Министерство образования науки РФ
ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет»
Институт гражданской защиты
Кафедра инженерной защиты окружающей среды

Допустить к защите
Руководитель магистерской программы
д.б.н., профессор И.Л. Бухарина
_____
«____» _____ 20___ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПРИРОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ОБЛАСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ СЕРЫ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Магистрант _____ Майер Виктория Михайловна

Направление подготовки:
20.04.02 «Природообустройство и водопользование»
Направленность/профиль: «Экологическая экспертиза, защита и восстановление природной среды»

Научный руководитель
к.б.н., доцент _____ Журавлева Анастасия Николаевна

Ижевск 2026

ВКР УдГУ

АННОТАЦИЯ

Магистерская работа посвящена анализу и разработке природоохранных мероприятий по сокращению выбросов оксидов серы (SO_2) на металлургических предприятиях по материалам ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова».

В аналитическом разделе представлен литературный обзор, рассматривающий факторы негативного воздействия металлургического производства на окружающую среду, в частности, источники выбросов SO_2. Проведен сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов SO_2.

Проектный раздел включает характеристику деятельности ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия, описание технологии снижения выбросов оксида серы на предприятии, анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы, расчет платы за выбросы в атмосферу.

Магистерская работа содержит 68 страниц текста, 15 таблиц, 4 рисунка, 51 источник литературы. Состоит из введения, двух разделов, заключения и списка литературы.

ВКР УлГУ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....8
1.1 Литературный обзор в области исследования.....8
1.2 Факторы негативного воздействия металлургических предприятий на окружающую среду, в частности источники выбросов оксидов серы.....20
1.3 Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях 26
2 ПРОЕКТНЫЙ РАЗДЕЛ 36
2.1 Краткая характеристика деятельности ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» как объекта исследования 36
2.2 Анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия.....40
2.3 Описание технологии снижения выбросов оксида серы на предприятии.....44
2.4 Анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы 51
2.5 Расчет платы за выбросы в атмосферу.....53
Заключение 58
Список литературы.....62

ВКР УдГУ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Проблема загрязнения атмосферного воздуха выбросами оксидов серы остается одной из наиболее острых экологических проблем современности, особенно в регионах с развитой металлургической промышленностью. Выбросы оксидов серы являются результатом сжигания и переработки серосодержащего топлива и сырья, и оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье населения. Во-первых, выбросы оксидов серы являются основным компонентом кислотных дождей, которые приводят к закислению почв и водоемов, деградации лесных экосистем, угнетению растительности и гибели водных организмов. Кислотные осадки также вызывают коррозию металлических конструкций, разрушение зданий и памятников архитектуры, что наносит значительный экономический ущерб. Во-вторых, выбросы оксидов серы оказывают непосредственное негативное воздействие на здоровье человека. Вдыхание загрязненного воздуха, содержащего выбросы оксидов серы, приводит к раздражению слизистых оболочек дыхательных путей, развитию респираторных заболеваний (бронхит, астма, пневмония), обострению сердечно-сосудистых заболеваний и увеличению смертности, особенно среди пожилых людей и детей. В-третьих, выбросы оксидов серы способствуют образованию смога и ухудшению видимости, что негативно сказывается на транспортной безопасности и туристической привлекательности регионов.

В контексте Российской Федерации, проблема загрязнения атмосферного воздуха выбросами оксидов серы особенно актуальна для регионов с развитой цветной металлургией. Несмотря на принимаемые меры, проблема остается нерешенной в полной мере. Существующие технологии очистки отходящих газов от выбросов оксидов серы требуют значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов, что сдерживает их широкое внедрение. Кроме того, эффективность многих технологий ограничена, особенно при переработке сульфидного сырья с высоким содержанием серы. В условиях ужесточения

ВКР УлГУ

экологического законодательства и возрастающего внимания к экологической ответственности бизнеса, разработка и внедрение эффективных природоохранных мероприятий по сокращению выбросов оксидов серы на металлургическом предприятиях является не только экологической, но и экономической необходимостью. Сокращение выбросов оксидов серы позволит улучшить экологическую обстановку в регионе, снизить риски для здоровья населения, повысить эффективность использования природных ресурсов, улучшить имидж предприятия и обеспечить его устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена высокой степенью загрязнения атмосферного воздуха оксидами серы в районах расположения металлургических предприятий, негативным воздействием выбросов серы на окружающую среду и здоровье населения, недостаточной эффективностью существующих технологий очистки отходящих газов, а также необходимостью повышения экологической ответственности бизнеса и обеспечения устойчивого развития регионов. Исследование направлено на разработку и обоснование комплекса природоохранных мероприятий, которые позволят существенно сократить выбросы оксидов серы на ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» и внести вклад в улучшение экологической обстановки в Арктической зоне Российской Федерации.

Степень разработанности проблемы. Проблема сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях является объектом научных исследований и практических разработок на протяжении многих лет (А.С. Болтовская, А.Н. Вивчар, Д.Н. Гурулев, О.Г. Еремин, Н.С. Изотова, Л.В. Палаткина, О.И. Платонов, В.А. Сердюков и другие). Существуют различные технологии и методы очистки отходящих газов от выброса оксидов серы, такие как сернокислотное производство, известково-гипсовый метод, абсорбционные методы и др. Однако, несмотря на это, проблема остается актуальной, особенно для предприятий, использующих устаревшие технологии или перерабатывающих сульфидное сырье с высоким содержанием серы.

ВКР УлГУ

Недостаточно изучены вопросы комплексного подхода к сокращению выбросов оксидов серы, учитывающего особенности конкретного предприятия, его технологические процессы, экономические условия и экологические требования. В современных социально-экономических условиях, когда вопросы экологической ответственности и устойчивого развития приобретают все большее значение, необходимы новые подходы и решения для сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях, учитывающие лучшие доступные технологии и международный опыт.

Цель исследования – разработать комплекс природоохранных мероприятий, направленных на сокращение выбросов оксидов серы на ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», обеспечивающих снижение негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Поставленная цель потребовала решения следующих **задач:**

1) рассмотреть теоретические аспекты в области охраны атмосферного воздуха и сокращения выбросов оксидов серы;

2) дать краткую характеристику деятельности ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» как объекта исследования;

3) провести анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия;

4) описать технологии снижения выбросов оксида серы на предприятии;

5) провести анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы;

6) рассчитать плату за выбросы в атмосферу до и после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы.

Объект исследования – ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова».

Предметом исследования выступают природоохранные мероприятия, направленные на сокращение выбросов оксидов серы на металлургическом предприятии.

ВКР УдГУ

Методы исследования. Методологическую основу магистерской диссертации составили анализ литературных источников (изучение научных статей, монографий, нормативно-правовых документов и технических отчетов по теме исследования); системный анализ (рассмотрение проблемы сокращения выбросов оксидов серы в комплексе, с учетом всех взаимосвязанных факторов и процессов); статистический анализ (обработка и анализ данных о выбросах оксидов серы, технологических параметрах производства и эффективности применяемых природоохранных мероприятий); экономический анализ (оценка затрат на реализацию предложенных мероприятий и расчет экономической эффективности).

Практическая значимость исследования заключается в разработке конкретных предложений по сокращению выбросов оксидов серы на ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», которые могут быть использованы предприятием для улучшения экологической обстановки в регионе и повышения своей экологической ответственности. Результаты исследования могут быть использованы при разработке экологических программ, планов природоохранных мероприятий, а также при модернизации технологических процессов и внедрении новых технологий. Предложенные мероприятия могут способствовать снижению негативного воздействия на здоровье населения, улучшению качества атмосферного воздуха, сохранению природных экосистем и повышению конкурентоспособности предприятия.

ВКР УлГУ

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Литературный обзор в области исследования

Проблема загрязнения атмосферного воздуха является одной из наиболее актуальных экологических задач современности, особенно для регионов с развитой металлургической промышленностью. Согласно государственного доклада Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году», анализ состояния атмосферного воздуха населенных мест Российской Федерации за последнее десятилетие в целом демонстрирует устойчивую тенденцию к сокращению доли проб с превышением гигиенических нормативов как в городских, так и в сельских территориях. На Европейской части страны основными факторами загрязнения остаются общераспространенные примеси (диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, взвешенные частицы), при этом за 10-летний период зафиксировано снижение доли несоответствующих проб по данным веществам на 45,5-52,7% [30].

В Сибирском федеральном округе, где расположен ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», в период с 2015 по 2024 год, зафиксировано увеличение на 30,1% количества проб воздуха, превышающих предельно допустимые концентрации (далее – ПДК) загрязняющих веществ. Вероятной причиной этого роста является значительное расширение программы инструментальных измерений качества воздуха в городах Сибири, проводимых в рамках федерального проекта «Чистый воздух», который стартовал в 2019 году. Цель федерального проекта – двукратное снижение выбросов в атмосферу опасных загрязняющих веществ к 2036 году [40]. Для каждого из городов-участников разработали индивидуальные комплексные планы, которые включают: перевод частных домовладений с угольного или печного отопления на газовое, электрическое или комбинированное, закупку экологичного

ВКР УлГУ

транспорта, модернизацию котельных и крупных производств. Благодаря принятым мерам в Норильске объем опасных выбросов в городе уменьшился на 22,8%. Там на Надеждинском металлургическом заводе заменили оборудование, модернизировали печи и повысили эффективность производства. После запуска первой технологической линии «Серной программы» уловили и превратили в безвредный гипс 389 тысяч тонн металлургических газов [40].

Ниже представлены основные нормативно-правовые акты, регулирующие охрану атмосферного воздуха (в т.ч. от выбросов оксидов серы (далее – SO_2) в Российской Федерации.

Согласно ст. 42 Конституции Российской Федерации (далее – Конституция РФ) «каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением» [1].

Федеральный закон от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (ред. от 13.07.2024) [3], одной из основных государственных целей в рамках решения задач сбалансированного социально-экономического развития страны обозначает обеспечение безопасной окружающей среды для населения, в том числе предотвращение и сокращение уровня загрязнения атмосферного воздуха. Указанные цели закреплены указами Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176 «О стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [8], от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [9], в том числе в рамках национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни» в срок до 2030 года предусмотрено снижение в два раза выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Одним из механизмов, реализации этих целей являются предупредительные меры охраны окружающей среды, осуществляемые путем законодательного государственного регулирования. Совершенствование этих мер – одна из основных задач государства (согласно

ВКР УлГУ

Федеральному закону от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (ред. от 01.09.2025) [4]) с целью обеспечения безопасности среды обитания и инновационного развития экономики России.

СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 [11]) содержит более 2000 веществ, для которых установлены гигиенические нормативы содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: ПДК и ориентировочные безопасные уровни воздействия (далее – ОБУВ). ПДК – такая концентрация, при воздействии которой на организм человека периодически или в течение всей жизни, прямо или опосредованно (через экологические системы, а также через возможный экономический ущерб) не возникает заболеваний или изменений состояния здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований сразу или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. В Российской Федерации для загрязняющих веществ установлено 3 вида нормативов: $ПДК_{мр}$ – предельно допустимая максимальная разовая концентрация химического вещества в воздухе населённых мест, мг/м^3. Эта концентрация при вдыхании в течение 20-30 мин. не должна вызывать рефлекторных реакций в организме человека. $ПДК_{сс}$ – предельно допустимая среднесуточная концентрация химического вещества в воздухе населённых мест, мг/м^3. Эта концентрация не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неопределённо долгом (годы) вдыхании. $ПДК_{сг}$ – концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при хроническом (не менее 1 года) воздействии – среднегодовая [11]. В СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» представлена информация о классах опасности контролируемых загрязняющих веществ. Класс опасности – показатель, характеризующий степень опасности для

ВКР УлГУ

человека веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Вещества делятся на следующие классы опасности: 1 класс – чрезвычайно опасные; 2 класс – высоко опасные; 3 класс – опасные; 4 класс – умеренно опасные. Предельно допустимая концентрация (ПДК) выбросов SO_2 в атмосферном воздухе городских и сельских поселений представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Предельно допустимая концентрация (ПДК) выбросов SO_2 в атмосферном воздухе городских и сельских поселений [11]

Наименование вещества	Предельно допустимые концентрации, мг/м^3			Направленность биологического действия загрязняющего вещества – лимитирующий показатель вредности	Класс опасности
	$ПДК_{мр}$	$ПДК_{сс}$	$ПДК_{сг}$		
Оксид серы (диоксид серы)	0,5	0,05	-	Рефлекторное и резорбтивное	3 класс

Максимальная разовая $ПДК_{мр}$ – 0,5 мг/м^3 не должна вызывать рефлекторных реакций при кратковременном воздействии. Среднесуточная ПДК $ПДК_{сс}$ – 0,05 мг/м^3 не должна оказывать негативного воздействия при длительном воздействии. Рефлекторное и резорбтивное воздействие означает, что воздействие может проявляться как через органы чувств (рефлекторно), так и через всасывание вещества в организм (резорбтивно), вызывая внутренние нарушения. 3-й класс опасности (умеренно опасное вещество) требует соблюдения определенных мер предосторожности при обращении с SO_2 и контроле его выбросов.

Значение $ПДК_{мр}$ в 10 раз превышает значение $ПДК_{сс}$, что говорит о том, что кратковременное, но значительное повышение концентрации SO_2 может быть опасным для здоровья (вызывать рефлекторные реакции, например, раздражение слизистых оболочек). Длительное воздействие даже небольших концентраций SO_2 (соответствующих $ПДК_{сс}$) может оказывать негативное влияние на здоровье населения (резорбтивное воздействие).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) SO_2 в воздухе рабочей зоны представлена в таблице 2.

ВКР УдГУ

Таблица 2 – Предельно допустимая концентрация (ПДК) SO_2 в воздухе рабочей зоны [11]

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Класс опасности
Оксид серы (диоксид серы)	-/10	пар	3 класс

В условиях фактически отсутствующей в России системы установления экологических нормативов содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе законодательно предусмотренное (Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ред. от 08.08.2024) [6]) государственное регулирование в сфере охраны окружающей среды в части разработки и утверждения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду для атмосферного воздуха реализуется посредством применения соответствующих гигиенических нормативов. Законодательством Российской Федерации запрещены выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ, степень опасности которых для жизни и здоровья человека и для окружающей среды не установлена, что равнозначно отсутствию гигиенических нормативов (п. 7 ст. 15 Федерального закона от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», п. 67 раздела III СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» [15]).

В целях государственного регулирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в том числе обеспечения контроля источников выбросов, в соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 26.12.2024) [6], распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.10.2023 г. № 2909-р утвержден

ВКР УлГУ

перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [10] (далее – Перечень 2909-р), который содержит 75 наименований загрязняющих веществ в разделе «Для атмосферного воздуха» включает в себя SO_2. Критерии формирования Перечня 2909-р определены п. 1 ст. 4.1. Федерального закона от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», в соответствии с которым загрязняющие вещества, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, определяются с учетом уровня токсичности, канцерогенных и (или) мутагенных свойств химических и иных веществ, в том числе имеющих тенденцию к накоплению в окружающей среде, а также их способности к преобразованию в окружающей среде в соединения, обладающие большей токсичностью; с учетом данных государственного экологического мониторинга и социально-гигиенического мониторинга; при наличии методик (методов) измерения загрязняющих веществ.

Итак, в целом по России наблюдается положительная динамика в снижении загрязнения атмосферного воздуха, однако ситуация в Сибирском федеральном округе, где расположен ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», демонстрирует рост концентрации загрязняющих веществ. Это, вероятно, связано с расширением мониторинга в рамках проекта «Чистый воздух», выявляющего проблемные зоны. Данный факт подчеркивает важность реализации федеральных проектов и необходимость разработки и совершенствования государственного регулирования в сфере охраны атмосферного воздуха, в том числе через установление гигиенических нормативов и мер контроля, стимулирующих предприятия к модернизации и снижению выбросов опасных веществ, чтобы достичь целей по обеспечению комфортной и безопасной среды для жизни населения, предусмотренных стратегическими целями развития страны. Регулирование, с этой целью, включает в себя как определение перечня опасных загрязняющих веществ, так и разработку критериев формирования списка.

ВКР УлГУ

Целью нормативно-правового регулирования выбросов SO_2 является обеспечение благоприятной окружающей среды и здоровья населения путем ограничения выбросов загрязняющих веществ, в том числе SO_2, от промышленных предприятий. Федеральное законодательство включает в себя Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 26.12.2024), который является основополагающим документом в области охраны окружающей среды. Он устанавливает общие принципы и требования к охране атмосферного воздуха, включая установление нормативов качества окружающей среды и выбросов вредных веществ. Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ред. от 08.08.2024) непосредственно регулирует отношения в области охраны атмосферного воздуха. Он устанавливает требования к источникам загрязнения атмосферного воздуха, порядок установления нормативов выбросов, а также меры по контролю за соблюдением этих нормативов. Закон определяет, что выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух допускаются только на основании разрешений, выдаваемых уполномоченными органами. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 г. № 195-ФЗ (ред. от 04.11.2025) [2] (далее – КоАП РФ) устанавливает административную ответственность за нарушение природоохранного законодательства, в том числе за превышение установленных нормативов выбросов, нарушение правил эксплуатации оборудования, предназначенного для очистки выбросов, а также за несоблюдение требований по охране атмосферного воздуха. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.10.2023 г. № 2909-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» (ред. от 05.06.2024) [10] определяет перечень загрязняющих веществ, подлежащих регулированию, включая SO_2.

Органы государственной власти субъектов РФ могут устанавливать дополнительные требования и ограничения в области охраны атмосферного воздуха, учитывающие специфические особенности и экологическую ситуацию

ВКР УлГУ

в регионе. Это может включать в себя установление более жестких нормативов выбросов для отдельных предприятий или отраслей промышленности. В ряде регионов разрабатываются и реализуются программы, направленные на снижение загрязнения атмосферного воздуха, в том числе путем внедрения современных технологий очистки выбросов, перевода транспорта на экологически чистые виды топлива и развития экологически чистого общественного транспорта. Так, Правительством Красноярского края утверждена государственная программы «Охрана окружающей среды» (постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 г № 512-п (ред. от 14.10.2025) [16]), которая предусматривает реализацию мероприятий, направленных на кардинальное снижение выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. SO_2) в атмосферный воздух и обеспечение благоприятных условий проживания жителей.

Органы государственного экологического надзора также осуществляют контроль за соблюдением природоохранного законодательства, в том числе за соблюдением нормативов выбросов загрязняющих веществ. В случае выявления нарушений к предприятиям применяются меры административной ответственности, включая штрафы и приостановление деятельности.

Анализ литературных источников по теме магистерской диссертации позволил выявить также высокую актуальность проблемы сокращения выбросов оксидов серы при работе металлургических предприятий и сжигании ископаемого топлива.

Так, автор учебного пособия «Экологические проблемы современного металлургического производства» Д.Н. Гурулев отмечает, что SO_2 является одним из основных загрязнителей атмосферного воздуха, поступая в него при сжигании топлива, от промышленных выбросов и дизельных двигателей. SO_2 оказывает негативное влияние на органы дыхания, глаза, нервную систему, кожу и нарушает окислительные процессы в организме, начиная всасываться сразу при контакте со слизистыми. Вероятностная оценка воздействия диоксида серы включает такие показатели, как увеличение смертности (общей, от сердечно-

ВКР УдГУ

сосудистых и респираторных заболеваний), рост числа приступов астмы, увеличение госпитализаций по поводу респираторных заболеваний у пожилых людей. Серная кислота, образующаяся из SO_2, также поражает органы дыхания. Кратковременное воздействие SO_2 приводит к увеличению общей смертности примерно на 0,6% при повышении его концентрации на 10 мкг/м^3. В городах с повышенным содержанием SO_2 в атмосферном воздухе можно ожидать увеличения смертности по сравнению с базовым уровнем на 2-3%, учитывая эффекты острого воздействия этого вещества [20].

А.С. Болтовская, А.В. Соколовский и Д.В. Панасюк подчеркивают, что переработка промышленных отходов и разработка экологически чистых технологий – это актуальная необходимость. Экологические проблемы являются одними из ключевых для металлургических предприятий, на которые приходится более половины всех атмосферных выбросов в районах их расположения. Одним из наиболее опасных газов является SO_2, образующийся при переработке сульфидного сырья. Хотя технологические газы, содержащие SO_2, могут использоваться для производства серной кислоты, газы с концентрацией диоксида серы ниже 3% обычно не перерабатываются и выбрасываются в атмосферу, создавая экологическую проблему [17].

А.Н. Вивчар, В.А. Сердюков и О.Ю. Сигитов указывают на распространенность расчетного метода для оценки выбросов SO_2 (включая диоксид серы), основанного на предположении о полном окислении содержащейся в топливе серы до диоксида серы. Формула расчета учитывает массу топлива и содержание в нем серы – параметры, определяемые прямыми измерениями. Однако, возникает несоответствие – использование измеренных значений массы топлива и содержания серы характерно для расчетного метода, в то время как применение таких измеряемых параметров, как площадь газохода, скорость газов и концентрация загрязняющего вещества, типично для инструментальных методов. Это создает своего рода «коллизию» в методологии расчета выбросов диоксида серы [18].

ВКР УлГУ

Заметный вклад в разработку технологий очистки серосодержащих газов внесли такие ученые как О.И. Платонов, О.Г. Еремин, Н.С. Изотова и другие.

О.И. Платонов считает, что в условиях сложной экономической и экологической ситуации в Норильском промышленном районе, проблема утилизации SO_2 от процессов переработки сульфидных руд становится критически важной для развития печей Ванюкова. Несмотря на освоенность самой технологии плавки Ванюкова, отсутствие эффективного решения по утилизации отходящего газа SO_2 значительно сдерживает её технико-экономическую привлекательность. Ограниченные возможности по снижению выбросов SO_2 через обогащение руды и высокие затраты на внедрение ресурсоемких технологий, таких как автоклавная переработка, делают актуальным поиск более эффективных путей утилизации SO_2. Автор утверждает, что наиболее перспективным направлением представляется внедрение автогенных плавильных агрегатов, позволяющих получать газ, концентрированный по диоксиду серы, с последующей его переработкой в товарный продукт, пригодный для транспортировки и длительного хранения. Это позволит существенно снизить выбросы SO_2 в атмосферу и обеспечить экологическую устойчивость металлургического производства в регионе [31].

По мнению Н.С. Изотовой, при пирометаллургической переработке сульфидного сырья неизбежно образуются отходящие газы, содержащие SO_2, выброс которого строго контролируется из-за негативного воздействия на окружающую среду. Для соблюдения установленных норм SO_2 в воздухе требуется обязательная переработка этих газов. Существующие методы утилизации SO_2 – мокрые, сухие, газофазные, реагентные и каталитические – имеют разную степень промышленного внедрения, при этом большинство реализованных технологий применимы только к очистке газов с высокой концентрацией SO_2. Это обусловлено тем, что известные способы улавливания диоксида серы часто ограничены узким диапазоном концентраций SO_2 в газе, требуют сложного оборудования и значительных затрат, а также сталкиваются с трудностями в получении востребованных побочных продуктов и их сбыте.

ВКР УлГУ

Автор полагает, что актуальной задачей является разработка технологии утилизации отходящих газов металлургического производства, способная эффективно перерабатывать газы с широким диапазоном концентрации диоксида серы, быть простой во внедрении и эксплуатации, и при этом производить востребованный рынком продукт [22].

С точки зрения О.Г. Еремина, утилизация серы из отходящих металлургических газов имеет критическое значение не только с экономической точки зрения, но и в контексте усиления требований к охране окружающей среды от газовых выбросов. Он отмечает значительный прогресс в разработке автогенных процессов плавки с использованием кислорода, позволивших уменьшить объемы отходящих газов и выбросы оксидов серы, в частности, SO_2. О.Г. Еремин подчеркивает, что «Норильский никель» стал одним из пионеров в разработке и внедрении плавки в жидкой ванне (процесс Вашокова). Переход на автогенную плавку сульфидного сырья рассматривается как значительное достижение в пирометаллургии, сочетающее энергосбережение и экологическую безопасность. Параллельно с развитием автогенных процессов велись исследования по утилизации оксидов серы, включая SO_2, с целью получения серы и серной кислоты. Диссертация О.Г. Еремина была посвящена разработке технологии получения серы из отходящих газов на основе восстановления диоксида серы природным газом, которая была успешно внедрена в промышленном масштабе на Норильской горно-металлургической компании [21].

На основании представленных мнений авторов, можно выделить следующие основные моменты и сформировать общий вывод относительно проблемы выбросов SO_2.

Так, все авторы сходятся во мнении о высокой актуальности проблемы утилизации серы и ее оксидов (главным образом, диоксида серы) из отходящих газов промышленных предприятий, особенно металлургических. Это связано как с экономическими выгодами, так и с необходимостью защиты окружающей среды от вредных выбросов. Особое внимание уделяется металлургическим

ВКР УлГУ

предприятиям как крупным источникам выбросов SO_2, образующегося при переработке сульфидного сырья. Выделяются достижения в разработке автогенных процессов, позволивших уменьшить объемы выбросов, а также необходимость дальнейшего развития технологий утилизации. Также авторы подчеркивают негативное воздействие диоксида серы на здоровье человека (органы дыхания, нервная система, общая смертность и заболеваемость) и на окружающую среду (образование серной кислоты, кислотные дожди и т.д.). Выделяется необходимость контроля и снижения выбросов этого загрязнителя. Обсуждается проблема методологии оценки выбросов SO_2, связанная с использованием расчетных методов, основанных на упрощенных предположениях и данных прямых измерений, что может приводить к неточностям и противоречиям.

Таким образом, нормативно-правовое регулирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (в т.ч. SO_2) в Российской Федерации представляет собой сложную систему, направленную на обеспечение благоприятной окружающей среды и здоровья населения. Дальнейшее совершенствование нормативной базы и усиление контроля за соблюдением экологических требований являются важными задачами, стоящими перед государством и бизнесом в целях снижения негативного воздействия на окружающую среду и достижения устойчивого развития страны.

Мнения вышеуказанных в данном разделе авторов сходятся в том, что выбросы SO_2, представляют собой серьезную экологическую и экономическую проблему. Основными источниками этих выбросов являются металлургические предприятия, использующие сульфидное сырье. Несмотря на определенные успехи в разработке технологий, уменьшающих выбросы SO_2, необходимы дальнейшие усилия по совершенствованию методов утилизации серы и ее оксидов, а также по развитию более точных и надежных методов оценки выбросов этих веществ. Решение этой проблемы требует комплексного подхода, включающего разработку новых технологий, совершенствование законодательства и повышение экологической ответственности предприятий.

ВКР УлГУ

1.2 Факторы негативного воздействия металлургических предприятий на окружающую среду, в частности источники выбросов оксидов серы

Металлургическое производство, являясь одной из ключевых отраслей экономики, оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду. Это обусловлено сложным комплексом факторов, включающих выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, загрязнение водных ресурсов и почвенного покрова, образование отходов производства и потребления и другое. Понимание и анализ этих факторов является необходимым условием для разработки эффективных природоохранных мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия металлургических предприятий на окружающую среду [24].

Основные факторы негативного воздействия включают загрязнение атмосферного воздуха, водных ресурсов, почвенного покрова, растительного и животного мира.

Металлургические процессы сопровождаются выбросами широкого спектра загрязняющих веществ в атмосферный воздух, включая: SO_2 (основной источник – сжигание серосодержащего топлива и переработка сульфидных руд. SO_2 являются причиной кислотных дождей, респираторных заболеваний и повреждения растительности); оксиды азота образуются при высокотемпературных процессах горения и способствуют образованию смога, оказывая негативное воздействие на здоровье человека); твердые частицы (пыль, сажа), образующиеся при дроблении, измельчении и переработке сырья, вызывают респираторные заболевания и ухудшают видимость; тяжелые металлы (свинец, кадмий, мышьяк, ртуть) выбрасываются в процессе переработки руд и концентратов, обладая высокой токсичностью; углеводороды (бензопирен, фенол) образуются при коксовании угля и других процессах (некоторые углеводороды являются канцерогенами); фтористые соединения (фтористый водород, фториды) выбрасываются при производстве алюминия и других металлов, и оказывают негативное воздействие на растительность и костную

ВКР УлГУ

ткань животных и человека; диоксины и фураны образующиеся в процессах горения, особенно при сжигании отходов, также являются высокотоксичными веществами, обладающими канцерогенными и мутагенными свойствами. Загрязняющие вещества, выбрасываемые металлургическими предприятиями, могут переноситься на большие расстояния и оказывать негативное воздействие на другие регионы и страны [29].

Металлургические предприятия используют большое количество воды для охлаждения оборудования, промывки сырья и других технологических процессов. Сточные воды содержат загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, нефтепродукты, взвешенные вещества, сульфаты, хлориды и органические соединения. Неправильное хранение отходов и утечки из технологического оборудования могут приводить к загрязнению поверхностных и подземных вод. Сброс нагретой воды может приводить к изменению температуры водных объектов и негативно влиять на водные экосистемы.

Выпадения загрязняющих веществ из атмосферного воздуха и сброс сточных вод могут приводить к загрязнению почв тяжелыми металлами, фторидами, сульфатами и другими токсичными веществами. Кислотные дожди, вызванные выбросами оксидов серы и азота, приводят к закислению почв и негативно влияют на растительность и микроорганизмы [29].

Металлургические предприятия образуют большое количество отработанных материалов и оборудования, которые требуют утилизации или захоронения.

Объем выбросов SO_2 на металлургическом предприятии зависит от следующих основных факторов:

– тип сырья: основным фактором, определяющим объем выбросов оксидов серы, является содержание серы в используемом сырье (руде, концентрате, топливе). Чем выше содержание серы, тем больше SO_2 образуется при переработке или сжигании сырья; различные виды сырья могут содержать серу в разных формах (например, сульфиды, сульфаты, органическая сера). В

ВКР УлГУ

зависимости от формы серы и условий переработки образуются различные объемы;

– технология производства: различные технологические процессы (например, обжиг, плавка, конвертирование) характеризуются разной степенью выбросов SO_2; несовершенство технологических процессов и оборудования может приводить к увеличению выбросов SO_2 (например, неполное сгорание топлива или неэффективная работа оборудования для улавливания газов приводят к увеличению выбросов); предварительная обработка сырья (например, обессеривание угля) может снизить содержание серы и, соответственно, уменьшить выбросы SO_2;

– оборудование: наличие и эффективность оборудования для очистки отходящих газов от SO_2 (например, скрубберы, абсорбционные установки, каталитические реакторы) оказывают решающее влияние на объем выбросов SO_2; изношенное и неисправное оборудование работает менее эффективно и может приводить к увеличению выбросов; неоптимальный режим работы оборудования (например, неправильная подача реагентов в скруббер) может снижать эффективность очистки газов [35].

К факторам внешней среды, влияющих на объем выбросов SO_2 относятся климатические условия (температура, влажность и направление ветра могут влиять на распространение и рассеивание серы в атмосфере). Например, температура окружающей среды может влиять на химические реакции, происходящие в атмосфере, в том числе на окисление SO_2 до сульфатов. Влияние это, как правило, незначительное. Высокая влажность воздуха способствует образованию кислотных дождей, так как SO_2 реагирует с водой, образуя серную кислоту. Кроме того, влажность может влиять на эффективность работы некоторых систем очистки газов, например, скрубберов. Низкая влажность может наоборот способствовать более быстрому рассеиванию загрязняющих веществ. Ветер играет ключевую роль в рассеивании и переносе SO_2 и других загрязняющих веществ в атмосфере. Сильный ветер способствует более быстрому рассеиванию выбросов, снижая концентрацию SO_2 вблизи источника.

ВКР УлГУ

Слабый ветер, особенно в сочетании с инверсиями, может приводить к накоплению SO_2 в приземном слое атмосферы, создавая зоны повышенного загрязнения. Преобладающее направление ветра определяет, в каких районах будут наиболее сильно ощущаться последствия выбросов SO_2 [33].

На объем выбросов SO_2 также влияет географическое расположение предприятия вблизи населенных пунктов или особо охраняемых природных территорий. Так, если металлургическое предприятие расположено вблизи густонаселенных районов, требования к снижению выбросов SO_2 значительно возрастают. Близость к особо охраняемым природным территориям (далее – ООПТ) также приводит к существенному ужесточению экологических требований. SO_2 может оказывать негативное воздействие на растительность, животный мир и водные экосистемы ООПТ, нарушая их устойчивость и биоразнообразие.

Таким образом, на основе проведенного анализа факторов негативного воздействия металлургических предприятий на окружающую среду и факторов, влияющих на объем выбросов SO_2, можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода к решению экологических проблем в данной отрасли. Для снижения негативного воздействия необходимо совершенствование технологических процессов; внедрение эффективных технологий очистки выбросов и сточных вод; обеспечение рационального использования природных ресурсов; правильное размещение и утилизация отходов производства; а также постоянный экологический мониторинг. В частности, для сокращения выбросов SO_2 необходимо использовать сырье с низким содержанием серы, внедрять современные технологии очистки газов и регулярно проводить модернизацию оборудования. Только комплексный подход позволит обеспечить устойчивое развитие металлургической промышленности и сохранить окружающую среду для будущих поколений.

Рассмотрим основные технологические процессы, приводящие к образованию выбросов SO_2.

Обжиг сульфидных руд – наиболее значительный источник выбросов SO_2.

ВКР УдГУ

Многие цветные металлы (медь, никель, цинк, свинец) получают из сульфидных руд. В процессе обжига сульфиды металлов реагируют с кислородом воздуха при высоких температурах, образуя оксиды металлов и серы. Плавка сульфидных концентратов проводится после обжига для получения чернового металла. В процессе плавки также выделяется SO_2, хотя и в меньших количествах, чем при обжиге. Процесс продувки расплавленного черного металла воздухом или кислородом для удаления примесей, таких как сера и железо. Выделяется значительное количество SO_2. Используется, например, в производстве меди и никеля. Агломерация сульфидных руд и концентратов – это процесс окускования мелких рудных материалов перед плавкой. В процессе агломерации также происходит окисление сульфидов и выделение SO_2. Производство серной кислоты из SO_2, полученного из отходящих газов металлургических процессов, является способом утилизации. Однако, даже при эффективной работе установок по производству серной кислоты, возможны выбросы SO_2. Использование угля, мазута и природного газа для обеспечения энергией различных металлургических процессов также приводит к выбросам SO_2, особенно если топливо содержит серу. Вспомогательные процессы, такие как сушка руды, производство кокса (в коксохимическом производстве, связанном с черной металлургией), могут быть источниками выбросов SO_2.

В таблице 3 наглядно представлены источники выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях.

Таблица 3 – Источники выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях

Источник выбросов	Основной технологический процесс	Факторы, влияющие на объем выбросов SO_2
1	2	3
Обжиг сульфидных руд	Окисление сульфидов металлов кислородом при высоких температурах	Содержание серы в руде, температура обжига, доступ кислорода
Плавка сульфидных концентратов	Получение чернового металла после обжига	Содержание серы в концентрате, технология плавки
Конвертирование	Продувка расплавленного черного металла воздухом или кислородом	Содержание серы в металле, интенсивность продувки

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Агломерация	Окускование мелких рудных материалов перед плавкой	Содержание сульфидов в материале, температура агломерации
Производство серной кислоты	Утилизация SO_2 из отходящих газов	Эффективность работы установки, режим работы
Сжигание топлива	Обеспечение энергией различных процессов (уголь, мазут, природный газ)	Содержание серы в топливе, эффективность сжигания
Вспомогательные процессы	Сушка руды, производство кокса	Содержание серы в материалах, температурный режим
Общие факторы	-	Наличие и эффективность установок очистки газов, соблюдение технологических регламентов и экологических норм

Оценка объемов и состава выбросов SO_2 по различным источникам на металлургических предприятиях зависит от множества факторов, включая: содержание серы в руде или концентрате является основным фактором, определяющим количество SO_2, которое может быть образовано; используемые технологические процессы (обжиг, плавка, конвертирование и т.д.) и их параметры (температура, давление, состав газовой среды) существенно влияют на объемы выбросов; наличие и эффективность установок очистки отходящих газов (например, установок по производству серной кислоты, скрубберов) оказывают решающее влияние на количество SO_2, выбрасываемого в атмосферу; содержание серы в топливе является ключевым фактором, определяющим выбросы SO_2 при сжигании [33].

Отметим, что наиболее точная оценка объемов и состава выбросов SO_2 достигается с помощью инструментальных измерений, проводимых аккредитованными лабораториями. При отсутствии данных инструментальных измерений используются расчетные методы, основанные на материальном балансе процессов, нормативных коэффициентах выбросов и данных о расходе сырья и топлива. На крупных предприятиях устанавливаются системы

ВКР УдГУ

непрерывного мониторинга выбросов, которые позволяют отслеживать концентрацию SO_2 в режиме реального времени.

Таким образом, выбросы SO_2 на металлургических предприятиях связаны с широким спектром технологических процессов, начиная от обжига сульфидных руд и заканчивая сжиганием топлива. Наибольший вклад в общие выбросы SO_2 вносят процессы обжига и плавки сульфидных руд и концентратов, что обусловлено высоким содержанием серы в исходном сырье. Объемы и состав выбросов варьируются в зависимости от используемых технологий, состава сырья и эффективности применяемых систем газоочистки. Для эффективного снижения выбросов SO_2 необходимо комплексное применение различных мер, включая совершенствование технологических процессов, внедрение современных методов газоочистки (таких как производство серной кислоты), использование топлива с низким содержанием серы и строгий контроль за соблюдением экологических норм и требований. Непрерывный мониторинг выбросов и применение как инструментальных, так и расчетных методов оценки являются необходимыми условиями для эффективного управления выбросами SO_2 на металлургических предприятиях и минимизации их негативного воздействия на окружающую среду.

1.3 Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях

Важным этапом исследования является сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в данной области, включающий изучение лучших доступных технологий и практик, анализ экономических и экологических показателей внедрения различных технологий и оценку возможности адаптации зарубежного опыта к российским условиям. Результаты данного анализа позволят выявить наиболее перспективные направления для снижения выбросов SO_2 и повышения экологической безопасности металлургической промышленности в России.

ВКР УлГУ

Рассмотрим зарубежный опыт в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях.

Технологии очистки отходящих газов с помощью установки по производству серной кислоты (WSA, SNOX). Данные технологии являются одними из наиболее эффективных и экологически устойчивых методов утилизации SO_2. WSA (Wet gas Sulfuric Acid) преобразует влажные газы, содержащие SO_2, в концентрированную серную кислоту. SNOX является интегрированной системой, разработанной для одновременного удаления SO_2 из промышленных газов. Обе технологии отличаются высокой степенью очистки газов и возможностью получения ценного побочного продукта – серной кислоты. Принцип работы WSA следующий – отходящие газы, содержащие SO_2, проходят через реактор, где SO_2 окисляется до триоксида серы (далее – SO_3) с использованием катализатора. Затем SO_3 абсорбируется водой с образованием серной кислоты. Вода, испаряющаяся в процессе, конденсируется, и полученная серная кислота концентрируется до необходимой концентрации. Важным преимуществом WSA является работа с влажными газами без предварительной сушки, что снижает энергозатраты. Технология SNOX объединяет селективное каталитическое восстановление для удаления оксида азота (далее – N_2O) и каталитическое окисление SO_2 до SO_3 с последующей абсорбцией для производства серной кислоты. Это позволяет одновременно решить проблемы выбросов SO_2 и N_2O [51].

Отметим преимущества и недостатки данных технологий.

Преимущества данных технологий: высокая эффективность удаления SO_2 (до 99,9%); получение товарной серной кислоты, снижающее операционные расходы; низкий уровень выбросов других загрязняющих веществ; минимальное образование отходов; возможность утилизации тепловой энергии. Недостатки: высокие капитальные затраты на строительство установки; необходимость квалифицированного персонала для эксплуатации.

Данные технологии широко применяются, например, в Канаде внедрена WSA на медеплавильном заводе для утилизации SO_2 и производства серной

ВКР УлГУ

кислоты. Компания Boliden (Швеция) является одним из лидеров в области устойчивого развития и экологической безопасности в металлургической промышленности. Компания внедрила комплексную программу по снижению выбросов SO_2, которая включает модернизацию оборудования, внедрение WSA и системы контроля выбросов.

Скрубберы представляют собой высокоэффективные системы контроля загрязнения воздуха, которые используют жидкие среды для удаления вредных газов и твердых частиц из промышленных выбросов. В контексте улавливания SO_2, эти устройства играют критически важную роль в соблюдении экологических стандартов и защите окружающей среды. Современные скрубберы способны достигать эффективности удаления SO_2 до 99%, что делает их незаменимыми для угольных электростанций, металлургических предприятий и химических производств. Скрубберы используют абсорбцию SO_2 в жидкой фазе с использованием различных реагентов, таких как известняк ($CaCO_3$) или аммиак (NH_3). Принцип работы скрубберов – дымовые газы проходят через скруббер, где контактируют с абсорбентом. SO_2 реагирует с абсорбентом, образуя соединения, которые затем удаляются из газового потока. В известняковых скрубберах образуется сульфит и сульфат кальция, которые образуют шлам. В аммиачных скрубберах образуется сульфат аммония, который может быть использован в качестве удобрения [36]. Преимущества использования: относительно невысокие капитальные затраты; простота эксплуатации; высокая эффективность удаления SO_2; возможность одновременного удаления других загрязняющих веществ. Недостатки: образование больших объемов шлама, требующего утилизации; необходимость в больших объемах абсорбента: возможность загрязнения сточных вод [51].

В США и Германии широко используются известняковые скрубберы на электростанциях для очистки дымовых газов от SO_2, аммиачные скрубберы применяются на металлургических комбинатах для утилизации SO_2 с получением сульфата аммония.

На рисунке 1 изображена мокрая газоочистная установка (скруббер),

ВКР УлГУ

используемая в металлургии для удаления SO_2.

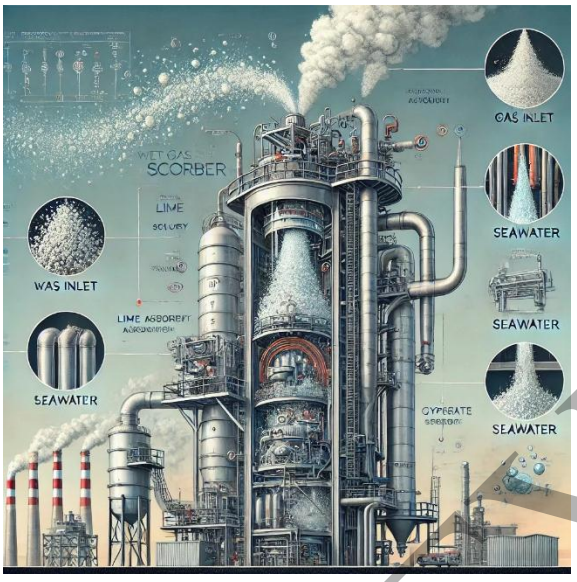


Рисунок 1 – Мокрая газоочистная установка (скруббер), используемая в металлургии для удаления SO_2 [48]

Скрубберы используют жидкость (обычно известковое молоко, морскую воду или растворы щелочей) для абсорбции SO_2. Наиболее распространена известково-гипсовая технология, при которой оксид серы реагирует с известковым раствором, образуя гипс [48]. На рисунке 1 показана конструкция системы с форсунками, распыляющими жидкость-абсорбент, и процесс взаимодействия с газами.

Адсорбция с использованием активированного угля – это метод очистки газов от SO_2, основанный на способности активированного угля адсорбировать молекулы SO_2 на своей поверхности. Данный процесс является обратимым, что позволяет регенерировать адсорбент и повторно использовать его. Рассмотрим принцип работы – газы, содержащие SO_2, проходят через слой активированного угля, где SO_2 адсорбируется. После насыщения адсорбента его регенерируют путем нагрева или обработки паром, при этом SO_2 десорбируется и может быть направлен на дальнейшую переработку [36]. Преимущества данной технологии: высокая эффективность удаления SO_2; возможность регенерации адсорбента; низкие эксплуатационные расходы и получение концентрированного SO_2 после

ВКР УдГУ

десорбции. Недостатки заключаются в высокой стоимости активированного угля; необходимости в предварительной очистке газов от пыли и других загрязняющих веществ и потери адсорбционной способности угля со временем.

Данный метод очистки газов от SO_2 применяется в Японии на небольших предприятиях и в химической промышленности.

Далее рассмотрим технологии предотвращения выбросов SO_2.

Использование кислородно-факельной плавки – это технология, при которой плавка сульфидных руд и концентратов осуществляется в присутствии чистого кислорода. Это позволяет получить более концентрированный SO_2 в отходящих газах, что облегчает его утилизацию для производства серной кислоты или элементарной серы. Принцип работы – в печь подается чистый кислород вместо воздуха, что приводит к интенсификации процесса плавки и уменьшению объема отходящих газов. Благодаря высокой концентрации SO_2, отходящие газы могут быть направлены непосредственно на установки сернокислотного производства без предварительной очистки. К преимуществам данной технологии относятся: снижение объема отходящих газов; повышение концентрации SO_2; уменьшение выбросов пыли и других загрязняющих веществ, а также снижение энергозатрат на очистку газов. Технология кислородно-факельной плавки имеет следующие недостатки – высокие капитальные затраты на внедрение технологии и необходимость в больших объемах кислорода [49].

Данная технология широко используется в Японии и Австралии на медеплавильных и никелевых заводах.

Прямое использование кислорода в различных металлургических процессах, таких как обжиг, конвертирование и плавка, позволяет уменьшить общий объем отходящих газов и повысить концентрацию SO_2. Это облегчает утилизацию SO_2 и снижает общие выбросы. Принцип работы – кислород подается непосредственно в зону реакции, что интенсифицирует процесс и уменьшает потребность в дополнительных объемах воздуха. Это приводит к сокращению объема отходящих газов и увеличению концентрации SO_2. Преимущества данного процесса – снижение объема отходящих газов,

ВКР УлГУ

повышение концентрации SO_2 и улучшение технологических показателей процесса. К недостаткам относятся необходимость в больших объемах кислорода и модификация существующего оборудования [49].

Итак, зарубежный опыт в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях демонстрирует комплексный подход, сочетающий в себе как технологии очистки отходящих газов, так и методы предотвращения выбросов. Так, в зависимости от специфики предприятия, состава отходящих газов и экономических факторов, применяются различные технологии. Это включает в себя установки по производству серной кислоты (WSA, SNOX), скрубберы (известняковые, аммиачные) и адсорбционные методы (активированный уголь). Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного метода должен быть обоснован технико-экономическим анализом. Многие передовые предприятия рассматривают SO_2 не как отход, а как ценный ресурс, который можно переработать в полезные продукты, такие как серная кислота и сульфат аммония. Это не только снижает воздействие на окружающую среду, но и обеспечивает дополнительный доход. Использование кислородно-факельной плавки и прямое использование кислорода в металлургических процессах позволяют снизить общий объем отходящих газов и повысить концентрацию SO_2, что облегчает его дальнейшую утилизацию. Успешные предприятия, такие как Boliden, реализуют комплексные программы по снижению выбросов SO_2, включающие модернизацию оборудования, внедрение передовых технологий и постоянный мониторинг выбросов. Зарубежный опыт показывает, что устойчивое развитие и экологическая безопасность являются приоритетными задачами для металлургических компаний. Инвестиции в экологически чистые технологии рассматриваются как важный вклад в будущее и способ повышения конкурентоспособности.

В целом, зарубежный опыт свидетельствует о том, что сокращение выбросов SO_2 на металлургических предприятиях требует комплексного и системного подхода, сочетающего в себе внедрение передовых технологий,

ВКР УлГУ

утилизацию отходов и постоянный экологический мониторинг. Следование этим принципам позволяет не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить экономическую эффективность предприятий.

Далее рассмотрим отечественный опыт в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях.

По технологии очистки отходящих газов применяются известняковые скрубберы. Данная технология является наиболее распространенной в России, благодаря своей относительной простоте и доступности. Однако, часто требуется модернизация существующих скрубберов с целью повышения их эффективности и снижения объемов образующегося шлама, требующего утилизации. Проблема заключается в том, что многие действующие скрубберы являются устаревшими и не обеспечивают требуемую степень очистки газов, соответствующую современным экологическим стандартам [46].

Установки сернокислотного производства (далее – СКП) применяются для утилизации SO_2 из отходящих газов и производства серной кислоты, что позволяет не только снизить выбросы, но и получить ценный побочный продукт. Однако, для обеспечения экологической безопасности и экономической целесообразности, существующие СКП часто требуют модернизации, направленной на повышение производительности, снижение энергопотребления и минимизацию образования отходов.

Примером реализации проектов модернизации СКП является деятельность компании «Норильский Никель», реализующей масштабную программу по улавливанию и переработке SO_2 на своих предприятиях. Так, в октябре 2023 года на Надеждинском металлургическом заводе в Норильске стартовал первый этап флагманского проекта градообразующей компании – «Серной программы». В сентябре 2024 года началось комплексное опробование второй линии программы [43]. Технологии, принятые для «Серной программы», позволяют улавливать не менее 99% SO_2 на основных плавильных агрегатах, на которых они применены, и учитывают особенности рудной базы Норильского промышленного района,

ВКР УлГУ

применяемые пирометаллургические процессы, а также логистические ограничения Норильска (отсутствие внешнего ж/ д сообщения, ограниченный период навигации по Енисею, межнавигационный период, при котором есть только авиасообщение, условия логистики по Северному морскому пути). Утилизация SO_2 происходит с получением серной кислоты и ее последующей нейтрализацией известняком с производством гипса. По словам главного менеджера управления производственной экологии департамента экологии компании «Норильский Никель» Анжелы Орловой, в 2024 году выбросы SO_2 сократились почти на 400 тыс. тонн, в 2025 году планируется снижение выброса SO_2 более чем на 730 тыс. тонн в год [44].

К технологиям предотвращения выбросов относятся совершенствование процессов обжига и плавки и переход на более экологичные виды сырья и топлива. Направление совершенствования процессов обжига и плавки включает в себя разработку и внедрение новых технологических решений, направленных на снижение образования SO_2 на стадиях обжига и плавки сульфидных руд. Это может включать в себя оптимизацию параметров процесса, использование обогащенного кислородом дутья, а также применение автогенных процессов плавки, таких как плавка во взвешенном состоянии. Использование сырья с меньшим содержанием серы и переход на более экологичные виды топлива (например, природный газ вместо угля) также способствует снижению выбросов SO_2.

Например, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» – многопрофильная промышленная компания национального масштаба, которая объединила в одну технологическую цепочку предприятия горнодобывающего, металлургического и металлообрабатывающего комплексов осуществляет внедрение современных технологий очистки газов на медеплавильных заводах, направленных на снижение выбросов SO_2 и других загрязняющих веществ. Это включает в себя модернизацию существующих скрубберов и строительство новых установок очистки газов, соответствующих современным экологическим требованиям [47].

ВКР УдГУ

В целом, отечественный опыт в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях свидетельствует о наличии прогресса в данном направлении. Однако, для достижения значительных результатов необходим комплексный подход, включающий в себя: масштабную модернизацию существующих установок очистки отходящих газов, с целью повышения их эффективности и экологической безопасности; внедрение передовых технологий предотвращения выбросов, направленных на снижение образования SO_2 на стадиях технологического процесса; разработку и реализацию комплексных программ по снижению выбросов SO_2 на уровне отдельных предприятий и отрасли в целом; усиление государственного контроля за соблюдением экологических норм и стандартов, а также внедрение механизмов экономического стимулирования, направленных на поддержку экологически чистых технологий и активное привлечение научного сообщества и инжиниринговых компаний к разработке и внедрению инновационных решений в области сокращения выбросов SO_2.

В таблице 4 наглядно представим сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях.

Таблица 4 – Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов оксидов серы на металлургических предприятиях

Критерий сравнения	Зарубежный опыт	Отечественный опыт
1	2	3
Технологии очистки газов	Установки по производству серной кислоты (WSA, SNOX): высокая эффективность, получение товарной продукции, но высокие капитальные затраты. Скрубберы (известняковые, аммиачные): относительно простые, высокая эффективность, но образование шлама. Адсорбция активированным углем: высокая эффективность, регенерация адсорбента, но высокая стоимость материала	Известняковые скрубберы: наиболее распространены, но часто требуют модернизации. Установки сернокислотного производства (СКП): модернизация для повышения производительности и снижения энергопотребления

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 4

1	2	3
Предотвращение выбросов	Совершенствование процессов обжига и плавки, использование сырья с низким содержанием серы, переход на экологичное топливо	Совершенствование процессов обжига и плавки, переход на более экологичные виды сырья и топлива
Примеры реализации	Канада: внедрение WSA на медеплавильном заводе. Швеция: комплексная программа по снижению выбросов SO_2. США, Германия: аммиачные скрубберы на металлургических комбинатах. Япония: адсорбция активированным углем на малых предприятиях	«Норильский Никель»: улавливание и переработка SO_2. ОАО «Уральская горно-металлургическая компания»: внедрение современных технологий очистки газов на медеплавильных заводах
Общие тенденции	Активное использование передовых технологий, комплексный подход к решению проблемы, государственная поддержка и стимулирование экологических инициатив	Модернизация существующих установок, внедрение передовых, разработка комплексных программ, усиление государственного контроля
Основные проблемы	Высокие капитальные затраты при внедрении некоторых технологий, необходимость квалифицированного персонала	Устаревшие технологии, недостаточная эффективность очистки газов, образование отходов, требующих утилизации

Таким образом, сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях демонстрирует, что существуют эффективные технологии и практики, позволяющие значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду. Зарубежный опыт предлагает передовые решения, такие как WSA, SNOX, которые позволяют достичь высокой степени утилизации SO_2 и снизить общие объемы выбросов. В то же время, отечественные предприятия активно модернизируют существующие технологии, такие как известняковые скрубберы и установки сернокислотного производства. Адаптация зарубежного опыта к российским условиям требует учета экономических, инфраструктурных и климатических особенностей, а также состава сырья.

ВКР УдГУ

2 ПРОЕКТНЫЙ РАЗДЕЛ

2.1 Краткая характеристика деятельности ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» как объекта исследования

ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» (далее – «НМЗ им. Б.И. Колесникова» образован 10 октября 1979 года и входит в состав Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» – базового предприятия компании [39].

Местоположение завода – плато Надежда в 12 км от г. Норильск, автодорога Норильск-Алыкель, д. 64, стр. 10, Красноярский край, Сибирский федеральный округ (рисунок 2). Предприятие также носит название «Надежда».



Рисунок 2 – ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова»

С 2003 года предприятие носит название им. Б.И. Колесникова. Борис Иванович руководил Норильским комбинатом на протяжении 15 лет (с 1973 года по 1988 год) и именно под его руководством возвели «Надежду».

Строительство Надеждинского металлургического завода напрямую

РЕПОЗИТОРИЙ УдГУ

связано с освоением открытого в 1960 году Талнахского рудного узла – одного из самых крупных месторождений медно-никелевых руд в мире. Те производственные мощности, что были задействованы в Норильске, после начала разработки этого месторождения катастрофически не справлялись с количеством руды, поставляемой с рудников Талнаха. Поэтому в 1964 году официально было принято решение о строительстве нового производства [41].

История строительства «НМЗ им. Б.И. Колесникова» представлена в таблице 5.

Таблица 5 – История строительства ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» [39]

Дата	Описание
23 сентября 1968 года	Минцветмет СССР подписал техническое задание на проектирование Второго никелевого завода НГМК (будущей «Надежды»)
27 ноября 1970 года	Совмин СССР подписал постановление № 959 «О строительстве Второго никелевого завода НГМК»
23 февраля 1971 года	на стройплощадку «Надежда» прибыла строительная бригада СМУ-2 «ХантайГЭСстрой» Началось строительство гидрометаллургического передела (первой очереди НМЗ)
13 апреля 1973 года	Совмина СССР подписал постановление о разработке технического проекта пирометаллургического передела (второй очереди НМЗ)
1975 год	формируется коллектив сотрудников основных цехов гидрометаллургического производства
10 октября 1979 года	Государственная комиссия подписала акт о приеме в эксплуатацию гидрометаллургии «Надежды». Этот день становится днем рождения Надеждинского металлургического завода
30 апреля 1981 года	произведен первый никелевый штейн, конвертированный в файнштейн в ПВП
22 сентября 1981 года	дата приемки в эксплуатацию Надеждинского металлургического завода полностью

На сегодняшний день «НМЗ им. Б.И. Колесникова» обрабатывает весь никель-пирротиновый концентрированный продукт и продукт содержащий металл с обогатительной фабрики в г. Талнах, а также никелевое и пирротиновое сгущенное концентрированное вещество с обогатительной фабрики в г. Норильск.

Готовая продукция завода – файнштейн и элементарная сера.

На предприятии существует 3 типа производства:

– гидрометаллургическое – перерабатывает металлосодержащий продукт,

ВКР ЮУрГУ

поступающий с обогатительной фабрики в г. Талнах, результат переработки – сульфидный концентрат и техническая сера;

– пирометаллургическое – обрабатывает сгущенные концентраты руды. Результат обработки – файнштейн, то есть промежуточный продукт, который направляется на последующую переработку, после которой на выходе получают такие металлы, как медь, никель, кобальт, а также концентраты редкоземельных и драгоценных металлов;

– производство технического кислорода – изготавливают технический кислород и азот, которые в дальнейшем используются на металлургических переделах ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» и медного завода [41].

«НМЗ им. Б.И. Колесникова» – это металлургический гигант, штат которого насчитывает около 2500 работников. Единственный завод в России применяющий финскую технологию взвешенной плавки. На сегодняшний день «НМЗ им. Б.И. Колесникова» – единственное предприятие Заполярья, принадлежащее Норникелю, которое производит медно-никелевый файнштейн (основная продукция завода).

В таблице 6 представим наглядно краткую характеристику деятельности «НМЗ им. Б.И. Колесникова» как объекта исследования.

Таблица 6 – Краткая характеристика деятельности ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» как объекта исследования

Характеристика	Описание
1	2
Основание и принадлежность	Основан 10 октября 1979 года, входит в состав Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель»
Местоположение	Плато Надежда, 12 км от г. Норильск, автодорога Норильск-Алыкель, д. 64, стр. 10, Красноярский край, Сибирский федеральный округ
История	Назван в честь Б.И. Колесникова, руководившего Норильским комбинатом с 1973 по 1988 год; построен для переработки руды Талнахского рудного узла
Сырьевая база	Никель-пирротиновый концентрированный продукт и продукт, содержащий металл, с обогатительной фабрики в г. Талнах, а также никелевое и пирротиновое сгущенное концентрированное вещество с обогатительной фабрики в г. Норильск

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 6

1	2
Основная продукция	Файнштейн, элементарная сера
Типы производства	Гидрометаллургическое (сульфидный концентрат и техническая сера); пирометаллургическое (файнштейн, медь, никель, кобальт, концентраты редкоземельных и драгоценных металлов); производство технического кислорода (технический кислород и азот)
Особенности и инновации	Единственный завод в России, использующий финскую технологию взвешенной плавки; производит нейтрализацию серной кислоты из SO_2; единственное предприятие Заполярья, принадлежащее Норникелю, производящее медно-никелевый файнштейн
Стратегическое значение	Важен для экономики Норильска и российской экономики в целом

Таким образом, в состав предприятия ПАО «ГМК Норильский никель», Заполярный филиал, Надеждинский металлургический завод имени Б.И. Колесникова входит три производства – гидрометаллургическое, пирометаллургическое производство и производство кислорода. Расстояние до г. Норильск – 12 км. Готовой продукцией предприятия являются файнштейн, медные аноды, элементарная сера и технологический кислород. Медно-никелевый файнштейн перерабатывается до получения катодного никеля и катодной меди на предприятиях группы компаний ПАО ГМК «Норильский никель». Пар используется для выработки электроэнергии и снабжения теплом заводских объектов и одного из районов Норильска – Кайеркана. Гранулированный шлак используют в качестве заполнителя при приготовлении закладочных смесей на рудниках Заполярного филиала. Кроме этого, продукцией Надеждинского металлургического завода является технологический кислород, который используется на основном производстве для технологических и ремонтных нужд, а также для изготовления медицинского кислорода. Надеждинский металлургический завод имени Б.И. Колесникова поставлен на государственный учет в федеральный государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду с присвоением ему 04 – 0124 – 000155 – П и I-й категории негативного воздействия на окружающую среду.

ВКР УлГУ

2.2 Анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия

Данные о параметрах существующих источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для «НМЗ им. Б.И. Колесникова» приняты в соответствии с действующим Расчетом нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Перечень выбросов загрязняющих веществ предприятия, их класс опасности представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень выбросов загрязняющих веществ ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», их класс опасности

Загрязняющее вещество		Класс опасности	Выброс веществ	
код	наименование		грамм/сек	тонн/год
1	2	3	4	5
0123	Железа оксид	3	0,237737	6,178710
0143	Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	2	0,000484	0,008098
0155	Натрия карбонат	3	0,093333	0,027418
0164	Никель оксид	2	40,962570	250,560251
0166	Никель сульфат	1	0,000277	0,008641
0184	Свинец и его соединения	1	2,141440	6,028240
0203	Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	1	0,000235	0,001568
0260	Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) (Кобальт окись; кобальт монооксид; кобальт(2+) оксид; кобальт (II) оксид)	2	1,758530	10,213498
0301	Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота)	3	19,160900	217,251405
0322	Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	2	0,135940	4,287055
0328	Углерод (Пигмент черный)	3	0,054551	0,123417
0330	Сера диоксид	3	43859,022313	1120262,620200
0333	Дигидросульфид (Водород сернистый, дигидросульфид, гидросульфид)	2	1,533383	38,726369
0337	Углерода оксид (Углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	4	150,521872	2371,362941
0342	Фториды газообразные	2	0,001695	0,013554
0344	Фториды плохо растворимые	2	0,000726	0,007077
0410	Метан	4	-	-
0616	Диметилбензол (смесь о-, м-, п-изомеров) (Метилтолуол)	3	0,862786	10,444521
0621	Метилбензол (Фенилметан)	3	0,978651	12,191622
0703	Бенз/а/пирен	1	0,000277	0,002277

ВКР УдГУ

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
2908	Пыль неорганическая: 70-20% SiO_2	3	2,732083	25,874162
2909	Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	3	454,026034	4955,015676
Итого		-	x	1128170,94666

«НМЗ им. Б.И. Колесникова» выбрасывает в атмосферу 21 различный вид загрязняющих веществ. Общая масса этих выбросов за год составляет 1128170,94666 тонн. Значительное количество разнообразных загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу, и огромная общая масса выбросов подчеркивают необходимость разработки и внедрения эффективных мер по снижению негативного воздействия предприятия на окружающую среду, включая оптимизацию технологических процессов и использование современных методов очистки выбросов.

Масса выбросов загрязняющих веществ по классу опасности представлена на рисунке 3.

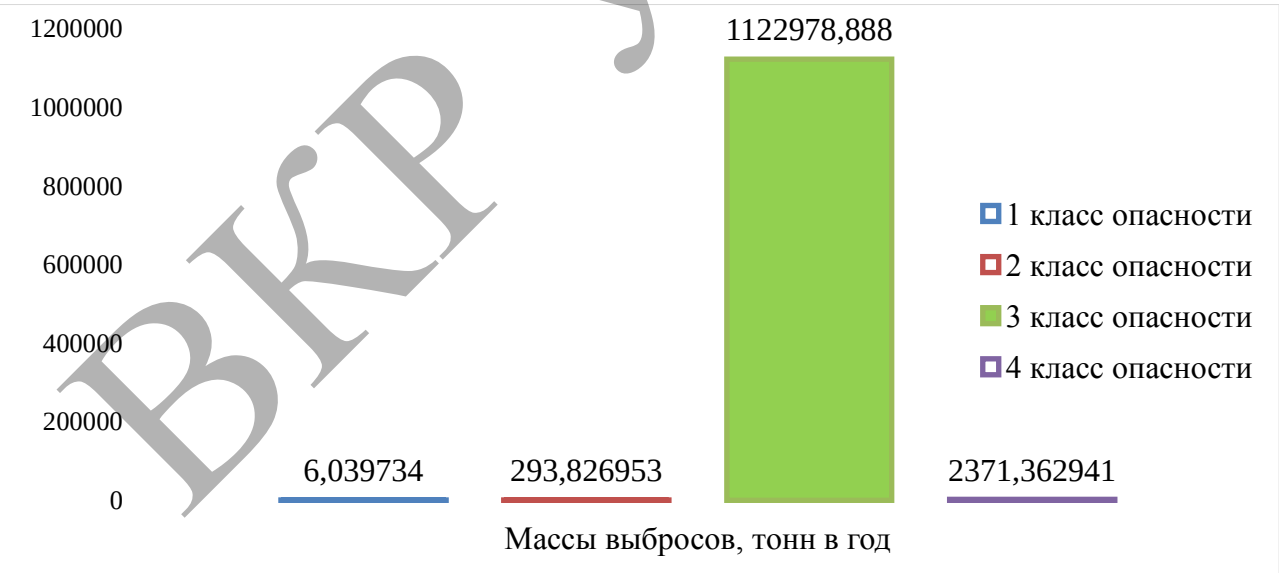


Рисунок 3 – Масса выбросов загрязняющих веществ
по классу опасности, тонн в год

Анализ структуры выбросов «НМЗ им. Б.И. Колесникова» по классу опасности показывает, что наибольшая доля выбросов приходится на вещества

ВКР УлГУ

3 класса опасности, составляя 1122978,887649 тонн в год. Это обусловлено значительным объемом выбросов SO_2, который относится к 3 классу опасности, а также большим объемом выбросов пыли неорганической. Суммарный вклад веществ 1 и 2 класса опасности в общую массу выбросов относительно невелик и составляет 6,039734 и 293,826953 тонн в год соответственно. Выбросы веществ 4 класса опасности составляют 2371,362941 тонн в год. Несмотря на меньшую токсичность, вещества 4 класса опасности требуют внимания, а также необходимо минимизировать поступление в воздух веществ 1 и 2 классов опасности, как наиболее опасных для окружающей среды и здоровья человека.

Вклад каждого вещества в общую массу выбросов (топ-5) представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Вклад каждого вещества в общую массу выбросов загрязняющих веществ (топ-5)

Вещество	Масса выбросов (тонн/год)	Процент от общей массы (%)
Сера диоксид	1120262,620200	99,30
Пыль неорганическая: до 20% SiO2	4955,015676	0,43
Углерода оксид	2371,362941	0,21
Азота диоксид	217,251405	0,019
Никель оксид	250,560251	0,022

Доминирующее влияние на общий объем выбросов загрязняющих веществ «НМЗ им. Б.И. Колесникова» оказывает SO_2, составляющий подавляющую часть – 99,30% от суммарной массы выбросов. Значительно меньший, но всё же существенный вклад вносят пыль неорганическая: до 20% SiO_2 (0,43%) и оксид углерода (0,21%). Доли остальных загрязняющих веществ, включая азота диоксид и никель оксид, малы по сравнению с выбросами SO_2.

Основным направлением экологической стратегии «НМЗ им. Б.И. Колесникова» является масштабная Серная программа, реализуемая на Норильской и Кольской площадках. Программа, использующая преимущественно российские технологии, нацелена на радикальное сокращение выбросов SO_2 (рисунок 4).

Серная программа реализована на российских технологиях и

ВКР УлГУ

оборудовании. Уникальность проекта состоит в том, что оборудование для всех трех линий находится в одних и тех же корпусах, что позволяет параллельно проводить комплексное опробование первой линии и завершать строительно-монтажные работы по двум другим. При этом опыт, полученный при запуске первой линии, применяется на остальных, что способствует более эффективной работе.

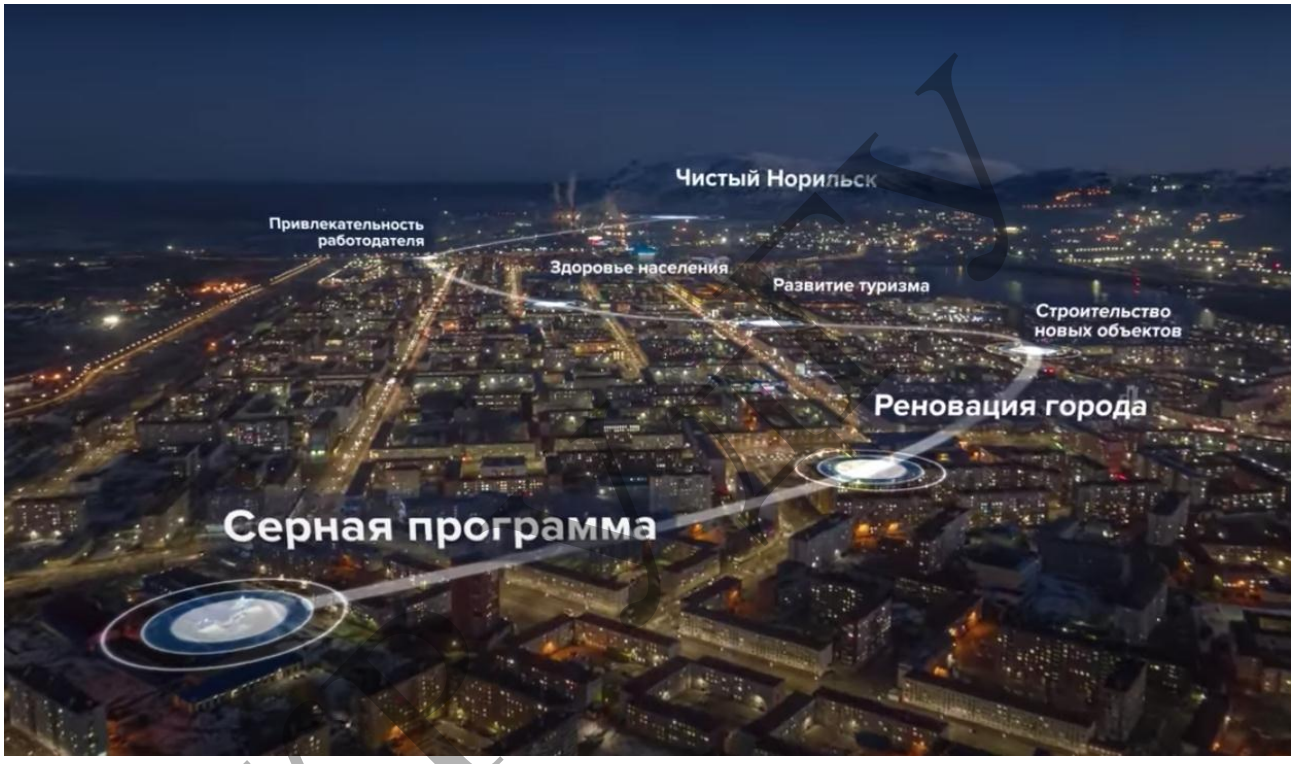


Рисунок 4 – Скриншот видео «Норникеля» о запуске Серной программы

Размер инвестиций «Норникеля» в Серную программу на базе ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» после полной реализации проекта составит более 200 млрд. руб.

Таким образом, основную массу выбросов «НМЗ им. Б.И. Колесникова» составляет SO_2, на его долю приходится 99,30% от общего объема выбросов. Следовательно, для снижения негативного воздействия предприятия на окружающую среду необходимо в первую очередь применять технологии, направленные на сокращение выбросов SO_2.

2.3 Описание технологии снижения выбросов оксида серы на предприятии

Для снижения объемов выбросов SO_2 в атмосферу в «НМЗ им. Б.И. Колесникова» предусмотрена утилизация отходящих сернистых газов пирометаллургического производства, включающая производство технической серной кислоты, участки ее нейтрализации пульпой известняка с получением двуводного гипса, размещаемом на участке по складированию гипсовой пульпы, включающего в себя эстакаду трубопроводов гипсовой пульпы и отделение складирования (наливное гипсохранилище).

Характеристика и описание основные технологических процессов представлена ниже.

1. Участок по производству серной кислоты.

Технология производства серной кислоты включает несколько этапов: охлаждение и мокрая очистка газа; осушка газа; конверсия диоксида серы в триоксид; абсорбция триоксида серы; разбавление концентрированной серной кислоты и получение готовой продукции.

2. Отделение мокрой очистки газа.

Отходящие металлургические газы ПВП-1 и ПВП-2 из металлургического производства с остаточным содержанием пыли до 400 мг/нм^3 и при температуре от 300 до 400°С поступают в входной коллектор, где перемешиваются, усредняются по составу и затем равными потоками раздаются на две технологических системы № 1 и № 2 отделения мокрой очистки газа. Температура металлургических газов при номинальном режиме работы составляет 350°С. Технологическая схема и ее аппаратурное оформление, а также принятый режим работы отделения мокрой очистки газа обуславливаются следующими решениями: очистка газа от примесей осуществляется в башне испарительного охлаждения, башне охлаждения и в двух ступенях мокрых электрофильтров; башня испарительного охлаждения (БИО), как следует из названия, работает в «испарительном» режиме, обеспечивающем интенсивное

ВКР УлГУ

образование большого количества частиц тумана серной кислоты с развитой поверхностью, что способствует улавливанию пылевидных примесей и их последующему выделению из газа вместе с туманом в мокрых электрофильтрах; насадочная башня (БО) работает в конденсационном режиме, что ведет к повышению относительной влажности газа и увеличению размеров капель тумана за счет поглощения ими паров воды; в очищенном газе после мокрых электрофильтров отсутствуют твердые (шламовые) частицы, а содержание тумана серной кислоты не превышает 30 мг/нм^3; в отделении мокрой очистки газа образуется избыточная промывная серная кислота, её количество определяется содержанием серного ангидрида в металлургических газах, количеством водяных паров, сконденсировавшихся из газа при его охлаждении, и количеством воды, подаваемой в мокрые электрофильтры для увлажнения газа и промывки; концентрация раствора промывной серной кислоты цикла орошения башни испарительного охлаждения поддерживается на уровне 15% H_2SO_4; избыточная промывная серная кислота освобождается от растворенного в ней диоксида серы в отдувочной башне, при этом отдутый диоксид серы возвращается в производство; избыточная промывная серная кислота на участке фильтрации освобождается от взвесей уловленных сульфидов металлов, при этом кек фильтрации, содержащий ценные компоненты, возвращается в металлургический передел, а очищенная промывная серная кислота используется для разбавления избыточного моногидрата и получения продукционной серной кислоты; при необходимости получения продукционной серной кислоты более высокой сортности избыточная промывная серная кислота направляется на участок нейтрализации в отделение приготовления известнякового молока, куда также поступает промывная кислота МОГ 3ПК.

3. Сушильно-абсорбционное отделение.

Осушка влажного сернистого газа в сушильной башне ведется серной кислотой с концентрацией 96,0% H_2SO_4 для обеспечения остаточного содержания паров воды в газе не более 0,01% об. Необходимость тщательной осушки газа определяется тем обстоятельством, что повышенное (по сравнению

ВКР УлГУ

с регламентируемым) содержание паров воды в газе ведет к конденсации серной кислоты в аппаратуре контактного узла, а также к образованию трудноулавливаемого тумана серной кислоты в абсорбционном отделении, что, естественно, приводит к существенным потерям серной кислоты с отходящими газами. Абсорбция серного ангидрида осуществляется в промежуточном (ПАб) и конечном (КАб) моногидратных абсорберах. Моногидратные абсорберы орошаются серной кислотой с концентрацией 98,5% H_2SO_4 при температуре 70°С. Кислота этой концентрации имеет минимальное давление паров SO_3 и воды над ней, что определяет максимальное значение степени абсорбции. При меньшей или большей концентрации H_2SO_4, подаваемой на орошение моногидратного абсорбера, её способность поглощать серный ангидрид ухудшается, при этом процесс абсорбции в обоих случаях сопровождается образованием тумана серной кислоты, который практически не улавливается в обычных насадочных колоннах. Наряду с этим степень абсорбции зависит от температуры кислоты, орошающей моногидратный абсорбер, причем с ростом температуры полнота поглощения SO_3 серной кислотой снижается, а процесс образования тумана серной кислоты интенсифицируется. Для моногидратных абсорберов устанавливается один общий сборник, общие насосы и теплообменники. Получение продукционной кислоты 94% H_2SO_4 происходит в продукционном сборнике и узле разбавления в результате смешения отфильтрованной избыточной промывной кислоты с водой и с образующимся из абсорбированного триоксида серы избыточным моногидратом. При необходимости получения продукционной серной кислоты более высокой сортности избыточная промывная серная кислота после фильтрации выводится непосредственно на участок нейтрализации, а для разбавления моногидрата используется только производственная вода.

4. Контактно-компрессорное отделение.

Транспортировка сернистого газа по сернокислотной системе осуществляется четырьмя компрессорами, в том числе один – резервный. Производительность каждого компрессора составляет 230 тыс. $нм^3$ /ч., полный

ВКР УлГУ

напор 4500 мм вод. ст. Допускаемый диапазон регулирования нагрузки компрессора от 30 до 100%. Для безопасного снижения нагрузки компрессора и недопущения перегрева газа предусмотрено байпасирование части газа по газоходу от нагнетательного коллектора компрессора через сушильную башню. Пуск и разогрев контактного узла осуществляется с помощью основного компрессора при пониженной нагрузке 83 тыс. $нм^3$ /ч. Осушенный в сушильной башне газ поступает на всас компрессоров и далее по нагнетательному газоходу подается на контактный узел. Для регулирования газовой нагрузки по системе предусмотрены газовые коллектора с задвижками. Для проведения процесса окисления сернистого ангидрида в серный ангидрид устанавливаются три контактных узла с четырехслойными контактными аппаратами и выносными теплообменниками. Переработка отходящих металлургических сернистых газов с содержанием SO_2 11,3% (на входе в контактный аппарат, номинальный режим) осуществляется с использованием традиционного процесса окисления SO_2 в SO_3 в стационарных условиях на ванадиевом катализаторе, в четырехслойном контактном аппарате, по схеме двойного контактирования 3+1. Расчетная степень конверсии составляет 99,94%, гарантированная при долговременной работе – 99,75%. Для нагрева исходной реакционной смеси до температуры устойчивого протекания реакции окисления SO_2 (от 390 до 420°С) используется тепло реакции окисления SO_2 в SO_3, теплообмен производится во внешних и промежуточных кожухотрубчатых теплообменниках. Избыточное тепло прореагировавшего газа снимается в экономайзерах и используется в проектируемой системе утилизации ВЭР. Для поддержания оптимального температурного режима работы контактного аппарата предусматриваются байпасные газоходы с регулирующими клапанами для регулирования температуры газа на входе во все слои катализатора.

5. Газоходная система от плавильного цеха до цеха производства серной кислоты.

На участок производства серной кислоты технологические газы подаются от трех источников: печи взвешенной плавки № 1 (ПВП-1); печи взвешенной

ВКР УдГУ

плавки № 2 (ПВП-2); третьего плавильного комплекса.

6. Склад серной кислоты.

Номинальная мощность приема продукционной серной кислоты 92,5-94% составляет 2443070 тонн в год. Режим приема – откачки кислоты серной технической – непрерывный, круглосуточный 330 суток в год, 7920 часов в год режим рабочего времени. Загрузка технологического оборудования склада серной кислоты составляет от 45 до 50%. Склад серной кислоты емкостью 24000 тонн рассчитан на хранение трехсуточного запаса кислоты серной технической.

7. Участок нейтрализации серной кислоты.

Участок по нейтрализации технической серной кислоты известняковым молоком включает в себя следующие отделения: отделение приема, складирования и дробления известняка; отделение приготовления известнякового молока; отделение нейтрализации. Отделение нейтрализации рассчитано на нейтрализацию технической серной кислоты ГОСТ 2184-2013 сернокислотного производства, с получением двуводного гипса. Максимальная производительность отделения нейтрализации составляет 2450 тыс. тонн в год по нейтрализуемой серной кислоте (концентрация H_2SO_4 – 94%). Сырьем в отделении нейтрализации являются кислота серная техническая, поступающая со склада серной кислоты сернокислотного производства, и известняковое молоко, поступающее из отделения приготовления известнякового молока. В процессе нейтрализации образуются пульпа двуводного гипса и двуокись углерода. Гипсовая пульпа поступает в гипсохранилище, а двуокись углерода выбрасывается в атмосферу. Гипсовая пульпа поступает в гипсохранилище, а двуокись углерода выбрасывается в атмосферу. Количество пульпы двуводного гипса, полученного в процессе нейтрализации, составляет 3672 $м^3$ /ч.

8. Отделение приёма, складирования и дробления известняка.

Структурно отделение относится к участку нейтрализации комплекса по производству и нейтрализации серной кислоты. Отделение приёма, складирования и дробления известняка представляет собой комплекс зданий, разделенных по технологическим этапам: прием и складирование известняка в

ВКР УлГУ

загрузочных бункерах; участки грохочения и дробления с накопительными бункерами дробленого известняка; перегрузочные узлы и конвейерные галереи.

9. Участок по складированию гипсовой пульпы.

Включает в себя эстакаду трубопроводов гипсовой пульпы и отделение складирования (наливное гипсохранилище). Гипсохранилище косогорного типа, по способу заполнения – намывное. Требуемый объем гипсохранилища на весь срок эксплуатации составит около 90 млн. $м^3$. Расчетный срок эксплуатации – 15 лет. При средней площади гипсохранилища за период эксплуатации 3,5 $км^2$ средняя годовая интенсивность намыва составит 1,6 м. Емкость гипсохранилища организуется ограждающей первичной дамбой, отсыпаемой на высоту, обеспечивающую складирование гипса первые полтора года. Отметка гребня первичной дамбы – 263,0 м.

В таблице 9 наглядно представлены технологии снижения выбросов SO_2 на предприятии.

Таблица 9 – Технологии снижения выбросов SO_2

Название технологии	Цель	Описание
1	2	3
Участок по производству серной кислоты	Переработка SO_2 из отходящих газов в серную кислоту (H_2SO_4)	Многоступенчатая технология, включающая: охлаждение и мокрую очистку газа от пыли и примесей; осушку газа для предотвращения конденсации кислоты; конверсию диоксида серы в триоксид серы (SO_3) на катализаторе; абсорбцию триоксида серы серной кислотой с образованием моногидрата; разбавление моногидрата для получения серной кислоты требуемой концентрации. Серная кислота является готовым продуктом
Отделение мокрой очистки газа	Удаление пыли и сернистого ангидрида из отходящих металлургических газов	Очистка газов осуществляется последовательно в башне испарительного охлаждения (для улавливания пыли и образования тумана серной кислоты), башне охлаждения (для конденсации паров воды и укрупнения капель тумана) и в двух ступенях мокрых электрофильтров (для улавливания тумана серной кислоты). Образующуюся избыточную промывную серную кислоту очищают от диоксида серы и сульфидов металлов и используют для разбавления моногидрата и получения продукционной серной кислоты

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 9

1	2	3
Сушильно-абсорбционное отделение	Осушка сернистого газа и абсорбция триоксида серы для получения серной кислоты	Осушка газа ведется концентрированной серной кислотой (96% H_2SO_4) в сушильной башне. Абсорбция серного ангидрида осуществляется в промежуточном и конечном моногидратных абсорберах серной кислотой высокой концентрации (98,5% H_2SO_4). Полученная продукционная кислота (94% H_2SO_4) получается смешением отфильтрованной промывной кислоты с водой и избыточным моногидратом
Контактно-компрессорное отделение	Окисление SO_2 в триоксид серы (SO_3) на катализаторе	Сернистый газ транспортируется компрессорами. Окисление SO_2 в SO_3 происходит в четырехслойных контактных аппаратах с использованием ванадиевого катализатора, по схеме двойного контактирования. Степень конверсии достигает 99,94%. Для нагрева реакционной смеси используется тепло реакции окисления SO_2 в SO_3 в теплообменниках. Избыточное тепло используется в системе утилизации
Газоходная система	Транспортировка газов от плавильного цеха до цеха производства серной кислоты	Обеспечение доставки технологических газов от печей взвешенной плавки №1 и №2, а также от третьего плавильного комплекса до цеха производства серной кислоты
Участок нейтрализации серной кислоты	Нейтрализация избыточной серной кислоты (H_2SO_4) известняковым молоком	Нейтрализация избыточной технической серной кислоты известняковым молоком с получением двуводного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), который направляется в гипсохранилище, и диоксида углерода (CO_2), который выбрасывается в атмосферу

Таким образом, для уменьшения выбросов SO_2 в атмосферу в «НМЗ им. Б.И. Колесникова» необходимо реализовать схему утилизации сернистых газов, образующихся при пирометаллургическом производстве. Эта схема включает в себя производство технической серной кислоты, последующую нейтрализацию отходов этого производства известняковой пульпой для получения двуводного гипса. Полученный гипс складируется в специальном хранилище, куда он доставляется по трубопроводам в виде пульпы.

ВКР УлГТУ

2.4 Анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ предприятия после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы

В целях оценки эффективности внедренных технологии снижения выбросов SO_2 проведен анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ до и после внедрения. Рассматривались данные по 21 виду загрязняющих веществ, а также изменения общей массы выбросов и процентного вклада каждого вещества в общий объем выбросов. Выбросы веществ «НМЗ им. Б.И. Колесникова» после внедрения технологии снижения выбросов SO_2 представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Выбросы веществ ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» после внедрения технологии снижения выбросов оксида серы

Загрязняющее вещество	Выбросы веществ до внедрения технологии, тонн в год	Выбросы веществ после внедрения технологии, тонн в год
1	2	3
Железа оксид	6,178710	8,626101
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	0,008098	0,009511
Натрия карбонат	0,027418	0,027418
Никель оксид	250,560251	227,823585
Никель сульфат	0,008641	0,008641
Свинец и его соединения	6,028240	3,717923
Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	0,001568	0,001568
Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) (Кобальт окись; кобальт монооксид; кобальт(2+) оксид; кобальт (II) оксид)	10,213498	9,351110
Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота)	217,251405	246,395860
Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	4,287055	125,321469
Углерод (Пигмент черный)	0,123417	0,362550
Сера диоксид	1120262,620200	36080,607430
Дигидросульфид (Водород сернистый, дигидросульфид, гидросульфид)	38,726369	38,726369
Углерода оксид (Углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	2371,362941	1765,158398
Фториды газообразные	0,013554	0,015401
Фториды плохо растворимые	0,007077	0,012146

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 10

1	2	3
Метан	-	0,000550
Диметилбензол (смесь о-, м-, п-изомеров) (Метилтолуол)	10,444521	10,444521
Метилбензол (Фенилметан)	12,191622	12,191622
Бенз/а/пирен	0,002277	0,002311
Пыль неорганическая: 70-20% SiO_2	25,874162	25,925343
Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	4955,015676	4414,237210
Итого	1128170,94666	42968,967037

Сокращение общей массы выбрасываемых загрязняющих веществ в год составило: 1128170,94666 тонн – 42968,967037 тонн = 1085201,979623 тонн. В выбросах появилось новое вещество – метан (0,000550 тонн/г).

В таблице 11 представлена масса выбрасываемых веществ по классам опасности до и после внедрения технологии.

Таблица 11 – Масса выбрасываемых веществ по классам опасности до и после внедрения технологии

Класс опасности	Общая масса выбросов до внедрения (тонн)	Общая масса выбросов после внедрения (тонн)	Изменение
1 класс опасности	6,038084	3,727443	-2,310641
2 класс опасности	289,593318	331,146323	41,553005
3 класс опасности	1122515,714124	36398,479523	-1086117,2346
4 класс опасности	2371,362941	1765,158398	-606,204543

После внедрения технологии снижения выбросов SO_2 наблюдается существенное снижение общей массы выбросов для 1, 3 и 4 классов опасности. При этом по 2 классу опасности наоборот, наблюдается увеличение массы выбросов. Это говорит о том, что технология оказала разное влияние на выбросы различных веществ, и некоторые из них, относящиеся ко 2 классу опасности (серная кислота, железа оксид и фториды), стали выбрасываться в больших количествах.

Вклад каждого вещества в общую массу выбросов (топ-5) до и после внедрения технологии представлен в таблице 12.

Состав выбросов значительно изменился. До внедрения технологии SO_2 составлял подавляющую часть выбросов (99,30%), после внедрения его доля

ВКРУлГУ

значительно уменьшилась (84,00%). При этом возросла доля других веществ, особенно пыли неорганической (до 20% SiO_2) и оксида углерода.

Таблица 12 – Вклад каждого вещества в общую массу выбросов (топ-5) до и после внедрения технологии

Вещество	Процент от общей массы (%) до внедрения технологии	Процент от общей массы (%) после внедрения технологии
Сера диоксид	99,30	84,00
Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	0,43	10,27
Углерода оксид	0,21	4,11
Азота диоксид	0,019	0,57
Никель оксид	0,022	0,53

В целом, внедрение технологии снижения выбросов SO_2 привело к значительному сокращению общей массы выбрасываемых загрязняющих веществ и изменению их состава. При этом основным результатом стало резкое снижение выбросов SO_2. Однако, необходимо учитывать увеличение выбросов некоторых других веществ, особенно второго класса опасности, и отходов (в виде гипса) для комплексной оценки экологической эффективности предпринятых мер.

2.5 Расчет платы за выбросы в атмосферу

Плата за негативное воздействие на окружающую среду до использования технологии снижения выбросов SO_2 рассчитаны в соответствии Постановлением Правительства РФ от 13.09.2016 г. № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» (ред. от 24.01.2020) [12], Постановлением Правительства РФ от 01.03.2022 г. № 274 «О применении в 2022 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду» [13].

Плата за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу определяется по формуле:

$$П_{АС} = \sum М_{АСi} * С_{АСi}, \quad (1)$$

ВКР УлГУ

где C_{ACi} – ставка платы за 1 тонну загрязняющих веществ, руб/т;

M_{ACi} – фактический выброс i-го загрязняющего вещества, т/год.

Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу до использования технологии снижения выбросов SO_2 приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу до использования технологии снижения выбросов SO_2

Загрязняющее вещество	Выбросы веществ, тонн в год	Ставка платы за тонну веществ, руб.	Коэф-фициент	Плата в год, руб.
1	2	3	4	5
Железа оксид	6,178710	36,6	1,19	269,11
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	0,008098	5473,5	1,19	52,75
Натрия карбонат	0,027418	138,8	1,19	4,53
Никель оксид	250,560251	5473,5	1,19	1632015,43
Никель сульфат	0,008641	5473,5	1,19	56,28
Свинец и его соединения	6,028240	18244,1	1,19	130875,98
Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	0,001568	3647,2	1,19	6,81
Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) (Кобальт окись; кобальт монооксид; кобальт(2+) оксид; кобальт (II) оксид)	10,213498	4428,0	1,19	53818,19
Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота)	217,251405	138,8	1,19	35883,85
Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	4,287055	45,4	1,19	231,61
Углерод (Пигмент черный)	0,123417	36,6	1,19	5,38
Сера диоксид	1120262,620200	45,4	1,19	60523308,32
Дигидросульфид (Водород сернистый, дигидросульфид, гидросульфид)	38,726369	56,1	1,19	2585,34
Углерода оксид (Углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	2371,362941	1,6	1,19	4515,08
Фториды газообразные	0,013554	1094,7	1,19	17,66

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4	5
Фториды плохо растворимые	0,007077	181,6	1,19	1,53
Метан	-	108,0	1,19	0,00
Диметилбензол (смесь о-, м-, п-изомеров) (Метилтолуол)	10,444521	29,9	1,19	371,63
Метилбензол (Фенилметан)	12,191622	9,9	1,19	143,63
Бенз/а/пирен	0,002277	5472968,7	1,19	14829,42
Пыль неорганическая: 70-20% SiO_2	25,874162	56,1	1,19	1727,33
Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	4955,015676	36,6	1,19	215810,75
Итого	1128170,94666	x	x	62616530,61

До внедрения технологии, направленных на снижение выбросов SO_2, платежи «НМЗ им. Б.И. Колесникова» за загрязнение атмосферного воздуха достигали 62616530,61 руб. в год. При этом основной вклад в эту сумму (60523308,32 руб. в год) приходился именно на выбросы SO_2. Приведенные данные четко демонстрируют, что основной финансовой нагрузкой для «НМЗ им. Б.И. Колесникова» в части экологических платежей являлись выбросы SO_2.

В таблице 14 проведен расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу после использования технологии снижения выбросов SO_2 (Распоряжение Правительства РФ от 10.07.2025 г. № 1852-р «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2025 году» (ред. от 01.09.2025) [11].

Таблица 14 – Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу после использования технологии снижения выбросов SO_2

Загрязняющее вещество	Выбросы веществ, тонн в год	Ставка платы за тонну веществ, руб.	Коэф-фициент	Плата в год, руб.
1	2	3	4	5
Железа оксид	8,626101	209,59	1,19	215,15
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	0,009511	8264,99	1,19	93,54

ВКР УлГУ

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5
Натрия карбонат	0,027418	209,59	1,19	6,84
Никель оксид	227,823585	8264,99	1,19	2240721,99
Никель сульфат	0,008641	8264,99	1,19	84,99
Свинец и его соединения	3,717923	27548,59	1,19	121884,01
Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	0,001568	5507,27	1,19	10,28
Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) (Кобальт окись; кобальт монооксид; кобальт(2+) оксид; кобальт (II) оксид)	9,351110	6686,28	1,19	74403,73
Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота)	246,395860	141,19	1,19	41398,47
Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	125,321469	68,55	1,19	10223,04
Углерод (Пигмент черный)	0,362550	209,59	1,19	75,99
Сера диоксид	36080,607430	68,55	1,19	2943257,51
Дигидросульфид (Водород сернистый, дигидросульфид, гидросульфид)	38,726369	1036,16	1,19	47750,79
Углерода оксид (Углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	1765,158398	2,42	1,19	5083,30
Фториды газообразные	0,015401	1653,00	1,19	30,29
Фториды плохо растворимые	0,012146	274,22	1,19	3,96
Метан	0,000550	163,08	1,19	0,11
Диметилбензол (смесь о-, м-, п- изомеров) (Метилтолуол)	10,444521	45,15	1,19	561,17
Метилбензол (Фенилметан)	12,191622	14,95	1,19	216,90
Бенз/а/пирен	0,002311	8264182,74	1,19	22727,25
Пыль неорганическая: 70-20% SiO_2	25,925343	165,35	1,19	5101,24
Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	4414,237210	165,35	1,19	868574,01
Итого	42968,967037	x	x	6382424,56

ВКР УлГУ

Несмотря на повышение ставок, общая сумма платы за выбросы загрязняющих веществ «НМЗ им. Б.И. Колесникова» после использования технологии снижения выбросов SO_2 составила 6382424,56 руб. в год, в том числе плата за выбросы SO_2 снизилась до 2943257,51 руб. в год.

В таблице 15 отразим сравнение платы за выбросы загрязняющих веществ «НМЗ им. Б.И. Колесникова» до и после реализации технологии снижения выбросов SO_2.

Таблица 15 – Сравнение платы за выбросы загрязняющих веществ «НМЗ им. Б.И. Колесникова» до и после реализации технологии снижения выбросов SO_2

Загрязняющее вещество	Плата в год до реализации технологии, руб.	Плата в год после реализации технологии, руб.
Железа оксид	269,11	215,15
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	52,75	93,54
Натрия карбонат	4,53	6,84
Никель оксид	1632015,43	2240721,99
Никель сульфат	56,28	84,99
Свинец и его соединения	130875,98	121884,01
Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	6,81	10,28
Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) (Кобальт окись; кобальт монооксид; кобальт(2+) оксид; кобальт (II) оксид)	53818,19	74403,73
Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота)	35883,85	41398,47
Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	231,61	10223,04
Углерод (Пигмент черный)	5,38	75,99
Сера диоксид	60523308,32	2943257,51
Дигидросульфид (Водород сернистый, дигидросульфид, гидросульфид)	2585,34	47750,79
Углерода оксид (Углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	4515,08	5083,30
Фториды газообразные	17,66	30,29
Фториды плохо растворимые	1,53	3,96
Метан	0,00	0,11
Диметилбензол (смесь о-, м-, п- изомеров) (Метилтолуол)	371,63	561,17
Метилбензол (Фенилметан)	143,63	216,90
Бенз/а/пирен	14829,42	22727,25
Пыль неорганическая: 70-20% SiO_2	1727,33	5101,24
Пыль неорганическая: до 20% SiO_2	215810,75	868574,01
Итого	62616530,61	6382424,56

Тот факт, что общая сумма платы за загрязнение атмосферного воздуха после внедрения технологии снижения выбросов SO2 оказалась значительно ниже (несмотря на повышение ставок платы, установленных государством), однозначно свидетельствует об эффективности внедренных технологии.

Таким образом, существенное снижение, особенно платы за SO_2, указывает на то, что технологии позволили «НМЗ им. Б.И. Колесникова» не только существенно оптимизировать свои экологические платежи, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

ВКР УлГУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской работе была рассмотрена проблема загрязнения атмосферного воздуха выбросами оксидов серы, которая остается одной из наиболее острых экологических проблем современности, особенно в регионах с развитой металлургической промышленностью.

В ходе проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Нормативно-правовое регулирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (в т.ч. SO_2) в Российской Федерации представляет собой сложную систему, направленную на обеспечение благоприятной окружающей среды и здоровья населения. Анализ литературных источников по теме магистерской диссертации позволил выявить также высокую актуальность проблемы сокращения выбросов оксидов серы при работе металлургических предприятий и сжигании ископаемого топлива.

2. На основе проведенного анализа факторов негативного воздействия металлургических предприятий на окружающую среду и факторов, влияющих на объем выбросов SO_2, сделан вывод о необходимости комплексного подхода к решению экологических проблем в данной отрасли. Выбросы SO_2 на металлургических предприятиях связаны с широким спектром технологических процессов, начиная от обжига сульфидных руд и заканчивая сжиганием топлива. Наибольший вклад в общие выбросы SO_2 вносят процессы обжига и плавки сульфидных руд и концентратов, что обусловлено высоким содержанием серы в исходном сырье. Объемы и состав выбросов варьируются в зависимости от используемых технологий, состава сырья и эффективности применяемых систем газоочистки.

3. Важным этапом исследования является сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в данной области, включающий изучение лучших доступных технологий и практик, анализ экономических и экологических показателей внедрения различных технологий и оценку возможности адаптации зарубежного опыта к российским условиям.

ВКР УлГУ

Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта в области сокращения выбросов SO_2 на металлургических предприятиях демонстрирует, что существуют эффективные технологии и практики, позволяющие значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду. Зарубежный опыт предлагает передовые решения, такие как WSA, SNOX, которые позволяют достичь высокой степени утилизации SO_2 и снизить общие объемы выбросов. В то же время, отечественные предприятия активно модернизируют существующие технологии, такие как известняковые скрубберы и установки сернокислотного производства. Адаптация зарубежного опыта к российским условиям требует учета экономических, инфраструктурных и климатических особенностей, а также состава сырья.

4. Проектный раздел магистерской диссертации изложен по материалам ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова», который является крупным металлургическим предприятием, играющим ключевую роль в экономике Норильска и России. ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» входит в состав Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» – базового предприятия компании. Завод перерабатывает никель-пирротиновое сырье и другие металлосодержащие продукты, производя файнштейн, элементарную серу, технический кислород и азот. Основным направлением экологической стратегии ПАО «ГМК «Норильский никель» является масштабная Серная программа, реализуемая на Норильской и Кольской площадках.

5. ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» выбрасывает в атмосферу 21 различный вид загрязняющих веществ. Общая масса этих выбросов за год составила 1128170,94666 тонн. Доминирующее влияние на общий объем выбросов загрязняющих веществ оказывает SO_2, составляющий подавляющую часть – 99,30% от суммарной массы выбросов. Значительно меньший, но всё же существенный вклад вносят пыль неорганическая: до 20% SiO_2 (0,43%) и оксид углерода (0,21%). Доли остальных загрязняющих веществ, включая азота диоксид и никель оксид, малы по

ВКР УдГУ

сравнению с выбросами SO_2. Анализ структуры выбросов по классу опасности показал, что наибольшая доля выбросов приходится на вещества 3 класса опасности, составляя 1122978,887649 тонн в год. Это обусловлено значительным объемом выбросов SO_2, который относится к 3 классу опасности, а также большим объемом выбросов пыли неорганической. Суммарный вклад веществ 1 и 2 класса опасности в общую массу выбросов относительно невелик и составляет 6,039734 и 293,826953 тонн в год соответственно. Выбросы веществ 4 класса опасности составляют 2371,362941 тонн в год.

6. Для уменьшения выбросов SO_2 в атмосферу в ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» предлагается реализовать схему утилизации сернистых газов, образующихся при пирометаллургическом производстве. Эта схема включает в себя производство технической серной кислоты, последующую нейтрализацию отходов этого производства известняковой пульпой для получения двуводного гипса. Полученный гипс складируется в специальном хранилище, куда он доставляется по трубопроводам в виде пульпы. В целях оценки эффективности внедренных технологии снижения выбросов SO_2 проведен анализ состава и объема выбросов загрязняющих веществ до и после внедрения. Сокращение общей массы выбрасываемых загрязняющих веществ в год составило 1085201,979623 тонн, наблюдается существенное снижение общей массы выбросов для 1, 3 и 4 классов опасности. При этом по 2 классу опасности наоборот, наблюдается увеличение массы выбросов. Это говорит о том, что технология оказала разное влияние на выбросы различных веществ, и некоторые из них, относящиеся ко 2 классу опасности (серная кислота, железа оксид и фториды), стали выбрасываться в больших количествах. Состав выбросов также значительно изменился. До внедрения технологии SO_2 составлял подавляющую часть выбросов (99,30%), после внедрения его доля значительно уменьшилась (84,00%). При этом возросла доля других веществ, особенно пыли неорганической (до 20% SiO_2) и оксида углерода.

7. До внедрения технологии, направленных на снижение выбросов SO_2,

ВКР УдГУ

платежи ПАО «Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова» за загрязнение атмосферного воздуха достигали 62616530,61 руб. в год. При этом основной вклад в эту сумму (60523308,32 руб. в год) приходился именно на выбросы SO_2. Приведенные данные четко демонстрируют, что основной финансовой нагрузкой для предприятия в части экологических платежей являлись выбросы SO_2. После внедрения технологии, несмотря на повышение ставок, общая сумма платы за выбросы загрязняющих веществ составила 6382424,56 руб. в год, в том числе плата за выбросы SO_2 снизилась до 2943257,51 руб. в год. Тот факт, что общая сумма платы за загрязнение атмосферного воздуха после внедрения технологии снижения выбросов SO_2 оказалась значительно ниже (несмотря на повышение ставок платы, установленных государством), однозначно свидетельствует об эффективности внедренных технологии, что не только существенно помогут оптимизировать экологические платежи, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

ВКР УлГУ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Российская Федерация. Конституция Российской Федерации: офиц. текст: принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г.: по состоянию на 6 октября 2022 г. // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2022. – № 41. – Ст. 6930.

2 Российская Федерация. Законы. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ред. от 04.11.2025) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2002. – № 1 (часть I). – Ст. 1.

3 Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (ред. от 13.07.2024) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2014. – № 26 (часть I). – Ст. 3378.

4 Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения (ред. от 01.09.2025) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 1999. – № 14. – Ст. 1650.

5 Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ред. от 08.08.2024) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 1999. – № 18. – Ст. 2222.

6 Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 26.12.2024) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2002. – № 2. – Ст. 133.

7 Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (ред. от 01.09.2025) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 1998. – № 26. – Ст. 3009.

8 Российская Федерация. Президент. Указ Президента РФ от 19.04.2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2017. – № 17. – Ст. 2546.

ВКР УдГУ

9 Российская Федерация. Президент. Указ 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» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.garant.ru (дата обращения: 18.11.2025).

10 Российская Федерация. Правительство. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.10.2023 г. № 2909-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» (ред. от 05.06.2024) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2023. – № 44. – Ст. 7912.

11 Российская Федерация. Правительство. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10.07.2025 г. № 1852-р «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2025 году» (ред. от 01.09.2025) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2025. – № 28. – Ст. 4045.

12 Российская Федерация. Правительство. Постановление Правительства Российской Федерации от 13.09.2016 г. № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» (ред. от 24.01.2020) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2016. – № 38. – Ст. 5560.

13 Российская Федерация. Правительство. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.03.2022 г. № 274 «О применении в 2022 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду» // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2022. – № 10. – Ст. 1527.

14 Российская Федерация. Роспотребнадзор. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 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» (с изменениями и дополнениям) // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru (дата обращения: 18.11.2025).

15 Российская Федерация. Роспотребнадзор. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 3 «Об утверждении

ВКР УлГУ

санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» (с изменениями и дополнениями) // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru (дата обращения: 18.11.2025).

16 Российская Федерация. Правительство Красноярского края. Постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 г № 512-п «Об утверждении государственной программы Красноярского края «Охрана окружающей среды» (ред. от 14.10.2025) // Официальный портал Красноярского края [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.krskstate.ru (дата обращения: 18.11.2025).

17 Болтовская, А.С. Источники и причины загрязнения атмосферного воздуха / А.С. Болтовская, А.В. Соколовский, Д.В. Панасюк // Проблемы методологии и опыт практического применения синергетического подхода в научных исследованиях: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2022. – С. 8-12.

18 Вивчар, А.Н. Правовые проблемы инструментальных и расчетных методов определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу / А.Н. Вивчар, В.А. Сердюков, О.Ю. Сигитов // Энергия-2022. Теплоэнергетика: сборник статей 17 Всероссийской (9 международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново, 2022. – С. 6.

19 Габараев, К.О. Основные виды выбросов загрязняющих веществ в атмосферу / К.О. Габараев // Наука и образование: прошлое, настоящее и будущее: сборник статей III межвузовской студенческой конференции. – Воронеж, 2021. – С. 135-138.

ВКР УлГУ

20 Гурулев, Д.Н. Экологические проблемы современного металлургического производства: учеб. пособие / Д.Н. Гурулев, И.Л. Гоник, Л.В. Палаткина; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 138 с.

21 Еремин, О.Г. Исследование и разработка эффективной технологии получения элементарной серы из отходящих газов автогенных процессов плавки металлургического сырья: дис. … д. техн. наук: 05.16.02: защищена 07.04.2005. – Москва, 2005. – 126 с.

22 Изотова, Н.С. Разработка технологии утилизации серосодержащих газов металлургического производства с использованием железомарганцевых конкреций: дис. … канд. техн. наук: 05.16.02: защищена 28.09.2012. – Санкт-Петербург, 2012. – 126 с.

23 Карлович, И.А. К вопросу о номенклатуре техногенных загрязнений окружающей среды / И.А. Карлович, Н.В. Нестерова // Проблемы экологического образования в XXI веке: сборник трудов VII Международной научной конференции (очно-заочной). – Владимир, 2023. – С. 176-181.

24 Кондратьева, О.Е. Оценка перспектив снижения негативного воздействия на окружающую среду при переходе на наилучшие доступные технологии промышленных предприятий / О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, А.М. Боровкова, Н.В. Звонкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1 (65). – С. 188-197.

25 Кочнов, Ю.М. Анализ воздействия на окружающую среду выбросов многокомпонентных загрязняющих веществ / Ю.М. Кочнов / Охрана окружающей среды и заповедное дело. – 2020. – № 1. – С. 24-45.

26 Кузменко, М.О. Проблемы и перспективы обеспечения экологической безопасности / М.О. Кузменко, Д.Н. Самуйлов, И.Н. Кузменко, М.В. Тапорчикова // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: сборник материалов III Международной научной конференции. – Макеевка, 2025. – С. 232-234.

27 Ларионова, А.М. Экология: краткий курс лекций / А.М. Ларионова. – М.: МАДИ, 2020. – 104 с.

ВКР УлГУ

28 Ларионов, П.Д. Очистка отходящих газов от оксидов азота и серы / П.Д. Ларионов, А.В. Рязанцева, О.Ю. Усанова // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 81-1. – С. 44-48.

29 Мищенко, К.И. Изменения выбросов в атмосферу и регионального загрязнения воздуха кислотообразующими веществами на территории восточной Сибири и Дальнего Востока России / К.И. Мищенко, С.А. Громов, Е.С. Жигачева // Экология и природопользование: на пути к устойчивому развитию: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей. Ульяновск, 2025. – С. 111-115.

30 О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. – 424 с.

31 Платонов, О.И. Совершенствование технологии переработки отходящих газов печей Ванюкова: дис. … канд. техн. наук: 05.16.02: защищена 16.12.2004. – Санкт-Петербург, 2004. – 199 с.

32 Попов, Н.А. Источники загрязнения атмосферы / Н.А. Попов // Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте: сборник статей III международной студенческой конференции. Воронеж, 2021. – С. 185-188.

33 Солдатов, А.И. Источники загрязнения среды обитания: учеб. пособие / А.И. Солдатов, В.Н. Бекасова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2020. – 129 с.

34 Уткин, Т.С. Загрязнение воздуха в Красноярском крае: проблемы и перспективы решения / Т.С. Уткин, В.В. Ерофеева // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сборник статей XXV Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2023. – С. 385-389.

35 Федотова, Л.А. Об актуализации перечня загрязняющих атмосферный воздух веществ, в отношении которых применяются меры государственного

ВКР УлГУ

регулирования / Л.А. Федотова, Е.С. Манаева, Я.И. Лебедь-Шарлевич, И.А. Печникова // Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine. – 2023. – № 3. – С. 33-45.

36 Шкодинский, С.В. Опыт отдельных зарубежных стран в сфере снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух / С.В. Шкодинский, И.Н. Рыкова, А.А. Юрьева // Вестник Московского государственного областного университета. – 2021. – № 4. – С. 118-132.

37 Годовой отчет «Норникель» за 2022, 2023, 2024 годы // Норникель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nornickel.ru (дата обращения: 07.12.2025).

38 «Гипс – это значительно лучше, чем выбросы диоксида серы» // Глобус (геология и бизнес) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.vnedra.ru (дата обращения: 18.11.2025).

39 Металлургический завод «Надежда» – самое масштабное строительство XX века в Норильске // Норникель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nornickel.ru (дата обращения: 07.12.2025).

40 Национальные проекты России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai (дата обращения: 18.11.2025).

41 Надеждинский металлургический завод им. Б.И. Колесникова, ПАО «ГМК «Норильский никель» // Металлоснабжение и сбыт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.metalinfo.ru/ru/directory/111519 (дата обращения: 07.12.2025).

42 НМЗ г. Норильск: флагман российской цветной металлургии // НМЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nadezhdinskiyezavody.ru (дата обращения: 07.12.2025).

43 «Норникель» – лидер горно-металлургической промышленности в России и в мире // Норникель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nornickel.ru (дата обращения: 18.11.2025).

ВКР УлГУ

44 «Норникель» в 2025 году сократит выбросы диоксида серы в Норильске на 730 тыс. тонн // ТАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tass.ru/obschestvo/23724297 (дата обращения: 18.11.2025).

45 «Норникель» подводит первые результаты Серной программы // Норникель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nornickel.ru (дата обращения: 07.12.2025).

46 Очистка газов от серы, методы и оборудование для улавливания диоксида и оксидов S из воздуха и дымовых выбросов // «Приволжский завод газоочистного оборудования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gas-cleaning.ru/article/ochistka-gazov-ot-sery (дата обращения: 18.11.2025).

47 ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» // Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mc.ru/company (дата обращения: 18.11.2025).

48 Скрубберы: особенности конструкции и принцип работы // ООО «Сибэлкон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sibelkon.ru (дата обращения: 18.11.2025).

49 Современные технологии для снижения выбросов в производстве цветных металлов // РОССТИП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rosstip.ru (дата обращения: 18.11.2025).

50 Снижение выбросов SO_2 на металлургических производствах Норильска // Экология производства – научно-практический портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ecoindustry.ru (дата обращения: 18.11.2025).

51 Технологии мокрых скрубберов: регулирование pH для поглощения SO2 // «INNER»: Производство и поставка промышленных комплектующих [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://inner.su/articles/tekhnologii-mokrykh-skrubberov-regulirovanie-ph-dlya-pogloshcheniya-so2 (дата обращения: 18.11.2025).

ВКР УдГУ