информация о технологиях, методах и подходах, внедрение которых позволит достигать заданного уровня ресурсной эффективности. При выборе технологий учитывается опыт промышленного внедрения, техническая возможность, а также экономическая целесообразность реализации.

Мероприятия технологической модернизации объекта I категории НВОС отражаются в ППЭЭ, которая представляет собой поэтапный план с конкретными техническими решениями, сроками и ожидаемыми затратами. Предприятие принимает на себя чётко описанные и выполнимые обязательства по улучшению и осуществляет мониторинг этапов внедрения. По результатам завершения мероприятий проводится общая диагностика результативности системы, а также продолжаются исследования, направленные на поиск ещё более эффективных решений. Это соответствует принципу последовательного постоянного улучшения – ключевому принципу ТQM.

При разработке и актуализации ИТС НДТ для формирования требований, которые лягут в основу справочника и последующих нормативных правовых актов (постановлений Правительства РФ или приказов Минприроды России), проводится сбор данных с предприятий отрасли. Собирается информация о входных и выходных потоках технологического процесса. В рамках технической рабочей группы (ТРГ) проводится анализ данных с последующим определением, что на данный момент считать наиболее ресурсо- и экологически эффективными технологиями (наилучшими доступными технологиями), а также устанавливаются количественные показатели технологий. Именно эти технологии должны стать основой последующей модернизации технологии и включаться в планы стратегического развития предприятия [70].

На предприятии для организации сбора и анализа информации для ИТС НДТ необходимо задействовать несколько структурных подразделений. Металлургические предприятия имеют иерархическую структуру, различные дивизионы занимаются своими задачами (обеспечение производственного процесса, входной контроль качества и так далее) и связаны между собой только посредством обмена информацией.

Для успешной организации и функционирования ресурсосберегающей производственной системы промышленного металлургического предприятия

необходимо внедрение программно-целевой (матричной) структуры. Функционирование такой структуры направлено на выполнение определенной целевой задачи, в решении которой участвуют все необходимые звенья организации.

Организационная модель процесса управления ресурсной эффективностью metallurgического производства представлена на рисунке 3.3.2 и ниже описана подробнее.

В целях решения вопроса эффективного управления ресурсной эффективностью, основанного на принципах НДТ, предлагается выделить на предприятии отдельную рабочую группу. Рабочая группа должна входить в состав дирекции стратегического развития и наилучших доступных технологий (далее – Дирекция), которая создается на время поиска и внедрения ресурсоэффективных технологий. Должны быть представлены специалисты следующих основных структурных подразделений:

- дирекция по производству;
- дирекция по энергетике;
- дирекция по охране окружающей среды.

В ряде случаев дирекции по охране окружающей среды и по климатическим проектам разделены, это следует учитывать при формировании рабочей группы на предприятии.

Дирекция проводит анализ данных, представленных основными дирекциями, и определяет какие технологии на сегодняшний момент являются НДТ. Сравнение технологий проводится по алгоритмам, описанным в параграфе 3.3.

Данные передаются в Бюро НДТ для учета при разработке (или актуализации) отраслевого ИТС НДТ. В случае если технологии уже включены в текущую версию ИТС НДТ, проводится сравнение ключевых показателей с показателями НДТ. В случае если технология не включена в ИТС НДТ, но её параметры как минимум не хуже технологий НДТ, то такая технология может быть включена в ИТС НДТ по решению ТРГ.



Рисунок 3.2.2 – Организационная модель процесса управления ресурсной эффективностью металлургического производства (составлено автором)

По результатам анализа Дирекция принимает решение о необходимости или отсутствии необходимости модернизации основной технологии предприятия с целью повышения ресурсной эффективности.

С целью обеспечения мониторинга и управления системой после реализации программы по модернизации (введения в эксплуатацию технологий) дирекция по информационным технологиям на основе данных основных дирекций и данных службы качества разрабатывает математические модели, отражающие корреляцию между различными параметрами, то есть зависимость ТП и ПУ от ПР. За счёт управления параметрами ресурсной эффективности можно контролировать выходные потоки технологии, а также качество продукции. Данное направление является перспективным и заслуживает самостоятельного исследования.

Для обеспечения наиболее успешного функционирования промышленного предприятия философия НДТ должна стать неотъемлемым элементом интегрированной системы менеджмента предприятия. В таком случае осуществляется эффективное принятие управленческих решений, позволяющих развивать конкурентоспособное предприятие с высоким качеством продукции, низкой себестоимостью, а также соблюдать установленные требования в части ресурсной и экологической эффективности и следовать современным тенденциям. Все аспекты, связанные с основным технологическим процессом производства продукции, должны быть описаны в системе менеджмента качества и управляться с помощью НДТ.

### 3.3 Алгоритм методики сравнительного анализа производств для целей внедрения ресурсоэффективных технологий с применением эксергетического анализа

Общий алгоритм методики сравнительного анализа включает расчёт перечисленных выше показателей (ресурсной эффективности, углеродоёмкости, технологических показателей), а также расчёт

термодинамических параметров производственной системы (эксергетического КПД).

Технологии сравниваются между собой путём сопоставления значений ключевых показателей, а также проводится сравнение с показателями лучших доступных технологий для данного вида производства (при наличии).

На рисунке 3.3.1 представлен алгоритм расчёта и далее подробно описан алгоритм расчёта каждого структурного элемента.



Рисунок 3.3.1 – Система показателей НДТ (составлено автором)

*Показатели ресурсной эффективности.* Для определения показателей ресурсной эффективности предложено в качестве единого научно обоснованного стандартизированного инструмента, позволяющего оценивать и комплексно управлять предложенной системой показателей НДТ, использовать эксергетический метод анализа.

Эксергетический анализ позволяет количественно оценить и сопоставить качественно различные виды ресурсов, определить минимально необходимые и фактические энергетические затраты на осуществление

технологических процессов, выявить нерациональные затраты, оценить факторы воздействия на окружающую среду, а также оценить степень зрелости технологии и возможности управления различного рода показателями [127]. Инструментарий для оценки «зрелости» решений по развитию промсборки с точки зрения их вклада в конкурентоспособность конечной продукции через призму СМК разработан Клентак А. С., Козловским В. Н. и др. [56]. Это позволяет компаниям объективно ранжировать и выбирать наиболее эффективные проекты модернизации.

Данный метод основан на первом и втором законах термодинамики и применим для любых технологических процессов, в которых присутствуют химические превращения, что говорит об универсальности метода. Технологический процесс рассматривается как «чёрный ящик» с входными (материальные, энергетические ресурсы) и выходными параметрами (рисунок 3.3.2).

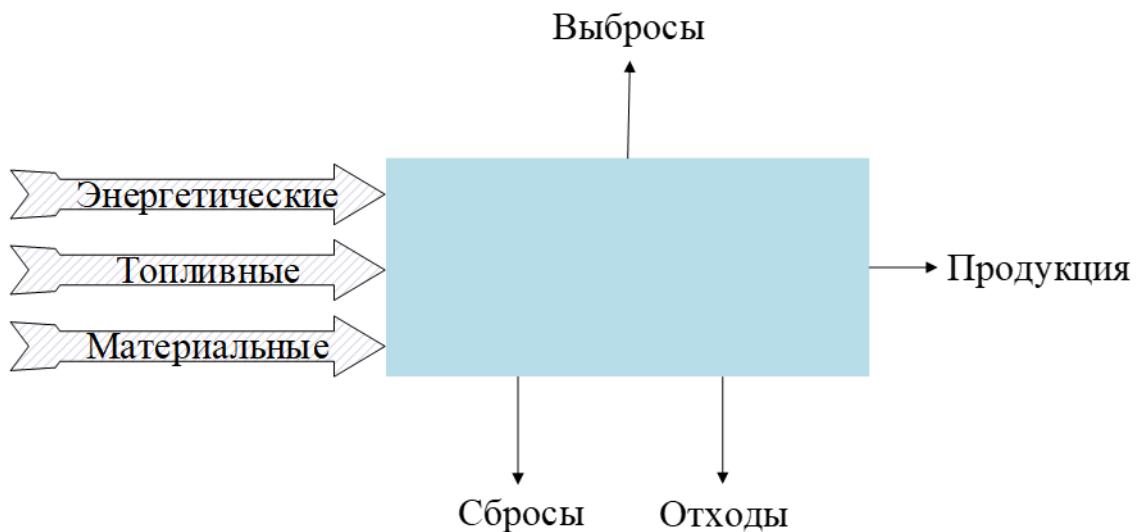


Рисунок 3.3.2 – Входные и выходные потоки технологии, представленные в общем виде (составлено автором)

Внутренний термодинамический коэффициент полезной работы рассматривается в качестве важнейшей составляющей, которая характеризует эффективность использования энергии (термодинамическое совершенство

процесса) и отвечает на вопросы о теоретической возможности и практической целесообразности повышения эффективности процесса.

Алгоритм методики сравнительного анализа производств для целей внедрения ресурсоэффективных технологий с применением эксергетического анализа представлен на рисунке 3.2.1 и ниже описан подробнее.

Основные этапы определения уровня развития производственного процесса следующие:

- определение входных и выходных потоков производственного процесса в установленных границах термодинамической системы, определяется химическое уравнение производства основной продукции;
- для каждой статьи баланса приводится значение химической эксергии [127];
- расчёт КПД эксергии как единого показателя, который характеризует эффективность технологического процесса и представляет собой отношение полезной работы и полной работы совершающей системой:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\sum E_{\text{затр}}}{\sum E_{\text{полн}}}, \quad (3.3.1)$$

где  $\sum E_{\text{полн}}$  – полная работа, совершающаяся системой;

$\sum E_{\text{затр}}$  – работа, которая затрачивается на производство основной продукции;

- построение модели идеализированного аналога, исходя из следующих принципов:
  - в идеализированном процессе используется сырьё из химически чистых соединений и получается химически чистый продукт;
  - потери материалов отсутствуют, реакции протекают при стехиометрических количествах реагирующих веществ и идут до конца;
  - температура потребляемых и отдаваемых веществ принимается равной температуре окружающей среды;
  - тепло реакций отводится во внешнюю среду при той же температуре.

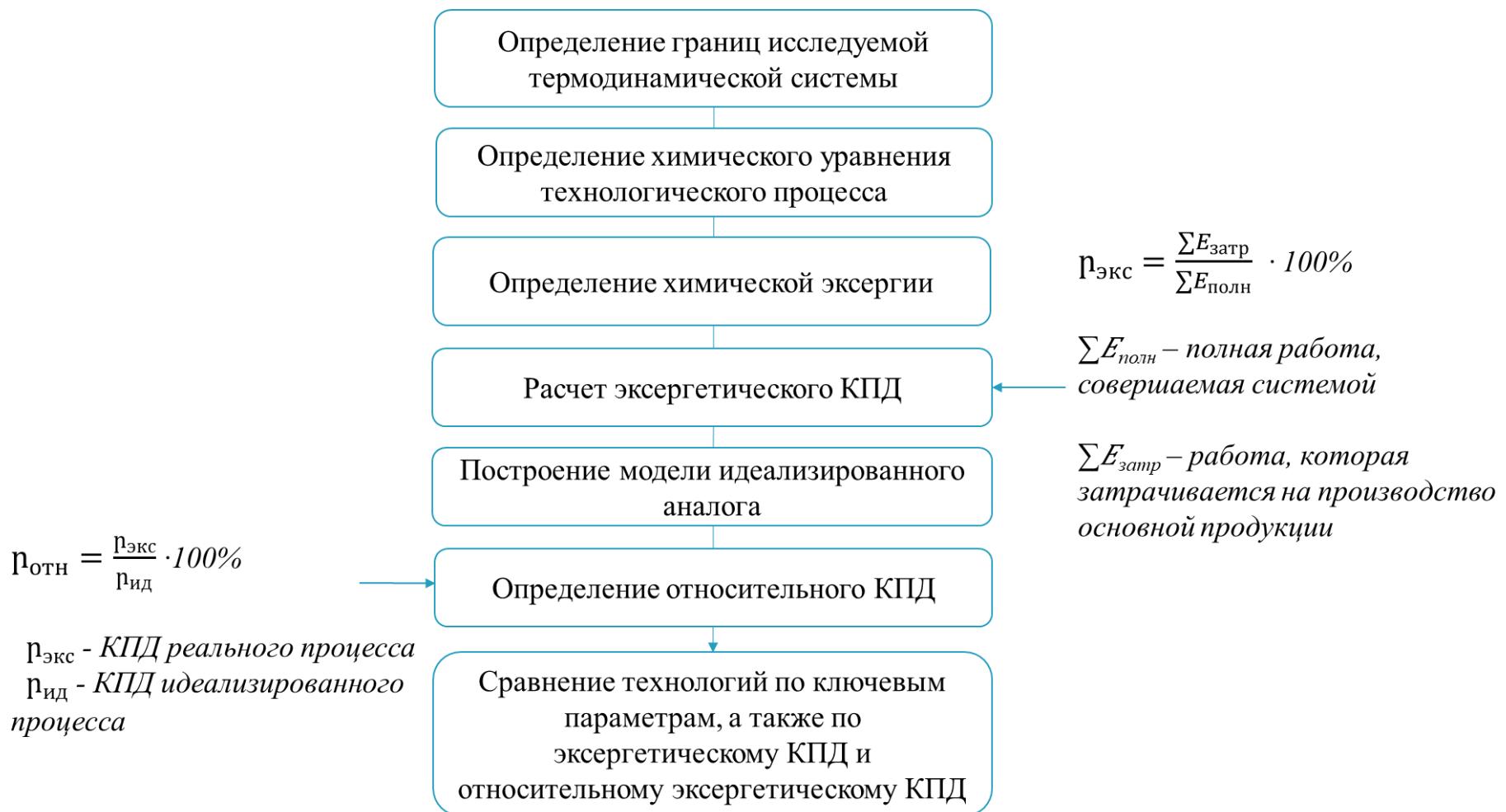


Рисунок 3.3.3 – Алгоритм методики определения показателей ресурсной эффективности с применением эксергетического анализа (составлено автором)

В случае если идеализированный аналог технологии не удается определить, используется идеальный аналог технологии, КПД которого равен 1 (100%).

– определение относительного КПД по формуле:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta_{\text{экс}}}{\eta_{\text{ид}}} , \quad (3.3.2)$$

где  $\eta_{\text{экс}}$  – эксергетический КПД реального процесса;

$\eta_{\text{ид}}$  – эксергетический КПД идеализированного процесса.

– определение ключевых показателей ресурсной эффективности, проводится сравнение технологий.

На рисунке 3.3.4 представлена общая концепция выбора идеального и идеализированного аналога производственного процесса.

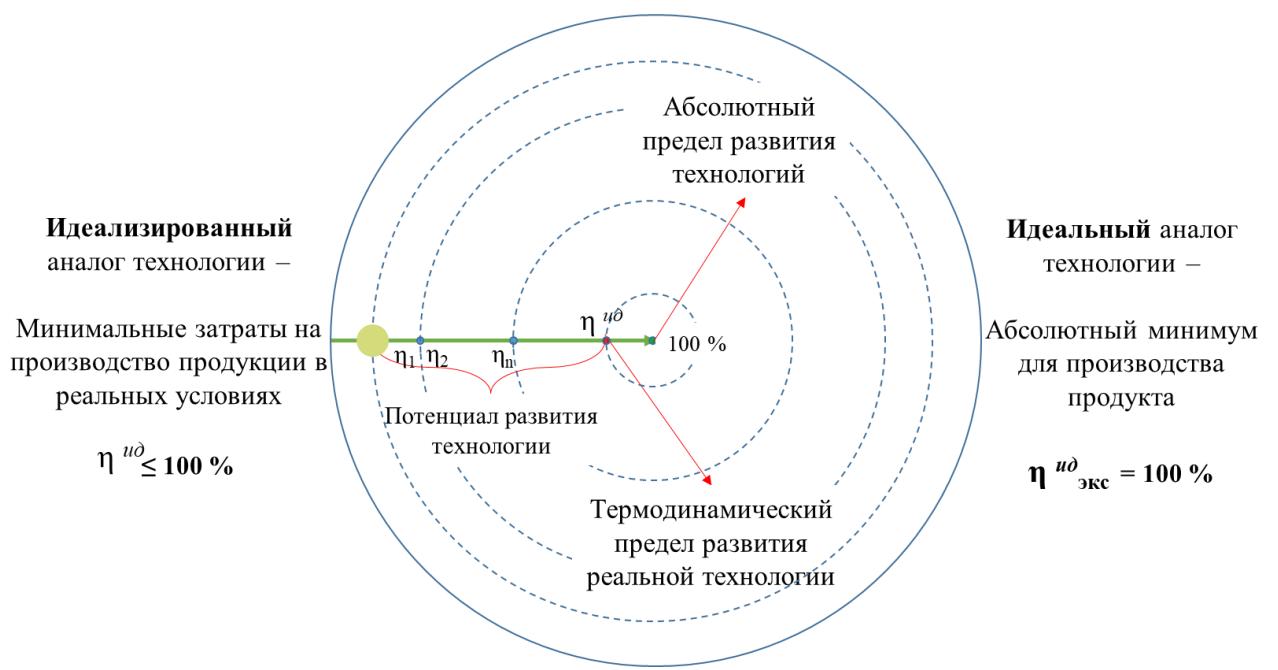


Рисунок 3.3.4 – Концепция определения идеального и идеализированного аналога технологии (составлено автором)

*Показатели углеродоёмкости.* Уровень углеродоёмкости технологического процесса зависит от многих факторов и параметров производственной системы. Существенное влияние оказывают используемые ресурсы, в первую очередь топливные. Вклад различных видов энергоресурсов в углеродоёмкость существенно различается – значительный выброс парниковых газов наблюдается от сжигания ископаемого топлива. Материальные ресурсы также привносят различное количество углерода в процесс (например, железная руда, анодная масса, чугун). Использование сырья с меньшим содержанием примесей и предварительная обработка (обогащение) снижают потребность в дополнительных затратах энергии и уменьшают выбросы [174].

Интенсивность выбросов напрямую зависит от структуры энергопотребления и доли возобновляемых источников энергии. В отраслях с преобладающим углеводородным энергобалансом наблюдается повышенный уровень углеродоёмкости производств.

Важен учёт параметров проведения самого технологического процесса. В металлургии типы и режимы печей отличаются по энергоёмкости и соответственно выбросам. Использование вторичных ресурсов снижают выбросы парниковых газов, например, побочных газов в качестве топлива. Однако в этом случае также существуют свои методические нюансы по учету такого вида ресурсов, которые следует принимать во внимание.

Таким образом, оптимизация технологических процессов металлургического производства (от выбора сырья и типа печей до управления энергетическими процессами и вторичными ресурсами) – ключевое направление снижения углеродоёмкости.

Углеродоёмкость процесса оценивается через единый показатель – выбросы CO<sub>2</sub>-эквивалента, все типы парниковых газов приводятся к нему.

Алгоритм методики определения показателей углеродоёмкости представлен на рисунке 3.3.5.

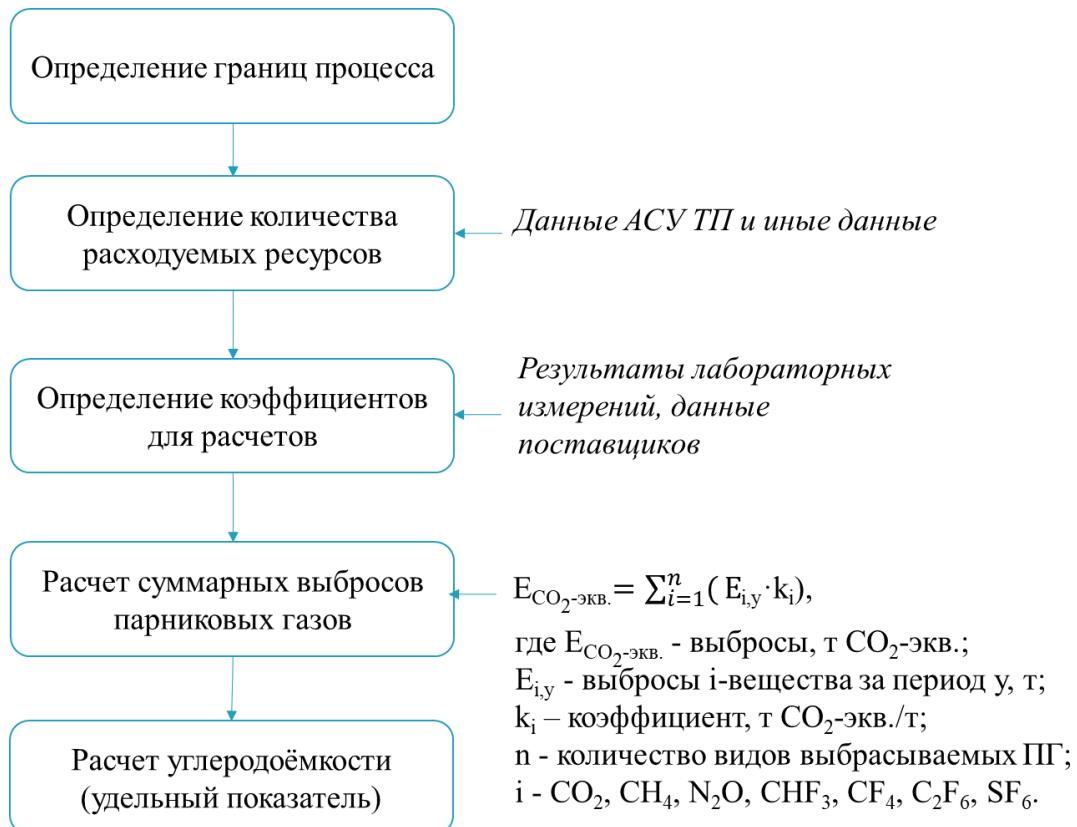


Рисунок 3.3.5 – Алгоритм методики определения показателя углеродоёмкости производства (составлено автором)

Расчёт показателей климатической эффективности производится поэтапно:

- 1) определяются границы количественного определения выбросов, в которые включаются прямые выбросы парниковых газов непосредственно от осуществляемых процессов;
- 2) формируется методика и коэффициенты для расчёта, где к источникам данных при определении коэффициентов относятся утвержденные национальные и международные методики, результаты регулярных лабораторных исследований, данные поставщиков ресурсов, иные данные;
- 3) производится расчёт суммарных выбросов парниковых газов.

Суммарные выбросы парниковых газов по категориям источников в целом рассчитываются с учетом потенциалов глобального потепления парниковых газов и выражаются в единицах CO<sub>2</sub>-эквивалента.

Значения потенциалов глобального потепления парниковых газов определяется в соответствии с [107].

#### 4. Расчёт удельного показателя (на тонну произведенной продукции).

*Технологические показатели.* Вещества обладают различной токсичностью, разным воздействием на человека и окружающую среду, поэтому сложение их валовых (физических) масс нельзя считать достаточным для оценки реального вреда.

В целях унификации и стандартизации процесса определения технологических показателей предложено расчёт приводить к определённым стандартным условиям. Фактические выбросы загрязняющих веществ приводятся к эквивалентной (приведённой) массе, учитывающей его действие и содержание в составе выбросов по отношению к базовому (стандартному) веществу). Стандартное вещество принимается за «единицу токсичности»; в СССР (позднее – в Российской Федерации) таким веществом был признанmonoоксид углерода (CO), ПДК которого в воздухе селитебных зон составляла 1 мг/м<sup>3</sup>. В данном случае используется параметр токсичности (вредности) веществ – метод приведения по предельно допустимой концентрации (ПДК) вещества в воздухе, которая не вызывает вреда для здоровья человека при длительном воздействии. Чем меньше ПДК, тем опаснее вещество [111,34,168].

Алгоритм определения технологических показателей показан на рисунке 3.3.6.



Рисунок 3.3.6 – Алгоритм определения технологических показателей (составлено автором)

1) На первом этапе производится составление перечня веществ, присутствующих в эмиссиях, определение валовых показателей в границах технологического процесса, а также расчёт вклада каждого загрязняющего вещества в суммарную приведённую массу общего выброса.

Приведённая масса загрязняющего вещества представляет собой произведение физической массы загрязняющего вещества, поступающего в окружающую среду за отчётный период, и коэффициента относительной опасности данного загрязняющего вещества.

В качестве основы для расчётов приведённой массы используются утверждённые значения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ [103]. С помощью ПДК определяются коэффициенты опасности загрязняющих веществ (рассчитывается как величина, обратная ПДК:  $=1/\text{ПДК}$ ).

2) Определяется вклад конкретного вещества в суммарную приведённую массу выброса рассматриваемого производственного процесса.

3) Формируется итоговый перечень. Сумма приведённых масс веществ образует более 95 % от суммарной приведённой массы общего выброса, вклад конкретного вещества не менее 1% от суммарного выброса.

Методика позволяет определить перечень загрязняющих веществ для выбросов в атмосферу от промышленных источников при производстве продукции, характеризующих применяемые технологии, особенности производственного процесса.

*Методика интегральной оценки и сравнения технологий. Взвешенная аддитивная модель интегральной оценки технологий.*

Оценка технологического процесса проводится по каждому показателю в отдельности:

- для показателей ресурсной эффективности (ПР) – по каждому виду ресурса;
- для углеродоёмкости (ПУ) по общему показателю выбросов парниковых газов в единицах  $\text{CO}_2\text{-экв.}$ ;

- для технологических показателей (ТП) – по каждому загрязняющему веществу.

*Интегральный показатель.* Для управления системой показателей НДТ, а также для комплексной оценки эффективности организации основного технологического процесса производится расчёт интегрального показателя (ИП) – итогового балла по системе показателей [35]:

Для проведения сравнительного анализа рассматриваемых технологий используется система частных показателей, отражающих ключевые аспекты их функционирования: ПР, ПУ и ТП. Указанные показатели формируют вектор оценок, позволяющий получить количественную характеристику каждой технологии.

Пусть задано множество анализируемых технологий:  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ .

Для каждой технологии  $t_j$  вводится набор частных показателей  $X = \{\text{ПР}, \text{ПУ}, \text{ТП}\}$ , каждому из которых сопоставляется дискретная функция оценки  $f_i(t_j)$ , определяемая следующим образом:  $f_i : T \rightarrow D_{i..}$ .

В случае достижения по показателям ПР и ТП установленных требований (уровень НДТ) технологии присваивается 1 балл, для каждого показателя ресурсной эффективности, который на 10 и более процентов эффективнее показателей НДТ, присваивается дополнительно 2 балла. В случае достижения верхнего уровня показателей выбросов парниковых газов присваивается 1 балл, нижнего уровня – дополнительно 2 балла. В случае если исключается выброс хотя бы одного ЗВ присваивается дополнительно ещё 1 балл (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Порядок присвоения баллов представлен в таблице

Наименование показателя технологии	Основной критерий	Балл	Дополнительный критерий	Балл
Показатели ресурсной эффективности (ПР)	Достижение показателей НДТ	1	Для каждого показатели ( $PR_i$ ), который эффективнее НДТ более чем на 10%	2
Показатель углеродоёмкости (ПУ)	Достижение показателей НДТ	1	Эффективнее нижнего установленного уровня	2
Технологические показатели (ТП)	Достижение показателей НДТ	1	Исключение выброса хотя бы одного вещества	1

Таким образом, результаты оценки и сопоставления характеристик технологий будут выражены единым интегральным показателем, который отражает взвешенное соотношение нескольких ключевых параметров [35].

Технологические процессы сравниваются между собой с применением балльной системы. Методике балльной оценки качества деятельности посвящено исследование Шахова Н. Р., Козловского В. Н., Васина С. А. [135]. Ими предложен подход, позволяющий перевести качество услуг (техническое обслуживание, ремонт, клиентский сервис) в количественные, измеримые показатели, что облегчает сравнительный анализ, управление эффективностью и стимулирование повышения стандартов работы в данной отрасли. Для наилучшей (наилучших) технологий приводится информация об эффекте, который возможно достичь при их внедрении, выраженном в натуральных единицах.

Области допустимых значений для каждого вида показателя:  $D_{PR} \in \{0,1,3\}$ ;  $D_{PU} \in \{0,1,3\}$ ;  $D_{TP} \in \{0,1,2\}$ .

Значение функции  $f_i(t_j)$  характеризует уровень соответствия технологии  $t_j$  требованиям управления качеством организации производства по  $i$ -му показателю.

Для агрегирования частных показателей в единый интегральный критерий применяется аддитивная модель, в рамках которой интегральный

показатель эффективности организации технологии ( $t_j$ ) определяется следующим образом:

$$\text{ИП}(t_j) = \sum_{i=1}^n f_i(t_j), \quad (3.3.6)$$

где  $n=3$  – количество показателей (ПР, ПУ, ТП);

$f_i(t_j)$  – значение  $i$ -го показателя для технологии  $t_j$

*Взвешенная аддитивная модель интегральной оценки технологий.*

Показатели оценки технологий разделяются на входные параметры (ресурсная эффективность ПР) и выходные (ПУ и ТП). Показатель ПР характеризует эффективность использования материальных, энергетических и топливных ресурсов и оказывает влияние на значения показателя углеродоёмкости производства и показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. На показатели углеродоёмкости, помимо используемых ресурсов, также значительное влияние оказывают параметры технологического процесса (температура, давление, анодные эффекты). Целесообразно добавить в модель для показателей весовые коэффициенты.

В этой связи интегральный показатель технологии  $t_j$  определяется на основе взвешенной аддитивной модели, которая представляется в следующем виде:

$$\text{ИП}(t_j) = \sum_{i=1}^n k_i f_i(t_j) \quad (3.3.7)$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -го показателя

*Обоснование границ интервалов и использование результатов оценки в управленческих решениях.* Показатель ресурсной эффективности рассматривается как базовый (первичный) фактор, показатели углеродоёмкости и технологические показатели как результирующее (выходное) воздействие. Примем весовой коэффициент для показателя ПР равный 2 для ПУ 1 и 0,5 для ТП.

Максимальный вклад показателей в ИП: ПР:  $3 \cdot 2 = 6$  баллов (60 %); ПУ:  $3 \cdot 1 = 3$  балла (30 %); ТП:  $2 \cdot 0,5 = 1$  балл (10 %).

Таким образом, эффективность использования ресурсов определяет базовые характеристики технологии; углеродоёмкость отражает совокупный климатический эффект, учитывая, как входные потоки, так и параметры осуществления самого технологического процесса; технологические показатели уточняют экологическую результативность, не доминируя в итоговой оценке.

В рамках разрабатываемой методики интегральной оценки ресурсная эффективность (ПР) рассматривается как показатель, отражающий входные характеристики технологии и определяющий потенциальный уровень её экологической и климатической результативности.

В отличие от показателей углеродоёмкости и технологических характеристик, которые представлены одним агрегированным показателем, показатель ПР формируется на основе совокупности частных показателей, характеризующих различные аспекты использования различного вида ресурсов.

Между показателями возникает принципиальное методическое различие: ПР – многокомпонентный базовый показатель, включающий несколько частных показателей; ПУ и ТП – результирующие показатели, представленные единичными значениями.

Учитывая, что для ПР могут быть выделены для сравнения несколько видов различного рода ресурсов:

$$f_{\text{пр}}^{\text{сред}}(t_j) = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{пр},i}(t_j)}{n_{\text{пр}}} \quad (3.3.8)$$

$$f_{\text{пр},i}(t_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_i^{\text{тех}} \leq f_i^{\text{НДТ}} \\ & \text{дополнительно: 2, если } f_i^{\text{тех}} \leq 0,9 \cdot f_i^{\text{НДТ}} \\ & 0, \text{ если } f_i^{\text{тех}} \geq 0,9 \cdot f_i^{\text{НДТ}} \end{cases} \quad (3.3.9)$$

Итоговая формула для расчёта ИП с учетом принятых коэффициентов  $k_i$  будет выглядеть следующим образом:

$$\text{ИП}(t_j) = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{пр}}} f_{\text{пр},i}(t_j)}{n_{\text{пр}}} + 1 \cdot f_{\text{ПУ}}(t_j) + 0,5 \cdot f_{\text{ТП}}(t_j) \quad (3.3.10)$$

Диапазон возможных значений интегрального показателя ИП( $t_j$ ) определяется совокупностью допустимых значений частных показателей и составляет:

$$0 \leq \text{ИП}(t_j) \leq 10$$

Выбор диапазон интервалов значений выполнен с учётом следующих факторов:

1. Минимально допустимый уровень эффективности.

Значения ИП  $\in [0;3]$  соответствуют ситуациям, при которых технология не набирает существенного количества баллов ни по одному из ключевых показателей либо демонстрирует положительное значение только по одному из них. В этом случае совокупный эффект от применения технологии является недостаточным для её практического использования.

2. Промежуточный (условно приемлемый) уровень.

Интервал ИП  $\in [3;6]$  отражает технологии, обладающие частично выраженным преимуществами. Данный диапазон включает комбинации показателей, при которых технология демонстрирует удовлетворительные значения по одному или двум критериям, однако не обеспечивает устойчиво высокого уровня по всей совокупности показателей.

3. Высокий уровень интегральной эффективности.

Значения ИП  $\in [6; 10]$  соответствуют технологиям, набирающим высокий суммарный балл за счёт положительных значений большинства частных показателей. Такие технологии характеризуются сбалансированностью и высокой степенью соответствия установленным требованиям.

Выбранные границы интервалов обеспечивают логичное разделение технологий на группы, различающиеся по степени их практической

применимости, и позволяют избежать чрезмерной детализации при интерпретации результатов. Использование интегрального балла позволяет формализовать процесс принятия управленческих решений в отношении рассматриваемых технологий. Соответствие уровней интегральной оценки возможным управленческим действиям представлено в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 – Интерпретация значений интегрального показателя (составлено автором)

Значение ИП	Уровень интегрального показателя	Интерпретация	Управленческое решение
$0 \leq \text{ИП} < 3$	Низкий	Технология характеризуется низкими значениями по большинству показателей и обладает ограниченной практической применимостью	Признание технологии нецелесообразной для внедрения в текущих условиях
$3 \leq \text{ИП} < 6$	Средний	Технология демонстрирует приемлемые значения по отдельным показателям, однако требует доработки или имеет ограничения в применении	Доработка технологии, либо ограниченное применение в отдельных сценариях
$6 \leq \text{ИП} \leq 10$	Высокий	Технология обладает высокими значениями по совокупности показателей и может рассматриваться как предпочтительная для внедрения	Рекомендация к внедрению и масштабированию, включение в перечень приоритетных технологий

В рамках разрабатываемой методики интегральный показатель оценки эффективности технологии определяется в диапазоне от 0 до 10. Выбор указанной шкалы обусловлен методическими, интерпретационными и прикладными соображениями.

Во-первых, десятибалльная шкала позволяет задать фиксированную верхнюю границу интегрального показателя без применения процедур нормирования. С учётом дискретных областей допустимых значений частных показателей  $\{0,1,3\}$ ,  $\{0,1,2\}$  использование шкалы 0–10 обеспечивает строгую согласованность между максимальными значениями показателей и их

весовыми коэффициентами, что позволяет аналитически задать условие достижения предельного значения интегральной оценки.

Во-вторых, выбранная шкала обеспечивает интерпретационную прозрачность результатов. Значения интегрального показателя могут быть напрямую соотнесены с качественными уровнями оценки технологии, что упрощает анализ и интерпретацию без привлечения дополнительных преобразований или пояснений.

В-третьих, диапазон 0–10 является методически удобным для принятия управлеченческих решений, поскольку допускает естественное разбиение на интервалы, соответствующие различным уровням целесообразности внедрения технологии. В отличие от нормированных шкал, десятибалльная шкала не воспринимается как абстрактная величина и может быть использована в сравнительном анализе альтернативных технологий.

Наконец, выбор данной шкалы обеспечивает согласованность с принятой системой весовых коэффициентов, определяемых исходя из предельного вклада каждого показателя в интегральный результат и их причинно-следственной роли в формировании общей эффективности технологии. Таким образом, десятибалльная шкала является минимально достаточной и методически обоснованной для решения задач настоящего исследования.

Введённая градация позволяет упростить процедуру интерпретации результатов расчёта интегрального балла, а также использовать полученные значения для классификации и ранжирования технологий по уровню их эффективности.

Алгоритм присвоения баллов и расчёта интегрального показателя представлен на рисунке 3.3.6.

Предложенная система интерпретации значений интегрального балла позволяет не только проводить количественное сравнение технологий, но и непосредственно использовать результаты оценки в процессе принятия управлеченческих решений, обеспечивая их обоснованность и прозрачность.

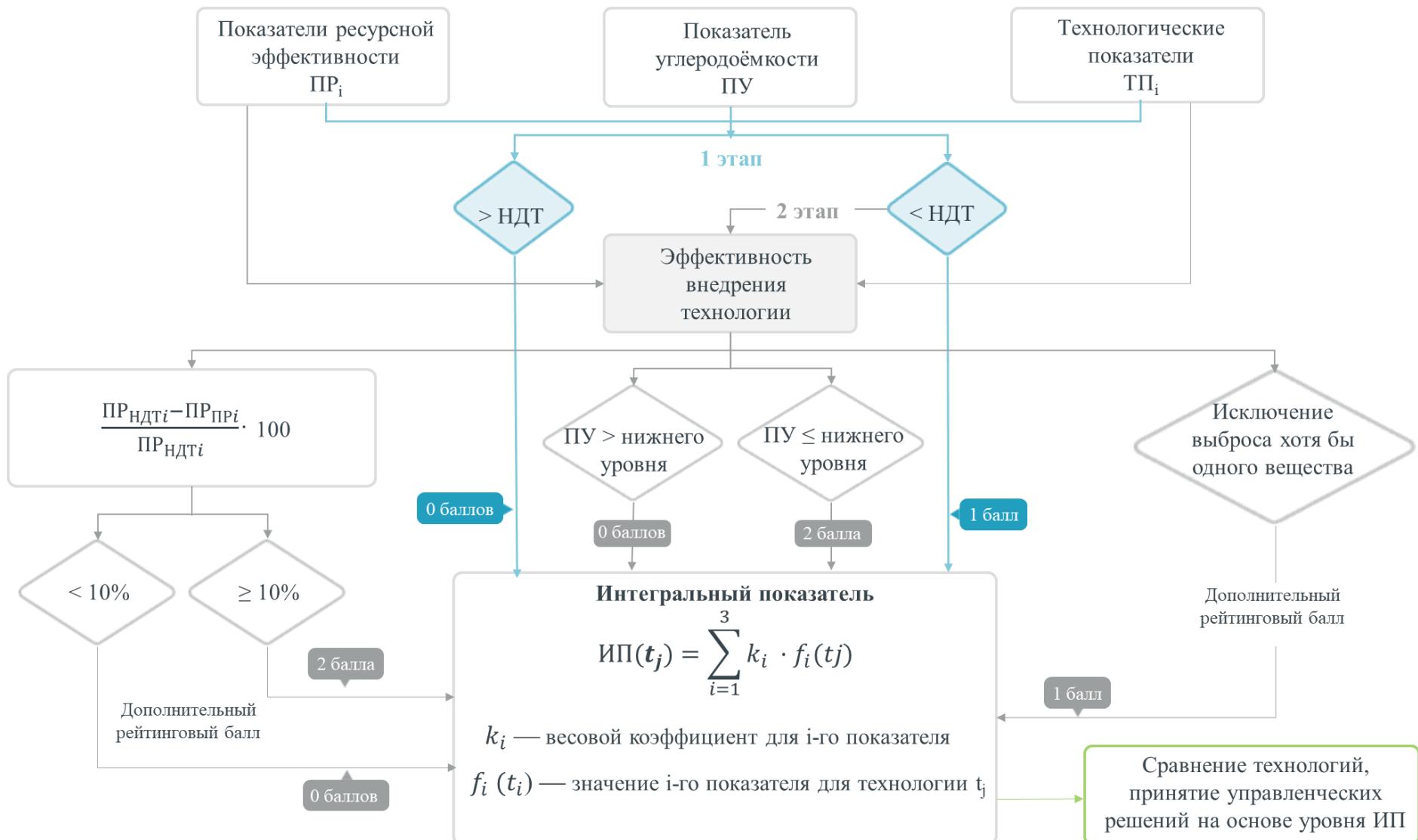


Рисунок 3.3.7– Алгоритм определения интегрального показателя технологии (составлено автором)

## Выводы по третьей главе

В процессе разработки стандартного инструментария управления ресурсной эффективностью металлургического производства на основе наилучших доступных технологий сделаны следующие выводы:

1. В целях стандартизации показателей оценки уровня ресурсной эффективности технологий в контексте концепции НДТ проведён анализ современного уровня развития наилучших доступных технологий в цветной металлургии.

2. Систематизированы основные направления внедрения НДТ: внедрение НДТ в целях повышения ресурсной эффективности производства (модернизация основной технологии, вовлечение вторичных ресурсов (материальных, энергетических) в экономический оборот); организационные мероприятия (совершенствование системы менеджмента качества и других систем менеджмента, их интегрирование), автоматизация технологических процессов и контроля их протекания.

3. Предложено для определения показателей ресурсной эффективности в качестве научно обоснованного стандартизированного инструмента, позволяющего оценивать и комплексно управлять системой показателей НДТ, использовать эксергетический метод анализа. Показано, что эксергетический анализ применим для оценки потерь и минимально необходимого расхода энергетических ресурсов, оценки степени зрелости технологий.

4. Разработана организационная модель процесса управления выбором ресурсоэффективных технологий металлургического производства на принципах концепций ТQM и НДТ, где управление производственной системой с целью решения задачи выбора ресурсоэффективных технологий осуществляется выделенной Дирекцией стратегического развития (ДСР) в рамках взаимодействия трёх подсистем: производства, энергетики, охраны окружающей среды. По результатам анализа ДСР принимает организационное решение о необходимости модернизации основной технологии предприятия с целью повышения ресурсной эффективности. Мониторинг и контроль

ресурсной эффективности производственной системы в рамках её модернизации осуществляется с применением как натурных измерений, так и математических моделей на основе зависимости между параметрами ПУ и ТП от ПР. Управление параметрами ресурсной эффективности позволяет контролировать выходные потоки и качество продукции.

5. Разработана методика комплексной оценки технической эффективности металлургического производства, включающая три взаимосвязанных алгоритма расчёта различного рода показателей. Предложен единый комплексный показатель для сравнения технологий – интегральный показатель эффективности внедрения технологий и алгоритм его расчёта.

6. Разработана взвешенная аддитивная модель интегральной оценки технологий, учитывающая различное влияние показателей на эффективность организации производственного процесса. Введена градация, позволяющая упростить процедуру интерпретации результатов расчёта интегрального показателя, а также использовать полученные значения для классификации и ранжирования технологий по уровню их эффективности для формализации процесса принятия управленческих решений в отношении рассматриваемых технологий.

## 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

### 4.1 Комплексная оценка уровня организации производства первичного алюминия в России

Алюминий производится путём электролитического восстановления оксида алюминия (глинозёма), растворенного в расплавленном электролите (криолите) при температуре приблизительно 960°С. Технологический процесс в электролизёре – это комплекс взаимосвязанных химических, физико-химических и физических процессов. В состав электролизёра входят углеродный катод, изолированный оgneупорными кирпичами по внутренней поверхности прямоугольного стального кожуха, и углеродные аноды, прикрепленные к электропроводящей анодной балке и погружённые в раствор. Электролизёры соединены последовательно и образуют серию. Постоянный ток подается с анодов через электролит и слой металла на катод, а затем – по комплекту проводников, известных как «ошиновка», на следующий электролизёр [16].

В процессе электролиза кислород из глинозёма реагирует с углеродным анодом и образует диоксид углерода и монооксид углерода. Таким образом, в ходе этого процесса происходит непрерывный расход углеродных анодов.

Основным сырьём для получения алюминия служат: глинозём, фтористые соли (криолит, фтористый алюминий) и обожжённые аноды или анодная масса (рисунок 4.1.1).

В настоящее время применяются следующие технологии электролиза:

- технология производства алюминия на электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами (технология электролиза ОА);

- технология производства алюминия на электролизерах с самообжигающимися анодами (или электролизеры Содерберга).

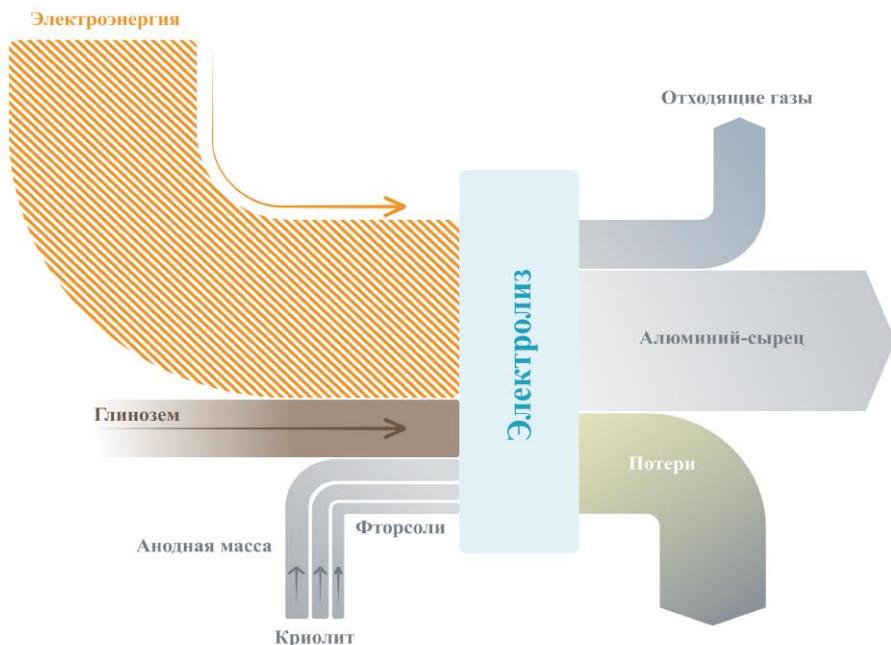


Рисунок 4.1.1 – Принципиальная схема процесса производства первичного алюминия [127]

Электролизёры с самообжигающимися анодами различаются также по принципу подвода тока к аноду, с боковыми и верхними токоотводами (технологии электролиза БТ и ВТ соответственно). Разработкой более новой конструкции электролизёров ВТ, отличающейся большей экологичностью, является проект «Создание экологически приемлемой и конкурентоспособной технологии электролиза с анодом Содерберг» (проект «ЭкоСодерберг»).

Электролизёры ОА отличаются от рассмотренных выше электролизёров ВТ и БТ конструкцией анодного устройства. Обычно электролизёры ОА имеют многоблочный анодный массив. Число анодных блоков зависит от их размеров.

Анодами служат формированные и прессованные угольные блоки, обожжённые в печах при конечной температуре 1100–1200 °C.

В рамках проведения оценки уровня организации производств будем рассматривать следующий набор технологий:

- рядовая технология электролиза с верхним подводом тока (ВТ);
- электролиз в электролизёрах Содерберга с боковым подводом тока к аноду и шторными укрытиями (БТ);
- электролиз в электролизёрах с верхним подводом тока к аноду по технологии «Экологический Содерберг» (ЭкоСодерберг»);
- электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения мощностью до 300 кА (ОА мощностью до 300 кА);
- электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения мощностью 300 кА и выше (ОА мощностью более 300 кА).

Производительность по каждой технологии производств первичного алюминия приведена в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Производство алюминия по различным технологиям (систематизировано автором по данным предприятий)

Наименование технологии	Производительность, тонн алюминия
Рядовая технология ВТ	1007167
Электролиз в электролизерах Содерберга с боковым подводом тока к аноду (БТ) и шторными укрытиями	63882
Электролиз в электролизерах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг»)	2472732
Электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)	774061
Электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)	376135

Объединённая компания «Русал» (ОК Русал) – российская компания, один из крупнейших в мире производителей алюминия и глинозёма, единственный производитель первичного алюминия в России. В рамках анализа ресурсной эффективности производств первичного алюминия рассматриваются следующие предприятия ОК РУСАЛ: Красноярский алюминиевый завод; Братский алюминиевый завод; Иркутский алюминиевый

завод; Новокузнецкий алюминиевый завод; Волгоградский алюминиевый завод; Тайшетский алюминиевый завод; Богучанский алюминиевый завод; Саяногорский алюминиевый завод.

Определён перечень входных и выходных потоков технологического процесса на примере технологии «ЭкоСодерберг» (таблица 4.1.2).

Таблица 4.1.2 – Входные и выходные потоки технологии «ЭкоСодерберг» (составлено автором)

Статья баланса	Химическая формула
<b>Входной поток</b>	
Электроэнергия,	-
Глинозём	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , альфа
Анодная масса (анод, графит)	C
Криолит	$\text{Na}_3\text{AlF}_6$
Трифторид алюминия	$\text{AlF}_3$
Фторид кальция	$\text{CaF}_2$
<b>Выходной поток</b>	
Алюминий	Al
Азота диоксид (двуокись азота)	$\text{NO}_2$
Аммиак (азота гидрид)	$\text{NH}_3$
Углерод (пигмент чёрный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	C
Серы диоксид	$\text{SO}_2$
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	CO
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	-
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	-
Метан	$\text{CH}_4$
Бенз(а)пирен	$\text{C}_{20}\text{H}_{12}$
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	-
Смолистые вещества (возгоны пека) в составе электролизной пыли выбросов производства алюминия	-
Тепловые потери	-

С применением алгоритмов, описанных в главе 3, для каждой технологии выделим ключевые вещества в выбросах – перечень веществ,

которые в большей степени характеризуют технологический процесс с точки зрения экологической эффективности. Рассмотрены среднеотраслевые данные по выбросам отходящих газов для каждой технологии. Для определения перечня веществ приняты следующие критерии:

- масса выбросов веществ должна составлять не менее 95%;
- вклад каждого отдельного вещества должен составлять не менее 1%.

Результаты расчёта по технологиям приведены в приложении А. Выделен следующий ключевой набор веществ в выходящем потоке, в большей степени характеризующий технологический процесс: диоксид серы, фториды, углерода оксид (монооксид), смолистые вещества, включая бенз(а)пирен. В дальнейшем смолистые вещества включаются в одну группу с бенз(а)пиреном, фтористый водород и фториды плохо растворимые также рассматриваются суммарно. Смолистые вещества не характерны (отсутствуют) для технологий ОА.

Основным источником энергии, потребляемой в электролитических процессах производства первичного алюминия в России, является электрическая энергия, полученная на гидроэлектростанциях.

Удельные расходы электрической энергии на 1 т производимого алюминия на российских заводах составляют от 13,2 до 16,1 тыс. кВт\*ч. Разница в электропотреблении на различных заводах определяется особенностями используемой технологии (технология Содерберга или технология обожжённых анодов), конструкцией используемых электролизёров (с верхним или боковым токоподводом) и другими факторами.

Суммарный выброс парниковых газов в Российской Федерации по данным актуального Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2022 гг. в 2023 г. составил 2082,9 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (без учёта сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства), из них на долю отрасли цветной металлургии приходится 7,81 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (или 0,4 % от общего выброса и

7% выброса от металлургии в целом), в том числе 7,6 млн т СО<sub>2</sub>-экв. на сектор производства первичного алюминия (97,3 % от выбросов цветной металлургии) [94].

На основе подходов, описанных в главе 3, рассчитаны удельные показатели выбросов парниковым газам.

Количественная оценка выбросов ПГ выполнена для производственных процессов, приведенных в таблице 4.1.1.

Границы расчёта выбросов ПГ производства первичного алюминия включают количественную оценку прямых выбросов:

- перфторуглеродов (CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) в результате «анодных эффектов» (отклонение технологических параметров в электролизерах);
- диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) при использовании анодной массы и предварительно обожжённых анодов в результате окисления углерода анодной массы и анодов в электролизерах.

В границы расчёта не включаются выбросы CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O от сжигания топлива для прокалки кокса, обжига анодов и вспомогательных процессов.

Для расчёта величины прямых абсолютных выбросов ПГ производства первичного алюминия принят единый методологический подход на основании утверждённых национальных нормативно-методических документов [106].

Исходными сведениями для расчёта прямых абсолютных выбросов ПГ были приняты данные 8 заводов, являющихся крупнейшими производителями первичного алюминия в Российской Федерации. Выбросы определялись за один полный календарный год. Общий алгоритм расчёта приведен на рисунке 4.1.2.

Расчёт прямых абсолютных выбросов перфторуглеродов (CF<sub>4</sub>) для каждого производственного процесса электролитического получения алюминия проводится по формуле:

$$E^{\text{ЭЛ}}_{\text{ПФУ}(CF_4)} = E^{\text{ЭЛ}}_{CF_4} * M_{Al}, \quad (4.2.1)$$

где  $E^{\text{ЭЛ}}_{\text{ПФУ (CF}_4)}$  – массовый выход  $\text{CF}_4$  от производственного процесса электролитического получения алюминия, т  $\text{CF}_4$ ;

$E^{\text{ЭЛ}}_{\text{CF}_4}$  – удельный выход  $\text{CF}_4$  от производственного процесса электролитического получения алюминия, т  $\text{CF}_4$  / т;

$M_{\text{Al}}$  – выпуск алюминия (электролитического), т/год.

Расчёт удельного выброса перфторуглеродов ( $\text{CF}_4$ ) от производственного процесса электролитического получения алюминия проводится по формуле:

$$E^{\text{ЭЛ}}_{\text{CF}_4} = S_{\text{CF}_4} * \frac{AEM}{1000}, \quad (4.2.2)$$

где  $E^{\text{ЭЛ}}_{\text{CF}_4}$  – удельный выброс  $\text{CF}_4$  от производства алюминия, т  $\text{CF}_4$  / т Ал.;

$S_{\text{CF}_4}$  – угловой коэффициент для  $\text{CF}_4$ , (кг  $\text{CF}_4$ /т Ал.) / (минуты анодного эффекта/ванно-сутки);

$AEM$  – минуты анодного эффекта на ванно-сутки, (минуты анодного эффекта/ванно-сутки).

При этом:

$$AEM = AEF * AED, \quad (4.2.3)$$

где  $AEF$  – средняя частота анодных эффектов за период, шт./ванно-сутки;

$AED$  – средняя продолжительность анодных эффектов за период, минут/шт.

Расчет прямых выбросов CO<sub>2</sub>-эквивалента при электролитическом получении алюминия

$$E_{CO_2 \text{ экв}}^{\text{эл}} = M_{CO_2 \text{ экв}}^{\text{пфу}} - M_{CO_2}^{\text{содб}} \cdot M_{Al}$$

$$E_{CO_2 \text{ экв}}^{\text{эл}} = M_{CO_2 \text{ экв}}^{\text{пфу}} - M_{CO_2}^{\text{oa}} \cdot M_{Al}$$

Расчет удельного выброса CO<sub>2</sub> от электролизных корпусов, т/т Al

$$E_{CO_2}^{\text{содб}} = (P_{\text{ам}} - M_{\text{ам}}^{\text{H}} - M_{\text{ам}}^{SZ} - M_{\text{см}}^c - M_{\text{пыль}}^c - M_{\text{пена}}^c) \cdot \frac{44}{12} + E_{CO_2}^{\text{мо}}$$

$$E_{CO_2}^{\text{oa}} = (P_a \cdot \frac{100 - S_a - Z_a}{100} - M_{\text{пыль}}^c - M_{\text{пена}}^c) \cdot \frac{44}{12}$$

$E_{CO_2}^{\text{содб}}$  — удельный выброс CO<sub>2</sub> от электролизных корпусов, т/т Al

$M_{\text{ам}}^{\text{H}}$ ,  $M_{\text{ам}}^{SZ}$  — потери анодной массы с водородом, серой золой, т/т Al

$M_{\text{пыль}}^c$ ,  $M_{\text{пена}}^c$  — потери углерода с пылью, угольной пеной, т/т Al

$M_{\text{см}}^c$  — потери углерода со смолистыми веществами, т/т Al

$E_{CO_2}^{\text{мо}}$  — удельный выброс CO<sub>2</sub> при мокрой очистке отходящих газов содовым раствором, т/т Al

$\frac{44}{12}$  — стехиометрический коэффициент пересчета углерода в CO<sub>2</sub>

$E_{CO_2}^{\text{oa}}$  — удельный выброс CO<sub>2</sub> от электролизеров с обожженными анодами, т CO<sub>2</sub>/т Al

$P_a$  — расход обожженных анодов нетто, т/т Al

$S_a$  — содержание серы в обожженном аноде, %

$Z_a$  — содержание золы в обожженном аноде, %

Выбросы перфтторуглеродов от производства первичного алюминия

$$E_{CO_2 \text{ экв}}^{\text{пфу}} = (E_{CF_4} \cdot \PiGP_{CF_4} + E_{C_2F_6} \cdot \PiGP_{C_2F_6}) \cdot M_{Al}$$

$E_{CF_4}$  — массовый выброс CF<sub>4</sub> от производства алюминия, т CF<sub>4</sub>

$E_{C_2F_6}$  — массовый выброс C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> от производства алюминия, т C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>

$M_{Al}$  — выпуск алюминия (электролитического), т/год

$\PiGP_{CF_4}$  — потенциал глобального потепления для CF<sub>4</sub>

$\PiGP_{C_2F_6}$  — потенциал глобального потепления для C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>

Рисунок 4.1.2 – Алгоритм определения углеродоёмкости производства алюминия  
(составлено автором на основе [106])

Расчёт прямых абсолютных выбросов перфторуглеродов ( $C_2F_6$ ) для каждого производственного процесса электролитического получения алюминия проводится по формуле:

$$E^{\mathcal{P}L}_{\text{ПФУ} (C_2F_6)} = E^{\mathcal{P}L}_{C_2F_6} * M_{Al}, \quad (4.2.4)$$

где  $E^{\mathcal{P}L}_{\text{ПФУ} (C_2F_6)}$  – массовый выход  $C_2F_6$  от производственного процесса электролитического получения алюминия, т  $C_2F_6$ ;

$E^{\mathcal{P}L}_{C_2F_6}$  – удельный выход  $C_2F_6$  от производственного процесса электролитического получения алюминия, т  $C_2F_6 / t$ ;

$M_{Al}$  – выпуск алюминия (электролитического), т/год.

При этом расчёт удельного выброса перфторуглеродов ( $C_2F_6$ ) от производственного процесса электролитического получения алюминия проводится по формуле:

$$E^{\mathcal{P}L}_{C_2F_6} = E^{\mathcal{P}L}_{CF_4} * F_{C_2F_6/CF_4}, \quad (4.2.5)$$

где  $E^{\mathcal{P}L}_{C_2F_6}$  – удельный выход  $C_2F_6$  от производства алюминия, т  $C_2F_6/t Al$ ;

$F_{C_2F_6/CF_4}$  – весовая доля  $C_2F_6/CF_4$ , кг  $C_2F_6/\text{кг } CF_4$ .

Расчёт выбросов перфторуглеродов выполняется по отдельным корпусам электролиза с учётом применяемой технологии получения первичного алюминия.

Угловой коэффициент выбросов  $CF_4(SCF_4)$  зависит от используемой технологии получения первичного алюминия и технологических параметров производства. Предприятия могут самостоятельно определять значения углового коэффициента ( $SCF_4$ ) на основе выполненных инструментальных измерений.

Значение весового отношения  $C_2F_6$  к  $CF_4(FC_2F_6/CF_4)$  принимается в соответствии с данными для различных технологий производства первичного

алюминия. Организации могут самостоятельно определять значения весового отношения  $C_2F_6$  к  $CF_4$  ( $FC_2F_6/CF_4$ ) на основе выполненных инструментальных измерений.

Значения угловых коэффициентов и весового отношения  $C_2F_6$  к  $CF_4$  устанавливаются для отдельного предприятия и конкретной технологии производства первичного алюминия с актуализацией не менее 1 раза в пять лет или при существенных изменениях в технологии производства.

Средняя частота анодных эффектов (AEF) и средняя продолжительность анодных эффектов (AED) принимается по фактическим данным регистрации технологических параметров электролизных корпусов [31,60].

*Технология с самообжигающими анодами.* Расчёт потерь анодной массы в связи с содержанием в ней водорода осуществляется по формуле:

$$M^H_{am} = P_{am} * H_n / 100, \quad (4.2.6)$$

где  $M^H_{am}$  – потери анодной массы с водородом, т/т Al;

$H_n$  – содержание водорода в анодной массе, %.

Расчёт потерь анодной массы в связи с содержанием в ней серы и золы осуществляется по формуле:

$$M^{Sz}_{am} = P_{am} * (S_{am} + Z_{am}) / 100, \quad (4.2.7)$$

где  $M^{Sz}_{am}$  – потери анодной массы с серой и золой, т/т Al;

$S_{am}$  – содержание серы в анодной массе, %;

$Z_{am}$  – содержание золы в анодной массе, %.

Расчёт потерь углерода со смолистыми веществами осуществляется по формулам:

- *при наличии мокрой ступени газоочистки:*

$$M^c_{cm} = E^{\phi}_{cm}/1000 * W^c_{cm}/100 + P^e_{cm}/1000 * W^c_{cm}/100, \quad (4.2.8)$$

где  $M^c_{cm}$  – потеря углерода со смолистыми веществами, т/т Al;

$E^{\phi}_{cm}$  – выброс смолистых веществ через фонарь, кг/т Al;

$W^c_{cm}$  – содержание углерода в смолистых веществах, %.

$P^e_{cm}$  – удельное поступление смолистых веществ в ГОУ, кг/т Al;

– при наличии сухой газоочистки:

$$M^c_{cm} = P^{\phi}_{cm}/1000 * W^c_{cm}/100, \quad (4.2.9)$$

где  $M^c_{cm}$  – потеря углерода со смолистыми веществами, т/т Al.;

$P^{\phi}_{cm}$  – выброс смолистых веществ через фонарь, кг/т Al;

$W^c_{cm}$  – содержание углерода в смолистых веществах, %.

Расчёт потерь углерода с пылью осуществляется по формулам:

– при наличии мокрой ступени газоочистки:

$$M^c_{пыль} = E^{\phi}_{пыль}/1000 * W^c_{пыль}/100 + P^e_{пыль}/1000 * W^c_{пыль}/100, \quad (4.2.10)$$

где  $M^c_{пыль}$  – потери углерода с пылью, т/т Ал.;

$E^{\phi}_{пыль}$  – удельный выброс пыли через фонарь, кг/т Al;

$P^e_{пыль}$  – удельное поступление пыли в ГОУ, кг/т Al;

$W^c_{пыль}$  – содержание углерода в пыли, %;

– при наличии сухой газоочистки:

$$M^c_{пыль} = P^{\phi}_{пыль}/1000 * W^c_{пыль}/100, \quad (4.2.11)$$

где  $M^c_{пыль}$  – потери углерода с пылью, т/т Al;

$P^{\phi}_{пыль}$  – удельный выброс пыли через фонарь, кг/т Al;

$W^c_{пыль}$  – содержание углерода в пыли, %.

При определении удельного выброса пыли через фонарь учитывается эффективность укрытия электролизера и удельное поступление пыли в ГОУ.

Производство электролитического алюминия ( $M_{Al}$ ), включающего наработку первичного алюминия в электролизёрах за отчетный период, определяется организациями по корпусам электролиза в соответствии с утвержденными на предприятиях технологическими регламентами.

Удельный расход анодной массы ( $P_{am}$ ) за отчётный период принимается по фактическим данным, определенным по материальным балансам сырья. Содержание водорода в анодной массе ( $H_n$ ) определяется по данным, полученным в результате установленных в организации процедур, при отсутствии данных принимается 1,4%.

При расчёте потерь углерода со смолистыми веществами удельное поступление смолистых веществ в газоочистные установки ( $P^c_{cm}$ ) принимается по данным учёта выбросов, содержание углерода в смолистых веществах ( $W^c_{cm}$ ) принимается по данным лабораторного анализа, при отсутствии экспериментальных данных принимается равным 95%.

Содержание углерода в пене ( $W^c_{nena}$ ), удельное поступление диоксида серы ( $P_{SO_2}$ ) в газоочистные установки принимается по данным учёта выбросов.

*Технология с обожжёнными анодами.* Расчёт потерь углерода с пылью осуществляется по формуле:

$$M^c_{пыль} = P^{\phi}_{пыль}/1000 * W^c_{пыль}/100, \quad (4.2.12)$$

где  $M^c_{пыль}$  – потери углерода с пылью, т/т Al;

$P^{\phi}_{пыль}$  – удельное поступление пыли в ГОУ, кг/т Al;

$W^c_{пыль}$  – содержание углерода в пыли, %.

Расчёт потерь углерода с угольной пеной осуществляется по формуле:

$$M^c_{нена} = P^{вых}_{нена}/1000 * W^c_{нена}/100, \quad (4.2.13)$$

где  $M_{пена}^c$  – потери углерода с угольной пеной, т/т Al;

$P_{пена}^{вых}$  – выход угольной пены, кг/т Al;

$W_{пена}^c$  – содержание углерода в пене, %.

Удельный расход обожжённых анодов ( $P_a$ ) за отчетный период принимается по фактическим данным организаций, определённым по материальным балансам сырья.

Суммарные прямые абсолютные выбросы парниковых газов от электролитического получения алюминия приводятся к CO<sub>2</sub>-экв. с учетом потенциала глобального потепления для перфторметана (CF<sub>4</sub>), перфторэтана (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), который определяется в соответствии с перечнем ПГ, в отношении которых осуществляется государственный учёт и ведение кадастра [108].

Результаты расчёта удельных выбросов парниковых газов производственных процессов электролитического получения первичного алюминия представлены в таблице 4.1.3.

Таблица 4.1.3 – Результаты расчётов выходных энергетических потоков (парниковых газов) производственных процессов электролитического получения первичного алюминия (составлено автором)

Наименование технологии производства первичного алюминия	Выходные энергетические потоки (CO <sub>2</sub> -экв.)
Рядовая технология ВТ	2,54
Электролиз в электролизёрах Содерберга с боковым подводом тока к аноду (БТ) и шторными укрытиями	1,98
Электролиз в электролизёрах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг»)	2,54
Электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)	1,70
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)	1,48

Таким образом, рядовая технология ВТ наряду с технологией «ЭкоСодерберг» является наиболее ресурсоёмкой и углеродоёмкой, в первую очередь, из-за большего потребления электроэнергии. Соответственно, технологии  $OA < 300$  кА и  $OA > 300$  кА имеют больший потенциал ресурсосбережения за счёт меньшей энергоёмкости и являются приоритетными для организации производства алюминия.

#### 4.2 Стандартизация уровня ресурсоэффективности технологий получения алюминия

В производстве алюминия методом электролиза задействованы следующие материальные и энергетические ресурсы:

- глинозём;
- криолит;
- фторсодержащие соли;
- анодная масса;
- электроэнергия.

Учитывая то обстоятельство, что криолит и фторсодержащие соли незначительны по массе, а также имеют нулевую эксергию, основными параметрами производства принимаем следующие: глинозём, анодная масса, электроэнергия на входе в производственный процесс, на выходе алюминий и отходящие газы.

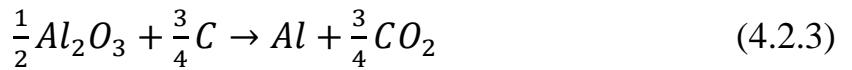
Для определения степени технологического совершенства – степень приближения КПД эксергии к теоретически возможным, составлен идеализированный аналог процесса; использованы подходы, описанные в главе 3.

Процесс электролиза протекает с одновременным получением СО и  $CO_2$  в количествах, близких к стехиометрическим, в соответствии с реакцией:



Минимальное значение затрат энергии определяется по формулам, представленным ниже, где  $n$  – число молей элемента, а  $h$  – энталпия образования элемента:

$$E_{in} = \sum(n_o \cdot h_0) - \sum(n_i \cdot h_i) \quad (4.2.2)$$



$$E_{in} = \frac{3}{4} \cdot (-393,52) - \frac{1}{2}(-1675,69) = 543 \text{ кДж на моль } Al \quad (4.2.4)$$

$$n = \frac{1\ 000\ 000}{26,98} = 3,70 \cdot 10^4 \text{ моль} \quad (4.2.5)$$

$$E_{in} = 543 \cdot 3,70 \cdot 10^4 = 20,1 \frac{\text{ГДж}}{\text{тAl}} \quad (4.2.6)$$

По результатам расчёта показано, что минимум затрат энергии равен 20,1 ГДж/т Al; это значение можно считать идеализированным аналогом.

Таблица 4.2.1 – Входные и выходные потоки идеализированной технологии производства алюминия (углеродный анод) (составлено автором на основе [127])

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,89	893,10	1,69
Анодная масса	C	0,44	32889,30	14,60
Энергия	–	–	–	20,10
Итого				36,39
Выходной поток				
Алюминий	Al	1,00	31023,00	31,02
Оксид углерода	CO	0,52	9202,20	4,77
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	0,82	0	0,00
Потери	–		–	0,60
Итого				36,39

Коэффициент полезного действия эксергии (КПД эксергии) представляет собой показатель, который характеризует эффективность технологического процесса и представляет собой отношение полезной работы и полной работы, совершающейся системой.

КПД эксергии определяется по формуле:

$$\eta_{\text{екс}} \frac{\sum E_{\text{затр}}}{\sum E_{\text{полн}}} * 100\%, \quad (4.2.7)$$

где  $\sum E_{\text{полн}}$  – полная работа, совершающаяся системой;

$\sum E_{\text{затр}}$  – работа, которая затрачивается на производство основной продукции.

КПД идеализированного процесса равен 85,2 %.

Развитие технологий находится на довольно высоком уровне. Поэтому для сравнения технологий в качестве эталона возьмём технологию с принципиально новым передовым элементом в ней – производство алюминия методом электролиза с инертным анодом. КПД такой технологии равен 94,8 % (таблица 4.2.2) [127].

Таблица 4.2.2 – Входные и выходные потоки идеализированного аналога технологии производства алюминия (инертный анод) [127]

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия, ГДж/т
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,89	893,10	1,69
Энергия	–	-	-	31,06
Итого				32,75
Выходной поток				
Алюминий	Al	1,00	31023,00	31,02
Кислород	O <sub>2</sub>	0,889	0	0
Потери	–		–	1,73
Итого				32,75

Расчёт эксергетического КПД и определение ключевых параметров ресурсной эффективности рассматриваемых технологий производства алюминия приведен в приложении Б.

Относительный КПД эксергии определяется по формуле:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta_{\text{экс}}}{\eta_{\text{ид}}} * 100\% \quad (4.2.8)$$

где  $\eta_{\text{экс}}$  – эксергетический КПД реального процесса;

$\eta_{\text{ид}}$  – эксергетический КПД идеализированного процесса

Результаты расчёта относительного КПД эксергии указанных выше технологий производства алюминия приведены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Результаты расчёта КПД эксергии технологий производства алюминия (составлено автором)

Технология	КПД процесса, %	КПД идеализированного аналога технологии, %	КПД относительный, %
Рядовая технология ВТ	41,17	94,80	43,43
Электролиз в электролизёрах Содерберга с боковым подводом тока к аноду (ВТ) и шторными укрытиями	42,30	94,80	44,62
Электролиз в электролизёрах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг»)	42,20	94,80	44,52
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)	46,27	94,80	48,81
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)	49,6	94,80	52,32

Показано, что более совершенные технологии производства первичного алюминия с точки зрения термодинамики процесса – это технологии производства с применением электролиза с предварительно обожжёнными анодами. Принятые границы и допущения, используемые в расчёте, описаны в главе 3.

Отметим, что технологии по эксергетическому КПД находятся на довольно близких уровнях, что может говорить о том, что для качественного перехода на другой уровень нужна принципиально новая технология производства.

В настоящее время для предприятий по производству первичного алюминия установлены обязательные для исполнения требования эмиссий на основе НДТ [105], а также целевые показатели ресурсной и климатической эффективности [55]. Такие показатели будем считать наилучшими доступными для отрасли в целом.

В таблице 4.2.4 приведена сводная информация по всем рассматриваемым технологиям и проведено сравнение с показателями НДТ.

Таблица 4.2.4 – Сводная таблица сравнения технологий производства алюминия по параметрам ресурсной эффективности (составлено автором на основе [55])

	ВТ	БТ	«ЭкоСодерберг»	ОА <300 кА	ОА>300 кА	Показатели НДТ
Показатели ресурсной эффективности (ПР)						
Расход электроэнергии, кВт*ч/т продукции	15700,00	15400,00	15280,00	14200,00	13200,00	16111,00
Расход Глинозема, т/т продукции	1,93	1,94	1,93	1,92	1,92	1,94
Расход анодной массы, т/т продукции	0,52	0,49	0,52	0,43	0,41	0,53
Технологические показатели (ТП)						
Смолистые вещества (включая бенз(а)пирен и другие ПАУ), кг/т	1,70	0,69	1,00	–	–	1,5
Серы диоксид, кг/т продукции	4,37	8,23	6,58	14,03	11,98	30
Фтористый водород, фториды плохо растворимые в пересчёте на фтор кг/т продукции	3,10	0,66	1,86	0,99	0,37	3,3
Углерода оксид, кг/т продукции	69,51	166,44	59,52	70,81	58,83	–
Показатель углеродоёмкости (ПУ)						
Выбросы парниковых газов, т СО <sub>2</sub> -экв./т продукции	2,54	1,98	2,51	1,70	1,48	1,97-2,51
Эксергетический анализ технологии						
КПД процесса, %	41,17	42,30	42,20	46,27	49,60	–
КПД идеализированного аналога технологии, %	94,80	94,80	94,80	94,80	94,80	–
КПД относительный, %	43,43	44,62	44,52	48,81	52,32	–

Применяя алгоритм балльной системы, описанный в главе 3, получаем распределение, представленное в таблице 4.2.5.

Таблица 4.2.5 – Интегральные показатели ресурсной эффективности производства алюминия по различным технологиям (составлено автором)

Наименование технологии	ПР, балл	ПУ, балл	ТП, балл	Интегральный показатель (ИП)
Рядовая технология ВТ	3	0	0	3,00
Электролиз в электролизёрах Содерberга с боковым подводом тока к аноду (ВТ) и шторными укрытиями	3	1	1	3,50
Электролиз в электролизёрах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг»)	3	1	1	3,50
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)	7	3	2	8,67
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)	7	3	2	8,67

В соответствии с принятой в разделе 3 методикой приведём для каждой технологии интерпретацию расчёта интегрального показателя.

При планировании и проведении дальнейшей модернизации производственных мощностей следует в первую очередь рассматривать технологии электролиза с предварительно обожжёнными анодами, которые характеризуются высокой эффективностью по всем сравниваемым показателям.

Таблица 4.2.6 – Интерпретация результатов расчёта интегрального показателя (составлено автором)

Наименование технологии	Значение ИП	Уровень интегрального показателя	Интерпретация	Управленческое решение
Рядовая технология ВТ	3,00	Низкий	Технология характеризуется низкими значениями по большинству показателей и обладает ограниченной практической применимостью	Признание технологии нецелесообразной для внедрения в текущих условиях
Электролиз в электролизёрах Содерберга с боковым подводом тока к аноду (ВТ) и шторными укрытиями	3,50	Средний	Технология демонстрирует приемлемые значения по отдельным показателям, однако требует доработки или имеет ограничения в применении	Доработка технологии, либо ограниченное применение в отдельных сценариях
Электролиз в электролизёрах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг»)	3,50			
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)	8,67	Высокий	Технология обладает высокими значениями по совокупности показателей и может рассматриваться как предпочтительная для внедрения	Рекомендация к внедрению и масштабированию, включение в перечень приоритетных технологий
Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)	8,67			

По результатам работы выделим следующие основные эффекты от внедрения технологий с обожжёнными анодами по сравнению с технологией

«ЭкоСодерберг» (при проведении модернизации производства с полной заменой технологии «Экосодерберг» на обожжённые аноды):

1. Снижение расхода энергетических ресурсов в производстве алюминия. Удельные энергозатраты будут снижены с 15280 кВт\*ч/т продукции до 13200–14200 кВт\*ч/т продукции. В валовом выражении среднее снижение расхода энергии составит 3 906,9 млн Вт\*ч / год (в соответствии с производительностью, представленной в таблице 4.2.7).

Таблица 4.2.7 – Полученный эффект от применения предложенных организационно-технических решений по организации выбора ресурсоэффективных технологий на примере производства первичного алюминия (составлено автором)

Наименование параметра производства	Организация производства до выбора НДТ (технология до модернизации «ЭкоСодерберг»)	Организация производства после выбора и внедрения НДТ (технология «Электролиз в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами»)	Полученный эффект от предложенных организационно-технических решений
Удельный расход энергетических ресурсов в производстве алюминия, кВ*ч/т продукции	15280	13200 – 14200	Снижение удельного расхода энергоресурсов на 10,3 % (до 3 906,8 млн кВ*ч/год в валовом выражении)
Сопутствующие выходные потоки – удельный выброс смолистых веществ, кг/т продукции	1,00	–	Снижение удельного выброса смолистых веществ на 100% (до 2 472,7 тыс. т/год в валовом выражении)
Углеродоёмкость производства, т СО <sub>2</sub> -экв./т продукции	2,54	1,48-1,70	Уменьшение удельных выбросов парниковых газов на 37,4% (до 2,27 млн т СО <sub>2</sub> -экв./год в валовом выражении)
Расход анодной массы, кг/т Al	520	410-430	Уменьшение удельного расхода анодов на 19,2 % (на 100 кг/т Al)

2. Сокращение сопутствующих выходных потоков производства при неизменном объёме выпуска основной продукции. Снижение выбросов смолистых веществ (включая бенз(а)пирен и другие ПАУ) до 2 472,7 тыс. тонн в год (согласно данным таблицы А.3). В удельном выражении – с 1,00 кг смолистых веществ на тонну продукции (включая бенз(а)пирен и другие ПАУ) до нулевых значений.

3. Снижение углеродоёмкости производства (декарбонизация). Уменьшение выбросов парниковых газов на единицу продукции с 2,54 до 1,48–1,70 т СО<sub>2</sub>-экв./т продукции. В валовом выражении среднее снижение выбросов парниковых газов может составить до 2,27 млн т СО<sub>2</sub>-экв. в год.

4. Сокращение удельного расхода материальных ресурсов. Снижение расходов анодной массы на 100 кг/т Al (с 520 кг/т до 420 кг/т).

Описанный выше практический пример применения разработанного алгоритма выбора ресурсоэффективных технологий апробирован на примере производства первичного алюминия и может быть использован предприятиями отрасли для принятия управлеченческих решений при формировании ресурсоэффективных производственных систем.

4.3 Разработка программного комплекса поддержки управлеченческих решений «Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением эксергетического анализа»

Сравнительный анализ технологий производства алюминия требует одновременного учёта множества показателей, относящихся к различным аспектам эффективности: ресурсной, экологической и углеродной. При этом данные показатели имеют различную размерность, степень неопределённости и влияние на итоговый результат, что затрудняет их интерпретацию и практическое использование при принятии управлеченческих решений. Применение эксергетического анализа позволяет обеспечить термодинамически обоснованную оценку эффективности технологических

процессов, однако его использование на практике требует выполнения большого количества расчётов.

Ручной расчёт указанных показателей и интегрального критерия технической эффективности является трудоёмким, подверженным ошибкам и затрудняет использование результатов исследования в практической управленческой деятельности.

В связи с этим была разработана программа для ЭВМ в виде веб-калькулятора, предназначенного для автоматизации расчётов и поддержки принятия управленческих решений при выборе и сравнении технологий производства алюминия. Реализация программного комплекса в веб-формате обусловлена следующими факторами:

- доступность и универсальность – веб-приложение не требует установки специализированного программного обеспечения и может использоваться на различных устройствах и операционных системах;
- удобство использования – пользовательский интерфейс обеспечивает наглядный ввод исходных данных (производительность, входные материальные и энергетические потоки, валовые выбросы загрязняющих веществ, данные для расчёта углеродоёмкости);
- возможность масштабирования – веб-архитектура позволяет в дальнейшем расширять функциональность, добавлять новые технологии, показатели и методы оценки;
- практическая направленность – веб-калькулятор может использоваться как научными работниками, так и специалистами промышленных предприятий при обосновании технологических и инвестиционных решений.

Таким образом, разработка программного комплекса «Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением эксергетического анализа» (ТЭПАЛ) в виде веб-калькулятора (рисунок 4.3.1) повышает прикладную значимость диссертационного исследования и обеспечивает воспроизведимость и наглядность полученных результатов.

*Архитектура и состав программного комплекса.* Разработанный программный комплекс имеет классическую клиент–серверную архитектуру и включает следующие основные компоненты:

- бэкенд-часть, реализованную на языке программирования PHP и состоящую из пяти функциональных файлов, обеспечивающих обработку пользовательских запросов, выполнение расчётов показателей ресурсной и экологической эффективности, углеродоёмкости;
- базу данных MySQL, предназначенную для хранения информации о технологиях производства алюминия, справочных коэффициентах, исходных и расчётных данных;
- фронтэнд-часть, реализованную с использованием фреймворка Vue.js, обеспечивающую интерактивный пользовательский интерфейс и визуализацию результатов расчётов.

*Обоснование выбора программных средств.* Выбор языка программирования PHP для реализации серверной части обусловлен его широким распространением в веб-разработке, простотой интеграции с базами данных MySQL, достаточной производительностью для выполнения инженерных расчётов, а также возможностью быстрого прототипирования и сопровождения программного продукта. Использование PHP является рациональным решением для реализации прикладных научных веб-приложений, ориентированных на расчётоаналитические задачи.

Выпуск алюминия (электролитического)  $M_{Al}$  т / год

2472732

2472732,00

2026 год

Среднее значение

Расчет показателей  
ресурсной  
эффективности Расчет  
КПД Эксергии

Расчет показателей  
экологической  
эффективности

Расчет показателей по  
выбросам парниковых  
газов Расчет выбросов  
диоксида углерода

Расчет показателей по  
выбросам парниковых  
газов Расчет выбросов  
перфторуглеродов

Расчет показателей по  
выбросам парниковых  
газов Расчет  $CO_2$   
-эквивалента

<b>Показатель</b>					
<b>№ п/п</b>	<b>Наименование</b>	<b>Обозначения</b>	<b>Единицы измерения</b>	<b>2026 год</b>	<b>Среднее</b>
	Абсолютные валовые выбросы $CO_2$ , т		т	0,000	0,000
1	Удельный выброс диоксида углерода от электролизеров Содерберга	$E_{CO2}^{содб}$	т $CO_2$ / т Ал.	0,000	0,000

Рисунок 4.3.1 – Вид программного комплекса ТЭПАЛ (разработано автором [68])

В качестве системы управления базами данных выбрана MySQL, что обусловлено её надёжностью, поддержкой реляционной модели данных, высокой скоростью обработки запросов и совместимостью с PHP. Применение MySQL обеспечивает структурированное хранение данных по технологиям производства алюминия и результатам расчётов, а также возможность последующего расширения базы данных.

Фронтэнд-часть реализована с использованием Vue.js, что позволяет создать удобный, наглядный и адаптивный пользовательский интерфейс. Данный фреймворк обеспечивает быстрое обновление данных, упрощает обработку пользовательского ввода и повышает эргономичность программного комплекса, что особенно важно при работе с большим количеством параметров и показателей.

*Функциональные возможности программного комплекса.* Программный комплекс поддержки управленческих решений реализован в виде последовательного многоэтапного калькулятора, обеспечивающего поэтапный ввод исходных данных и автоматизированный расчёт показателей комплексной технической эффективности производства алюминия.

Логика работы калькулятора основана на поэтапном формировании базы исходных данных, необходимых для корректного расчёта удельных и интегральных показателей. Такой подход позволяет минимизировать ошибки ввода, обеспечить прозрачность расчётных процедур и повысить удобство использования программного комплекса. На рисунке 4.3.2 представлена упрощённая структурно-функциональная схема программного комплекса, отражающая логику ввода исходных данных, обработки информации и формирования результирующего отчёта.



Рисунок 4.3.2 – Структура программы «ТЭПАЛ»

На первом этапе пользователь выбирает анализируемую технологию производства алюминия из перечня, представленного в базе данных. Выбор технологии определяет набор используемых коэффициентов, характеристик процессов и расчётных алгоритмов.

На втором этапе осуществляется ввод производительности технологического процесса, которая используется в дальнейшем для перехода от валовых показателей к удельным значениям, что обеспечивает сопоставимость различных технологий производства алюминия.

На третьем этапе пользователь вводит данные по потреблению материальных ресурсов, электроэнергии и химической эксергии используемых веществ. На основании указанных данных программный комплекс осуществляет расчёт эксергетического коэффициента полезного действия, являющегося одним из ключевых показателей ресурсной эффективности.

На четвёртом этапе производится ввод данных о валовых выбросах загрязняющих веществ, используемых для оценки экологической эффективности анализируемой технологии.

На пятом этапе вводятся параметры, необходимые для расчёта углеродоёмкости производства алюминия, после чего программный комплекс формирует интегральный показатель технической эффективности.

Завершающим этапом работы калькулятора является автоматическое формирование отчёта в формате Microsoft Word, содержащего исходные данные, результаты расчётов и итоговые показатели, что обеспечивает возможность документирования и использования результатов при принятии управленческих решений.

Программный комплекс позволяет:

- выбирать анализируемую технологию производства алюминия;
- вводить данные по производительности и входным материальным и энергетическим потокам;
- учитывать валовые выбросы загрязняющих веществ и данные для расчёта углеродоёмкости;
- автоматически рассчитывать показатели ресурсной эффективности, экологической эффективности и углеродоёмкости;
- использовать результаты расчётов для сравнительной оценки технологий и обоснования управленческих решений;
- производить расчёты как за отдельный календарный год, так и по нескольким годам сразу, включая средние значения; диапазон выбора временного периода – 1990–2026 гг.

Разработанный программный комплекс поддержки управленческих решений является инструментом, обеспечивающим практическую реализацию методического подхода, предложенного в диссертационной работе. Его использование повышает достоверность и воспроизводимость расчётов, расширяет возможности применения эксгергетического анализа в задачах оценки технической эффективности производства алюминия.

## Выводы по четвёртой главе

Практическая реализация научно-технических и организационных решений по стандартизации процесса управления ресурсной эффективностью metallurgического производства позволила сделать следующие выводы:

1. На основе предложенного алгоритма выбора ресурсоэффективных технологий в metallurgической отрасли изучены различные варианты организации производственных систем получения алюминия (входные, выходные потоки и их параметры) с целью выбора оптимальной технологии.

2. С позиции расхода энергетических ресурсов произведена сравнительная оценка технологий получения алюминия для принятия управленических решений по модернизации производства. Определено, что больший потенциал ресурсосбережения за счёт меньшей энергоёмкости имеет технология электролиза в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами, соответственно, данная технология является приоритетной для организации производства алюминия.

3. Реализована методика анализа ресурсной эффективности производств на основе эксергетического анализа. Показано, что более совершенные технологии производства первичного алюминия с точки зрения термодинамики процесса – технологии производства с применением электролиза с предварительно обожжёнными анодами. Подчёркнуто, что технологии по эксергетическому КПД находятся на достаточно близких уровнях, и, следовательно, для перехода на другой уровень качества требуется принципиально новая технология производства.

4. Применена методика комплексной оценки технической эффективности metallurgического производства, включающая три взаимосвязанных алгоритма расчёта различного рода показателей. Рассчитан для каждой рассматриваемой технологии. На основе рассчитанных интегральных показателей эффективности организации технологического процесса производства алюминия определено, что технология электролиза с

предварительно обожжёнными анодами обладает высокими значениями по совокупности показателей и может рассматриваться как предпочтительная для внедрения.

5. Рассчитаны эффекты от реализации предложенных организационно-технических решений (проведении модернизации производства с полной заменой технологии «ЭкоСодерберг» на обожжённые аноды), выраженные в снижении расхода энергетических ресурсов 10,3 %, сокращение углеродоёмкости продукции на 37,4 %, снижение расхода материальных ресурсов на 19,2 % (за счёт анодной массы).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведённого исследования получены важные научно-технические результаты в области принятия управленческих решений по повышению эффективности функционирования и качества организации производственных систем в алюминиевой промышленности. Обобщающий результат работы заключается в стандартизации процесса выбора наилучших доступных технологий производства алюминия.

1. Исследование современного уровня научно-практических разработок в области управления ресурсной эффективностью функционирования производственных систем позволило доказать целесообразность интеграции концепций всеобщего управления качеством и наилучших доступных технологий, а также разработать структурно-организационную модель повышения уровня организации metallургического производства, включающую разработанный алгоритм последовательных действий по её реализации и предполагающую использование комплексного критерия ресурсной эффективности. Прогнозируемые эффекты реализации предложенных решений (модернизации производства алюминия с полной заменой технологии «ЭкоСодерберг» на технологию с обожжёнными анодами) составят: снижение расхода энергетических ресурсов на 10,3 %, сокращение углеродоёмкости продукции на 37,4 %, снижение расхода материальных ресурсов на 19,2 % (анодная масса).

2. По итогам обобщения нормативной правовой и нормативно-технической базы, устанавливающей методические решения по оценке эффективности производственных технологий, и моделирования взаимосвязей параметров эффективности сформирована система показателей комплексной оценки технической эффективности производственных систем в промышленности. Формализация оценки позволяет сократить время разработки документов национальной системы стандартизации на 25–30%.

3. Репрезентативное исследование применяемых и перспективных технологий и уровней организации производственных систем, проектов модернизации предприятий алюминиевой промышленности привело к созданию базы знаний для последующей разработки алгоритма принятия управлеченческих решений в области организации производства алюминия. Алгоритм включает: процедуры всеобщего менеджмента качества, учёт степени зрелости технологий, стандарты выбора технологий в качестве наилучших доступных, расчёт интегрального показателя эффективности функционирования производственных систем.

4. Разработанные в ходе исследования инструменты реализованы и зарегистрированы в виде программного комплекса «Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением эксергетического анализа» (ТЭПАЛ). Предложенные научно-технические решения внедрены в устойчивую отраслевую практику применения на отечественных предприятиях по производству первичного алюминия Объединенной компании «РУСАЛ». В 2023–2025 гг. проекты, направленные на отказ от устаревших технологий и внедрение технологий, признанных наилучшими доступными в производстве первичного алюминия, прошли процедуры конкурсного отбора и получили доступ к мерам государственной поддержки в размере порядка 65,8 млн руб.

**Рекомендуется** использовать результаты исследования в практике хозяйствования крупных металлургических предприятий в процессе принятия управлеченческих решений по реализации программ инновационного развития; в деятельности Федеральных органов исполнительной власти при формировании приоритетов технологического развития и создании документов национальной системы стандартизации; а также при цифровой трансформации управления производственными системами.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** состоят в развитии инструментов межотраслевого сравнения уровня организации производственных систем в промышленности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александрова, С. В. Возможности цифровизации систем менеджмента качества / С. В. Александрова, В. А. Васильев, М. Н. Александров // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 1 (171). – С. 17–21.
2. Александрова, С. В. Цифровые технологии и управление качеством / С. В. Александрова, В. А. Васильев, Г. М. Летучев // Материалы международной конференции «Управление качеством, транспорт и информационная безопасность, информационные технологии». – Санкт-Петербург, 2018. – С. 18–21.
3. Андреев А. Модернизация и промышленная политика государства // Свободная мысль. – 2010. – № 8. – С. 5–26.
4. Антипов, Д. В. Совершенствование требований системы менеджмента качества к производственным процессам / Д. В. Антипов, Д. А. Горохова, А. В. Артюхов, А. С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4 (108). – С. 137–147.
5. Антипова, О. И. Концептуальная модель киберфизической системы / О. И. Антипова, С. В. Сусарев, Д. В. Антипов, В. Н. Козловский // Автомобильная промышленность. – 2025. – № 8. – С. 1–5.
6. Арканова, И. А. Перспективы развития оборотных циклов на предприятиях черной металлургии / И. А. Арканова, Н. Д. Доманцевич // Вестник Южно-Уральский государственный университет. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21. – № 1. – С. 59–67.
7. Бабушкин, В. М. Адаптивное планирование организации производства промышленного предприятия / В. М. Бабушкин, И. Ш. Шарафеев, Р. З. Валиуллин, Г. Ф. Мингалеев // Computational Nanotechnology. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 47–53.

8. Башмаков, И. А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности / И. А. Башмаков // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 151–174.
9. Башмаков, И. А. Повышение энергоэффективности и экономический рост / И. А. Башмаков // Вопросы экономики. – 2019. – № 10. – С. 32–63.
10. Башмаков, И. А. Сценарии движения России к углеродной нейтральности / И. А. Башмаков // Энергосбережение. – 2023. – № 1. – С. 40–49.
11. Башмаков, И. А. Углеродное регулирование в ЕС и российский сырьевой экспорт / И. А. Башмаков // Вопросы экономики. – 2022. – № 1. – С. 90–109.
12. Башмаков, И. А., Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в чёрной металлургии / И. А. Башмаков, Д. О. Скобелев, К. Б. Борисов, Т. В. Гусева // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77. – № 9. – С. 1071–1086.
13. Башмаков, И. А. Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии / И. А. Башмаков, Д. О. Скобелев, К. Б. Борисов, Т. В. Гусева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 77(9). – С. 1071–1086.
14. Башмаков, И. А. Российский ресурс энергоэффективности: масштабы, затраты, выгоды / И. А. Башмаков // Вопросы экономики. – 2016. – № 2. – 71 с.
15. Бобылев, С. Н. Подходы к классификации ресурсно-экологических ограничений / С. В. Соловьева, С. Н. Бобылев, Ю. Н. Деревянко // Механизм регулирования экономики. – 2009. – Т. 1. – № 4. – С. 13–23.
16. Борисоглебский, Ю. В. Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск: Наука, 1999. – 438 с.

17. Вартанян М.А., Рудомазин В.В., Харитонов Д.В. Бережливое и ресурсоэффективное производство керамики // Стандарты и качество. 2025. № 1. С. 99–103.

18. Васильев, В. А. Цифровые технологии в управлении качеством / В. А. Васильев, С. В. Александрова, Г. М. Летучев // Идеи и новации. – 2022. – Т. 10. – № 1–2. – С. 125–129.

19. Васин, С. А. Обоснование объема контрольных операций на основе статистических методов управления качеством продукции / С. А. Васин, А. А. Маликов, С. М. Никольский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 1. – С. 103–109.

20. Вертакова, Ю. В. Промышленная политика России: направленность и инструментарий / Ю. В. Вертакова, Н. А. Плотникова, В. А. Плотников // Экономическое возрождение России. – 2017. – № 3 (53). – С. 49–56.

21. Волосатова, А. А. Обзор нормативной правовой базы в области наилучших доступных технологий. Справочники НДТ для горнодобывающей промышленности / А. А. Волосатова, И. С. Курошев, О. С. Ежова // Рациональное освоение недр. – 2019. – № 5. – С. 16–22.

22. Волосатова, А. А. Роль и значение экспертных сообществ в процессе принятия управленческих решений: сравнительный анализ национального и международного опыта / А. А. Волосатова, О. В. Гречцов, О. Ю. Жукова, Н. А. Дружинина, М. А. Волосатова // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 13–26.

23. Волосатова, А. А. Технический комитет «Наилучшие доступные технологии»: Новые направления развития / М. А. Волосатова, О. В. Гречцов, М. В. Бегак // Компетентность. – 2018. – № 9–10 (160–161). – С. 28–32.

24. Волосатова, А. А. Добровольная экспертная оценка соответствия российских предприятий требованиям НДТ / А. А. Волосатова, Т. В. Гусева, Д. О. Скobelев // Компетентность. – 2022. – № 7. – С. 14–20.

25. Гашо, Е. Г. Наилучшие доступные технологии: готовность к изменениям / Е. Г. Гашо, М. В. Степанова // Вестник Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева. Гуманитарные и социально-экономические исследования. – 2016. – Т. 2. – Выпуск VII. – С. 101–113.
26. Гашо, Е. Г. Стандарты и приоритеты энергоэффективности / Е. Г. Гашо, Т. В. Гусева // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 7. – С. 34–41.
27. Гашо, Е. Г. Стандарты и приоритеты энергоэффективности / Е. Г. Гашо, М. В. Степанова // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 9. – С. 19–24.
28. Гашо, Е. Г. Разработка методологии совершенствования промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гашо Евгений Геннадьевич, 2018. – 445 с.
29. ГОСТ 11069–2019 Алюминий первичный. Марки. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 12 с.
30. ГОСТ 30167–2014 Ресурсосбережение. Порядок установления показателей ресурсосбережения в документации на продукцию. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
31. ГОСТ 4784–2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 36 с.
32. ГОСТ Р 113.00.11–2022. Наилучшие доступные технологии. Порядок проведения бенчмаркинга удельных выбросов парниковых газов в отраслях промышленности. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 18 с.
33. ГОСТ Р 113.00.14–2023 Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по проведению сравнительного анализа производств при разработке информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям. – Москва: Стандартинформ, 2023. – 20 с.

34. ГОСТ Р 113.00.27–2023. Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по выбору маркерных веществ в выбросах от промышленных предприятий. – Москва: Стандартинформ, 2023. – 12 с.
35. ГОСТ Р 113.00.28–2023 Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по оценке эффективности внедрения наилучших доступных технологий и эффективности реализации проектов по модернизации промышленных объектов. – Москва: Стандартинформ, 2023. – 20 с.
36. ГОСТ Р 53647.3–2015 Менеджмент непрерывности бизнеса. Часть 3. Руководство по обеспечению соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 22301. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 88 с.
37. ГОСТ Р 54531–2011 Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 20 с.
38. ГОСТ Р 56407–2023 Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. – Москва: Стандартинформ, 2024. – 16 с.
39. ГОСТ Р 56828.32–2017 Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Методологии идентификации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 54 с.
40. ГОСТ Р 70089–2022 Ресурсосбережение. Общие подходы к реализации принципов экономики замкнутого цикла на предприятиях. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 20 с.
41. ГОСТ Р 113.00.03–2019. Наилучшие доступные технологии. Структура информационно-технического справочника. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 18 с.
42. Гречников, Ф. В. Формирование критерия оценки величины снижения запасов выпуска изделий на предприятии в условиях поточного

производства / Ф. В. Гречников, А. В. Кобенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 82–85.

43. Громова, Е. А. Цифровая трансформация металлургической отрасли: состояние и перспективы / Е. А. Громова // Вестник Академии знаний. – 2024. – № 6 (65). – С. 292–295.

44. Гусева, Т. В. Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы применения в России / Т. В. Гусева, М. В. Бегак, Т. В. Боравская, Ю. Руут, Я. П. Молчанова, А. И. Захаров, С. П. Сивков – М.: ЮрИнфор-Пресс, 2010. – 220 с.

45. Гусева, Т. В. Принципы создания и перспективы применения информационно-технических справочников НДТ / Т. В. Гусева, М. В. Бегак, Я. П. Молчанова // Компетентность. – 2015. – № 5 (126). – С. 8–18.

46. Гусева, Т. В. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду / Е. Н. Потапова, Т. В. Гусева, И. О. Тихонова, А. С. Канишев, Р. Г. Кемп // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 15–20.

47. Гусева, Т. В. Существенные и маркерные показатели в экологическом нормировании на основе наилучших доступных технологий и оценке экологической результативности предприятий I категории / Т. В. Гусева, М. В. Бегак, Я. П. Молчанова, П. А. Макеенко // Наилучшие доступные технологии. Определение маркерных веществ в различных отраслях промышленности: Сборник статей. Том 5. – Москва: Издательство "Перо", 2016. – С. 4–19.

48. Данилов, Н. И. Основы энергосбережения / Н. И. Данилов. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2008. – 360 с.

49. Дильдин, А. Н. Совершенствование методики глубокой переработки отходов сталеплавильного производства. Часть 1. Термодинамический анализ / А. Н. Дильдин, Е. А. Трофимов, И. В. Чуманов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 5–12.

50. Дорохотова, М. В. Разработка организационно-экономического механизма регулирования углеродоёмкости в отрасли черной металлургии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024.

51. Дорохотова, М. В., Работа ТК по стандартизации / М. В. Дорохотова, К. Д. Скобелев, С. Вертышев // Стандарты и качество. – 2019. – № 4. – С. 28–30.

52. Дорохотова, М.В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода / М. В. Дорохотова, А. В. Матушанский // Экономика устойчивого развития. – 2022. – № 2 (50). – С. 63–68.

53. Ефремова, А. А. Анализ понятия «эффективность производства» с точки зрения современных ученых / А. А. Ефремова, В. Наземцева // Инновационная наука. – 2015. – № 11. – С. 77–79.

54. Информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям. Официальный сайт «Бюро НДТ». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://burondt.ru/itc>.

55. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11–2022 «Производство алюминия». Бюро НТД, 2022. – 273 с.

56. Клентак, А. С. Инструментарий оценки зрелости решений в системе менеджмента качества автопроизводителя по развитию промсборки с позиции обеспечения конкурентоспособности продукции / А. С. Клентак, В. Н. Козловский, В. Н. Пиунов, В. И. Ушаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 4 (120). – С. 94–104.

57. Клентак, А. С. Повышение эффективности функционирования промышленного предприятия через оценку потерь тепловой энергии / А. С.

Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4 (108). – С. 124–130.

58. Костюхин, Ю.Ю. Вызовы и риски российской металлургии в современных условиях нестабильности / Ю.Ю. Костюхин, Е.Ю. Сидорова // Инновационное развитие экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 45–50.

59. Костюхин, Ю.Ю. Мониторинг эффективности реализации стратегий деятельности предприятиями металлургического комплекса / Ю.Ю. Костюхин, Ю.Н. Мосейкин // Вестник БИСТ (Башкирского института социальных технологий). – 2019. – № 4 (45). – С. 7–19.

60. Крюковский, В. А. Эволюция российской технологии производства алюминия электролизом / В. А. Крюковский, М. Я. Минцис, П. В. Поляков, Г. А. Сиразутдинов // Цветные металлы и минералы – 2017: сборник докладов Девятого международного конгресса. – 2017. – С. 227–237.

61. Кудрявцева, С. С. Повышение эффективности организации производственных логистических систем / С. С. Кудрявцева, М. В. Шинкевич, В. М. Бабушкин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2019. – Т. 75, № 4. – С. 79–83.

62. Кудрявцева, С. С. Экологические инновации предприятий нефтехимической промышленности в достижении целей устойчивого развития / С. С. Кудрявцева, М. В. Шинкевич, Г. Р. Гарипова // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 8. – С. 51–56.

63. Кулешов, А. В. Производственный экологический контроль как инструмент технологического нормирования промышленности / А. В. Кулешов, И. О. Тихонова // Стандарты и качество. – 2021. – № 6. – С. 68–72.

64. Купрейшили, Е. Т. Экономическая категория «эффективность» в современной науке / Е. Т. Купрейшили, Б. А. Соловьёв, А. И. Тимофеев // Вестник Евразийской науки. – 2021. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/27ECVN221.pdf> (дата обращения: 07.01.2025).

65. Курошев, И. С. Об организации ресурсоэффективных производственных систем в металлургической отрасли / И. С. Курошев //

Компетентность. – 2025. – № 4. – С. 22–27.

66. Курошев, И. С. Алгоритм организации контроля технологического процесса производства алюминия по параметру углеродоёмкости / И. С. Курошев // Свидетельство о регистрации электронного ресурса с оценкой новизны № 25188 от 24.08.2023 г. ОФЭРНиО.

67. Курошев, И. С. Использование метода оценки жизненного цикла для управления отходами и вторичными ресурсами / А. В. Дербенев, И. С. Курошев // Качество и жизнь. – 2019. – № 4 (24). – С. 31–36.

68. Курошев, И. С. Комплексная оценка технической эффективности производства алюминия с применением экспергетического анализа / И. С. Курошев, В. И. Шупеня // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025697131 от 23.12.2025г.

69. Курошев, И. С. Оценки ресурсной эффективности промышленного производства. «Энциклопедия технологий» / Д. О. Скобелев, М. В. Дорохотова, И. С. Курошев // Качество и жизнь. – 2019. – № 4 (24). – С. 66–69.

70. Курошев, И. С. Показатели ресурсной и энергетической эффективности в информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям в области черной металлургии / М. Л. Рахманов, И. С. Курошев, А. С. Курчакова // Стандарты и качество. – 2021. – № – С. 54–57.

71. Курошев, И. С. Рейтинг металлических и неметаллических покрытий в секторе гальванохимической обработки поверхности / Е. Г. Винокуров, Т. Ф. Бурухина, И. С. Курошев // Цветные металлы. – 2021. – № 4. – С. 54–58.

72. Курошев, И. С. Ресурсная и экологическая эффективность гальванического производства: вопросы водопотребления / Е. Г. Винокуров, Х. А. Невмятуллина, Т. В. Гусева, И. С. Курошев // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 118–125.

73. Курошев, И. С. Ресурсная и экологическая эффективность производства алюминия на принципах НДТ / И. С. Курошев, И. С. Бахтина,

Д. О. Скобелев // Компетентность. – 2022. – № 4. – С. 10–15.

74. Корошев, И. С. Показатели наилучших доступных технологий / Д. О. Скобелев, И. С. Корошев, И. С. Филютич // Качество и жизнь. – 2024. – № 3. – С. 93–96.

75. Корошев, И. С. Роль наилучших доступных технологий в управлении качеством продукции / Д. О. Скобелев, И. С. Корошев // Стандарты и качество. – 2023. – № 12. – С. 72–76.

76. Корошев, И. С. Эффективность внедрения НДТ. Управление выбором ресурсоэффективных технологий / Д. О. Скобелев, И. С. Корошев, А. Г. Берняцкий. // Компетентность. – 2024. – № 5. – С. 10–17.

77. Курылев, Д. В. Методы и средства технологической подготовки производства / Д. В. Курылев, М. В. Печенкин, В. М. Бабушкин; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. – Казань: Издательство КНИТУ-КАИ, 2020. – 216 с.

78. Ласкорин, Б. Н., Безотходная технология в промышленности / Б. Н. Ласкорин, Б. В. Громов, А. П. Цыганков, В. Н. Сенин. – М.: Стройиздат, 1986. – 158 с.

79. Лебедева, Н. Е. Основные тенденции и проблемы технологического развития российской промышленности / Н. Е. Лебедева // Проблемы экономики и юридической практики. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 18–22.

80. Лисов, С. В. Минерально-сырьевой комплекс России как объект национальной промышленной политики / С. В. Лисов // Российский экономический журнал. – 2017. – № 3 (53). – С. 49–56.

81. Макаров, И. А. Климатические изменения как новый фактор международных отношений / И. А. Макаров, А. А. Шуранова // Международная аналитика. – 2023. – Т. 14. – № 4. – С. 52–74.

82. Малышева, Т. В. Бизнес-процессы в системе авторециклинга / Т. В. Малышева, А. И. Шинкевич, И. А. Еремеев // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 3(76). – С. 122–131.
83. Малышева, Т. В. Использование автоматизированных информационных систем в управлении экологической устойчивостью обрабатывающих производств / Т. В. Малышева // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 148–153.
84. Малышева, Т. В. Исследование моделей управления потоками несоответствующей продукции в производстве резинометаллических изделий / Т. В. Малышева, А. В. Саинчук, Н. В. Барсегян // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 9. – С. 66–71.
85. Малышева, Т. В. Разработка научно-организационных методов и средств развития малоотходных экологически безопасных химико-технологических систем: специальность 05.02.22 Организация производства (по отраслям): диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Малышева Татьяна Витальевна, 2021. – 424 с.
86. Малышева, Т. В. Ресурсосберегающие производственные системы. Управление информационными потоками / Т. В. Малышева // Компетентность. – 2020. – № 4. – С. 24–27.
87. Малышева, Т. В. Экологический инжиниринг как стратегия развития малоотходных ресурсосберегающих производственных систем / Т. В. Малышева, М. В. Шинкевич, А. Н. Дырдонова // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2020. – № 5(84). – С. 196–205.
88. Малышева, Т. Проблемы организации ресурсосберегающих и экологических производственных систем / Т. Малышева, А. Шинкевич // Русский инженер. – 2019. – № 1(62). – С. 34–37.
89. Мантуров, Д. В. О промышленной политике России на перспективу 2018–2030 гг. / Д. В. Мантуров // Вестник МГИМО Университета. – 2018. – № 4 (61). – С. 7–22.

90. Мантуров, Д. В. Теория и практика разработки и реализации новой модели промышленной политики: диссертация ... доктора экономических наук: 5.2.3. / Д. В. Мантуров. – Москва, 2022. – 583 с.
91. Мешалкин, В. П. Методика выбора экологически устойчивых промышленных зон Татарстана для развития обрабатывающих производств / В. П. Мешалкин, А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, К. А. Щелчков, В. В. Рудомазин // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 30–36.
92. Мешалкин, В. П. Оптимизация энергоресурсоэффективности и экологической безопасности систем газоснабжения / В. П. Мешалкин, М. С. Дови', С. М. Ходченко, Р. Р. Кантюков // Датчики и системы. – 2017. – № 4 (213). – С. 3–15.
93. Минулина, О.В. Методика оценки ресурсосберегающих производственных систем в экономике замкнутого цикла / О.В. Минулина, А.И. Шинкевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 2 (106). – С. 33–41.
94. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. – [Электронный ресурс] – URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.
95. Нормативные правовые акты. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/NDT/documents>.
96. Официальный интернет портал правовой информации Российской Федерации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/>.
97. Официальный сайт Министерства Промышленности и торговли Российской Федерации. // [Электронный ресурс] – URL: <http://minpromtorg.gov.ru/>.

98. Патент 06.08-19Л.379П Серия электролизеров для производства алюминия, включающая средства для уравновешивания магнитных полей в конце серии // РЖ 19Л. Технология неорганических веществ и материалов. – 2006. – № 8. – EDN IGVLDР.

99. Передовые производственные технологии. Официальный сайт Росстата [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://14.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Понятия%20и%20определения%20\(Производственные%20технологии\).pdf](https://14.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Понятия%20и%20определения%20(Производственные%20технологии).pdf).

100. Перечень поручений по результатам проверки исполнения положений законодательства об обращении с отходами производства и потребления, отнесенными к III классу опасности (утв. Президентом РФ 16.09.2020 № Пр-1489).

101. Поляков, П. В. Способ подготовки обожжённых анодов для электролиза алюминия: патент на изобретение RU 2650359 C1 / П. В. Поляков, А. А. Власов, О. В. Юшкова, А. В. Завадяк, И. И. Пузанов, А. И. Безруких, А. А. Горев; заявл. 02.11.2016; опубл. 11.04.2018.

102. Порфириев, Б. Н., Возможности и риски политики климатического регулирования в России / Б. Н. Порфириев, А. А. Широв, А. Ю. Колпаков, Е. А. Единак // Вопросы экономики. – 2022. – № 1. – С. 72–89.

103. Постановление Роспотребнадзора РФ от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

104. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методики количественного определения объёма выбросов парниковых газов».

105. Приказ Минприроды России от 31.08.2023 N 565 «Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды «Технологические показатели наилучших доступных технологий производства алюминия».

106. Применение твердых шлаковых смесей на основе оксида алюминия при выплавке низкосернистой стали / А. Н. Золин, А. А. Добромилов, Р. Д. Есильбаев [и др.] // Металлург. – 2023. – № 8. – С. 13–17.

107. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.10.2021 N 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учёт выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2021, N 44, ст. 7456).

108. Распоряжение Правительства РФ от 22.10.2021 г. № 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учёт выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов».

109. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 г. № 4260-р «О Стратегии развития metallurgической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года».

110. Розин, С.Е. Введение в энергетическую теорию стоимости / С. Е. Розин, Я. М. Щелоков, В. Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 218 с.

111. Росляков, П. В. К вопросу об объективной оценке показателей снижения выбросов загрязняющих веществ в рамках выполнения федерального проекта «Чистый воздух» / П. В. Росляков, О. Е. Кондратьева, И. О. Тихонова, Ю. Н. Бурвикова // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. – 2025. – Т. 36. – № 1–2. – С. 107–125.

112. Сафонов, М.С. Экономика замкнутого цикла в metallurgической отрасли / М. С. Сафонов, А. В. Тунешев // Государственная служба. – 2024. – № 3. – С. 77–81.

113. Сизяков, В.М. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России / В. М. Сизяков, П. В. Поляков, В. Ю. Бажин // Цветные металлы. – 2022. – № 7. – С. 16–23.

114. Сиразутдинов, Г.А. Технологии будущего в производстве алюминия / Г. А. Сиразутдинов, В. А. Крюковский, П. В. Поляков // Цветные

металлы и минералы – 2017: сборник докладов Девятого международного конгресса. – 2017. – С. 200–208.

115. Скobelев, Д.О. Информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям. Зачем и как их использовать? // Стандарты и качество. – 2025. – № 8. – С. 50–53.

116. Скobelев, Д. О. Математическая модель определения наилучших доступных технологий / Д. О. Скobelев // Компетентность. – 2019. – № 9–10. – С. 64–67.

117. Скobelев, Д. О. Наилучшие доступные технологии – шаг в будущее / Д. О. Скobelев, И. Б. Ефанова // Стандарты и качество. – 2015. – № 7. – С. 40–42.

118. Скobelев, Д. О. Наилучшие доступные технологии. Аспекты практического применения / Б. В. Боравский, Д. О. Скobelев – М.: Координационно-Информационный Центр, 2013. – 215 с.

119. Скobelев, Д. О. Перезагрузка промышленной политики: социально-экологические аспекты // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2019. – № 48. – С. 344–357.

120. Скobelев, Д. О. Исследование и обеспечение применения эффективных технологий / М. И. Сидоров, Д. О. Скobelев, М. Е. Ставровский, А. В. Рагуткин. – Москва: Издательство «Эко-Пресс», 2020. – 232 с.

121. Скobelев, Д. О. Развитие проекта «Энциклопедия технологий» / Д. О. Скobelев // Стандарты и качество. – 2020. – № 12. – С. 30–35.

122. Скobelев, Д. О. Утилизация промышленных отходов - направление реализации экологической промышленной политики / Д. О. Скobelев, Л. Я. Шубов // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 1. – С. 27–41.

123. Скуратов, А. П. Повышение экологической и энергетической эффективности производства алюминия: монография /А. П. Скуратов, С. Г. Шахрай, И. В. Фомичев, А. В. Белянин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 180 с.

124. Сопин, В. Ф. Методические подходы по созданию эффективной системы входного контроля и управления закупками / Я. В. Денисова, Д. Ю. Козлова, В. Ф. Сопин // Технология машиностроения. – 2022. – № 11. – С. 52–60.
125. Сопин, В. Ф. Оптимизация производственного процесса путём внедрения методов бережливого производства / Я. В. Денисова, А. С. Петрова, В. Ф. Сопин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – Т. 84, № 2(92). – С. 315–323.
126. Сопин, В. Ф. Управление несоответствиями на предприятии с помощью статистических методов / Я. В. Денисова, Д. Ю. Козлова, В. Ф. Сопин // Вестник Технологического университета. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 93–97.
127. Степанов, В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ : монография / В. С. Степанов, С. В. Степанов. – 2-е изд., доп. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 382 с.
128. Степанов, И. А. Глобальные инициативы по предотвращению "утечки углерода": риски и возможности для России / И. А. Степанов, И. А. Макаров, Е. Э. Музыченко, К. З. Галимова // Вестник Московского университета. Сер. 6, Экономика. – 2023. – № 3. – С. 239–260.
129. Технологическое развитие отраслей экономики. Официальный сайт Росстата [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/11189>.
130. Толстых, Т.О. Формирование промышленных симбиозов на основе принципов наилучших доступных технологий / Т. О. Толстых, В. С. Краснобаева // Промышленность: экономика, управление, технологии. – 2022. – Т. 1. – № 3–4 (3). – С. 116–125.
131. Указ Президента Российской Федерации от 04.06.2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической

эффективности российской экономики» // Российская газета. – № 123. – 07.06.2008 г.

132. Усанов, В. И. Технологическая и ресурсная эффективность производственного цикла / В. И. Усанов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2021. – № 3. – С. 32–38.

133. Цысов, А. С. Функциональные зоны рисков предприятий металлургической промышленности / А. С. Цысов // Вестник Академий знаний. – 2020. – №37. – С. 361–367.

134. Черный, С. А. Эколо-экономическая эффективность технологий переработки отходов металлургического производства: диссертация на соискание ученой степени кандидата наук / Черный Сергей Анатольевич. – Москва, 2009. – 155 с.

135. Шахов, Н. Р. Основные аспекты разработки методики балльной оценки качества деятельности предприятий фирменного автосервиса / Н. Р. Шахов, В. Н. Козловский, С. А. Васин // СТИН. – 2022. – № 5. – С. 34–38.

136. Шварцкопф, Н. В. Проблемы и перспективы развития алюминиевой промышленности России / Н. В. Шварцкопф // Эпоха науки. – 2020. – № 23. – С. 146–148.

137. Шинкевич, А. И. Проектирование продукции на платформе PLM: метод структурирования функции качества QFD / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Д. В. Харитонов // Компетентность. – 2023. – № 3. – С. 50–54.

138. Шинкевич А. И. Проблемы управления ресурсоэффективностью промышленных объектов в российских условиях / А. И. Шинкевич, А. Э. Валиуллин // Экономический вестник Республики Татарстан. – 2020. – № 4. – С. 19–24.

139. Шинкевич, А. И. Методическое обеспечение организации ресурсосберегающих производственных систем в условиях цифровизации нефтехимической отрасли: специальность 05.02.22 Организация производства (по отраслям): диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шинкевич Алексей Иванович, 2019. – 380 с.

140. Шинкевич, А. И. Мониторинг процессов энергосбережения в производственных системах на основе математической статистики / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Л. Н. Иванова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 4(102). – С. 57–64.
141. Шинкевич, А. И. Проекты энерго-, ресурсосбережения на предприятиях Республики Татарстан в условиях кризиса / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, И. А. Зарайченко // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 2. – С. 294–299.
142. Ширев, А. А. Целевой сценарий социально-экономического развития России с низким уровнем нетто-выбросов парниковых газов до 2060 года / А. А. Ширев, А. Ю. Колпаков // Проблемы прогнозирования. – 2023. – № 6 (201). – С. 53–66.
143. Ширев, А. А. Экономические риски в контексте разработки политики с низким уровнем эмиссий парниковых газов в России / Б. Н. Порфириев, А. А. Ширев, В. В. Семикашев, А. Ю. Колпаков // Энергетическая политика. – 2020. – № 5 (147). – С. 92–103.
144. Шмелева, Н. В. Теория и методология стратегии развития промышленных экосистем: диссертация на соискание ученой степени доктора наук / Шмелева Надежда Васильевна, 2023. – 271 с.
145. Шульц, Л. А. Энерго-экологический анализ эффективности металлургических процессов: учебное пособие / Л. А. Шульц. – Москва: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 267 с.
146. Щелоков, Я. М. Энергетический анализ хозяйственной деятельности. Энергетические проблемы энергоемких производств / Я. М. Щелоков. – Екатеринбург: Союз «Энергоэффективность», 2010. – 328 с.
147. Щелоков, Я. М. Комплексный критерий выбора НДТ / Я. М. Щелоков, В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – № 12. – С. 1385–1392.

148. Щелчков, К. А. Разработка подходов к эколого-технологическому регулированию деятельности промышленных предприятий на протяжении их жизненного цикла: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щелчков Кирилл Александрович, 2023. – 220 с.
149. Эванс, Д.Р. Управление качеством [Текст] / Джеймс Р. Эванс, пер. с англ. под ред. Э. М. Короткова. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 349 с.
150. Эффективность экономики России. Официальный сайт Росстата [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/11186>.
151. Guseva T., Panova S., Tikhonova I., Volosatova A., Bhimani C. Improving resource efficiency as a common basis for “green” taxonomies of BRICS countries // Proceedings of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2023. – Vol. 23, No. 5.1. – Pp. 215-221.
152. Chen, S. Non-linear system identification using neural networks / S. Chen, S. A. Billings, P. M. Grant // Int. J. Control. – 2010. – №51. – Pp. 1191-1214.
153. El Mofid, W. Sulfur Loading as a Manufacturing Key Factor of Additive-Free Cathodes for Lithium-Sulfur Batteries Prepared by Composite Electroforming / W. El Mofid, T. Sörgel // Energies. – 2023. – №16. P. 1134.
154. Fernandes, A. M. Soft Sensors in the Primary Aluminum Production Process Based on Neural Networks Using Clustering Methods / A. M. Fernandes, F. M. Soares, M. A. Gomes, N. F. Nagem, A. Henrique // Sensors. – 2019. – №19. – P. 5255.
155. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Guseva T., Panova S. The Complex Approach to Environmental and Technological Project Management to Enhance the Sustainability of Industrial Systems // Systems. – 2024. – Vol. 12. – Is. 7. Art. 261. DOI: 10.3390/systems12070261.
156. Geldermann J., Rentz O. A Reference Facility Approach for the Techno-Economic Assessment of Emission Reduction Options and the Determination of BAT in Accordance with the CPC Directive // Journal of Cleaner Production. – 2004. – Vol. 12, No. 4. – Pp. 389-402.

157. Gonzalez, J. Non-linear system modeling using LSTM neural networks / J. Gonzalez, W. Yu // IFAC Papers Online. – 2018. – №51. – Pp. 485–489.
158. Haber L., Carmeli A. Лидерство в решении задач внедрения новых технологий в организациях // Technology in Society. – 2023. – Т. 74. – Р. 102300.
159. Ilu-Varvara, D.-A. Metallurgical Wastes as Resources for Sustainability of the Steel Industry / D.-A. Ilu-Varvara, C. Aciu, // Sustainability. – 2022. – №14. – Р. 5488.
160. Kwon, H.-K. Layout Design and Die Casting Using CAE Simulation for Household Appliances / H.-K. Kwon // Appl. Sci. – 2021. – №11. – Р. 10128.
161. Leme R.D., Nunes A.O., Bonome L., Costa M., Silva D.A.L. Creating Value with Less Impact: Lean Manufacturing, Green Technologies, and Eco-Efficiency in the Metalworking Industry Towards Cleaner Production // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 196. – Pp. 517–534.
162. Malysheva T. V. Development and concentration efficiency study of enterprises innovation activity in real sector of economy / T. V. Malysheva, A. I. Shinkevich, E. V. Zelenkina [et al.] // Eurasian Journal of Analytical Chemistry. – 2017. – Vol. 12, No. 7. – Pp. 1347–1356.
163. Mandin, P. Industrial aluminium production: The Hall-Heroult process modeling / P. Mandin, J. M. Lemoine, R. Wüthrich, H. Roustan // ECS Trans. – 2009. – № 19. – Pp.1–100.
164. Meshalkin, V. P. System analysis of the efficiency of secondary energy resources use in circular economy / V. P. Meshalkin, A. I. Shinkevich, T. V. Malysheva // ChemChemTech. – 2021. – Vol. 64, No. 8. – Pp. 79–89.
165. Padamata S.K., Yasinskiy A., Polyakov P. A Review of Secondary Aluminum Production and its Byproducts // Journal of the Minerals Metals & Materials Society. – 2021. – Vol. 73. – Is. 9. – Pp. 2603–2614.
166. Perez-Cruz, J. H. Identification and control of class of non-linear systems with non-symmetric dead zone using recurrent neural networks / J. H. Pérez-

Cruz, I. Chairez, J.J. Rubio, J. Pacheco // IET Control Theory Appl. – 2014. – №8. – Pp. 183–192.

167. Rangel-Sánchez, M.-Á. Enhancing Scrap Reduction in Electric Motor Manufacturing for the Automotive Industry: A Case Study Using the PDCA (Plan–Do–Check– Act) Approach / M.-Á. Rangel-Sánchez, J.-D.-J. Urbina-González, J.-L. Carrera-Escobedo, O.-A. Guirette-Barbosa, V.-A. Murillo-Rodríguez, J.-M. Celaya-Padilla, H.-A. Durán-Muñoz, O. Cruz-Domínguez // Appl. Sci. – 2024. – №14. – P. 2999.

168. Rjazanov, V. A. Criteria and methods for establishing maximum permissible concentrations of air pollution / V. A. Rjazanov // Bull World Health Organ. – 1965. – Vol. 32. – № 3. – Pp. 389–398.

169. Sá, J. C. A model of integration ISO 9001 with Lean Six Sigma and main benefits achieved / J. C. Sá, S. Vaz, O. Carvalho, V. Lima, L. Morgado // Total. Qual. Manag. Bus. Excel. – 2020. – № 33. – Pp. 218–242.

170. Schollenberger H., Treitz M., Geldermann J. Adapting the European Best Available Techniques Approach: Examples from Chile and China // Journal of Cleaner Production. – 2008. – Vol. 16, No. 17. – Pp. 1856-1864.

171. Shi, Z. P. Research status of recycling and resource utilization of aluminum dross / Z. P. Shi, L. Jiang, H. L. Yang, J. Z. Zhang, G. F. Fu // Chem. Ind. – 2020. – №52. – Pp. 21–25.

172. Shinkevich, A. I. Information system of decision support in the management environment of ecological project / A. I. Shinkevich, T. V. Malysheva, E. S. Shaimieva, G. I. Gumerova // Academy of Strategic Management Journal. – 2020. – Vol. 19, No. 5. – Pp. 1—11.

173. Shinkevich, A. I. Waste management for production of steel electric welding pipes using data mining technologies and MES systems / A. I. Shinkevich, T. V. Malysheva // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 20. – Pp. 70-75.

174. Sindiramutty S. R., Jhanjhi N., Tan C. E., Lau S. P., Muniandy L., Gharib A. H., Ashraf H., Murugesan R. K. Индустрия 4.0: будущие тренды и

направления исследования // Technology in Society / Ред. M. Khan, N. Khan, N. Jhanjhi. – 2024. – Pp. 342–405.

175. Smagowicz, J. An Assortment–Quantity Optimization Problem in Printing Industry Using Simulation Modelling / J. Smagowicz, C. Szwed, T. Berlec // Sustainability. – 2024. № 16. – P. 1693.

176. Tsai, W.-H. Equilibrium between Environmental and Economic Objectives: An Activity-Based Costing Approach Application for Carbon Emissions Management in the Aluminum Alloy Wheel Industry / W.-H. Tsai, S.-C. Chang, Y. Teng // Energies. – 2024. – №17. – P. 1331.

177. Wang, Y. Transformation and Detoxification of Typical Metallurgical Hazardous Waste into a Resource: A Review of the Development of Harmless Treatment and Utilization in China / Y. Wang, H. Zhao, X. Wang, J. Chong; X. Huo, M. Guo, M. Zhang // Materials. – 2024. – №17. – P. 931.

178. Xiaoxiao Hu, Weiqiang Zhang, Shengling Zhang, Yu Hao, Jianhui Cong. The Impacts of The Global Energy Transition on China's Energy Security in the Long-Term: Heterogeneous Evidence from the Supply and Consumption Sides // Renewable Energy. – 2025. – Vol. 255. – Art. 123784.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А

### Потоки веществ на выходе из различных производственных систем

Таблица А.1 – Вещественные потоки на выходе из производственной системы по рядовой технологии электролиза ВТ [31]

Наименование вещества	Валовый выход, т/год	Удельный выход, кг/т	ПДК <sub>сс</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Приведённая валовая масса ЗВ, т у.з.в./год	Вклад ЗВ в суммарную приведённую массу, %
Бенз(а)пирен	2,49	0,0025	0,000001	2490000,00	88,3
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	1275,81	1,2667	0,014	91129,29	3,2
Серы диоксид	4400,39	4,3691	0,05	88007,80	3,1
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	1847,48	1,8343	0,03	61582,67	2,2
Смолистые вещества (возгоны пека) в составе электролизной пыли выбросов производства алюминия	1714,65	1,7024	0,03	57155,00	2,0
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	70010,52	69,5123	3	23336,84	<1,0
Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	936,53	0,9299	0,1	9365,30	<1,0
Аммиак (азота гидрид)	5,29	0,0031	0,1	61,88	<1,0
Углерод (пигмент черный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	3,09	0,0053	0,05	52,90	<1,0
Углеводороды (керосин)	51,67	0,0513	1,5	34,45	<1,0
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	0,01	<0,0003	0,1	0,10	<1,0
Метан	0,26	0,0003	50	0,01	<1,0
Итого	80248,19	–	–	2820726,2	100%

Таблица А.2 – Вещественные потоки на выходе из производственной системы по технологии электролиза в электролизерах Содерберга с боковым подводом тока к аноду (БТ) и шторными укрытиями [31]

Наименование вещества	Валовый выход, т/год	Удельный выход, кг/т	ПДК <sub>сс</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Приведенная валовая масса ЗВ, т у.з.в./год	Вклад ЗВ в суммарную приведенную массу, %
Бенз(а)пирен	0,02	0,0003	0,000001	20000,00	53,02
Серы диоксид	525,73	8,2297	0,05	10514,6	27,87
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	10632,46	166,4390	3	3544,15	9,40
Смолистые вещества (возгоны пека) в составе электролизной пыли выбросов производства алюминия	44,03	0,6892	0,03	1467,67	3,89
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	30,14	0,4718	0,03	1004,67	2,66
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	12,16	0,1903	0,014	868,57	2,30
Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	31,39	0,4913	0,1	313,90	0,83
Углерод (пигмент черный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	0,13	0,0020	0,05	2,60	0,01
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	0,48	0,0075	0,1	4,80	0,01
Углеводороды (бензин)	0,02	0,0003	1,5	0,01	0,00
Итого				37720,97	100,00

Таблица А.3 – Вещественные потоки на выходе на выходе из производственной системы по технологии в электролизерах с верхним подводом тока к аноду (ВТ) по технологии «Экологический Содерберг» («ЭкоСодерберг») [31]

Наименование вещества	Валовый выход, т/год	Удельный выход, кг/т	ПДК сс, мг/м <sup>3</sup>	Приведённая валовая масса ЗВ, т у.з.в./год	Вклад ЗВ в суммарную приведенную массу, %
Бенз(а)пирен	3,46	0,0014	0,000001	3460000,00	83,2
Серы диоксид	16279,29	6,5835	0,05	325585,80	7,8
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	1989,75	0,8047	0,014	142125,00	3,4
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	2615,87	1,0579	0,03	87195,67	2,1
Смолистые вещества (возгоны пека) в составе электролизной пыли выбросов производства алюминия	2481,46	1,0035	0,03	82715,33	2,0
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	147171,26	59,5177	3	49057,09	1,2
Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	1277,13	0,5165	0,1	12771,30	<1,0
Углерод (пигмент черный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	16,33	0,0066	0,05	326,66	<1,0
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	14,74	0,0060	0,1	147,35	<1,0
Аммиак (азота гидрид)	8,17	0,0033	50	81,66	<1,0
Метан	114,61	0,0464	1,5	2,29	<1,0
Углеводороды (бензин)	0,30	0,0001	0,1	0,20	<1,0
Итого	171972,37	–	–	4160008,35	100,00

Таблица А.4 – Вещественные потоки на выходе из производственной системы по технологии Электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА) [31]

Наименование вещества	Валовый выход, т/год	Удельный выход, кг/т	ПДК сс, мг/м <sup>3</sup>	Приведенная валовая масса ЗВ, т у.з.в./год	Вклад ЗВ в суммарную приведенную массу, %
Серы диоксид	10859,53	14,0293	0,05	217190,60	76,6
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	256,69	0,3316	0,014	18335,00	6,5
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	54808,36	70,8062	3	18269,45	6,4
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	509,65	0,6584	0,03	16988,33	6,0
Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	1271,20	1,6422	0,1	12712,00	4,5
Аммиак (азота гидрид)	0,27	0,0004	0,1	2,74	<1,0
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	0,15	0,0002	50	1,50	<1,0
Метан	27,17	0,0351	0,1	0,54	<1,0
Итого	67733,03			283500,1711	100,00

Таблица А.5 – Вещественные потоки на выходе из производственной системы по технологии Электролиз в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью 300 кА и выше) [31]

Наименование вещества	Валовый выход, т/год	Удельный выход, кг/т	ПДК сс, мг/м <sup>3</sup>	Приведённая валовая масса ЗВ, т у.з.в./год	Вклад ЗВ в суммарную приведенную массу, %
Серы диоксид	4507,79	11,9845	0,05	90155,80	84,0
Углерода оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	22128,38	58,8310	3	7376,13	6,9
Фториды газообразные /в пересчёте на фтор/: гидрофторид (водород фторид, фтороводород); кремний тетрафторид	51,53	0,1370	0,014	3680,71	3,4
Фториды твердые (фториды неорганические плохо растворимые): алюминия фторид; кальция фторид; натрия гексафторалюминат	89,04	0,2367	0,03	2968,00	2,8
Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	291,59	0,7752	0,1	2915,90	2,7
Пыль неорганическая с содержанием диоксида кремния менее 20, 20 - 70, а также более 70 процентов	17,92	0,0476	0,1	179,22	<1,0
Углерод (пигмент черный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	3,18	0,0085	0,05	63,67	<1,0
Аммиак	0,04	0,0001	0,1	0,39	<1,0
Метан	3,30	0,0088	50	0,07	<1,0
Итого	27092,78	–	–	107339,89	100,00

## Приложение Б

### Эксергетический КПД и ключевые параметры ресурсной эффективности технологий производства алюминия

**Таблица Б.1 – Входные и выходные потоки рядовой технологии ВТ**

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия в реальном процессе, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,93	893,1	1,72
Энергия	–			56,52
Анодная масса	C	0,52	32889,3	17,10
Итого				75,35
Выходной поток				
Алюминий	Al	1	31023	31,02
Потери	–		–	44,32
Итого				75,35
Эксергетический КПД, %			41,17	

**Таблица Б.2 – Входные и выходные потоки технологии Электролиза в электролизерах с боковым подводом тока к аноду (БТ)**

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия в реальном процессе, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,94	893,1	1,73
Энергия	–		55,44	55,44
Анодная масса	C	0,49	32889,3	16,12
Итого				73,29
Выходной поток				
Алюминий	Al	1	31023	31,02
Потери	–		–	42,27
Итого				73,29
Эксергетический КПД, %			42,30	

**Таблица Б.3 – Входные и выходные потоки технологии «ЭкоСодерберг»**

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия в реальном процессе, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,93	893,1	1,72
Энергия				55,01
Анодная масса	C	0,51	32889,3	16,77
Итого			2,44	73,51
Выходной поток				
Алюминий	Al	1	31023	31,02
Потери	—		—	42,49
Итого			3,6	73,51
Эксергетический КПД, %			42,20	

Таблица Б.4 – Входные и выходные потоки технологии электролиза в электролизёрах с предварительно обожжёнными анодами первого поколения (мощностью до 300 кА)

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия в реальном процессе, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,92	893,1	1,71
Энергия				51,12
Анодная масса	C	0,43	32889,3	14,14
Итого				66,98
Выходной поток				
Алюминий	Al	1	31023	31,02
Потери	—		—	35,96
Итого			2,77	66,98
Эксергетический КПД, %			46,27	

Таблица Б.5 – Входные и выходные потоки технологии электролиза в электролизерах с предварительно обожжёнными анодами второго поколения (мощностью 300 кА и выше)

Статья баланса	Химическая формула	Масса, т	Эксергия по справочнику, кДж/кг	Эксергия в реальном процессе, ГДж
Входной поток				
Глинозём	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , альфа	1,92	893,1	1,71
Энергия				47,52
Анодная масса	C	0,41	32889,3	13,48
Итого			2,33	62,72
Выходной поток				
Алюминий	Al	1	31023	31,02
Потери	–		–	31,70
Итого			2,54	62,72
Эксергетический КПД, %			49,6	