

В печать
27.04.2021г.

На правах рукописи

Варакута Виктор Владимирович

**СНИЖЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ
РЕГИОНОВ**

05.23.19 «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2021

Работа выполнена на кафедре технической теплофизики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бирюков Алексей Борисович,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет» заведующий
кафедрой «Техническая теплофизика»

Официальные оппоненты: **Трубаев Павел Алексеевич** доктор
технических наук, доцент, профессор
кафедры энергетики теплотехнологии ФГБОУ
ВО «Белгородский государственный
технологический университет им.
В.Г. Шухова» (РФ).

Хазипова Вера Владимировна кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Естественнонаучных дисциплин»
факультета «Техносферной безопасности»
ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты»
МЧС ДНР.

Ведущая организация: ГОУ ВО «Донбасский государственный
технический институт» (ЛНР).

Защита состоится 29 июня 2021 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.023.03 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.023.03@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 ([http:// donnasa.ru](http://donnasa.ru)).

Автореферат разослан « ____ » 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 01.023.03

Башева Татьяна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С развитием технологий современное общество становится всё более и более энергозависимым. На сегодняшний день доминирующими в производстве электроэнергии являются тепловые электростанции, сжигающие органическое топливо. Исторически так сложилось, что на территории Донбасса часть инфраструктуры городского хозяйства – это добывающие и энергогенерирующие предприятия топливно-энергетического комплекса, многие шахты являются градообразующими. Эти предприятия – источник комплексного негативного воздействия на окружающую природу и городскую среду. Большинство экологически вредных факторов, возникающих при функционировании добывающих предприятий в течение периода подготовки и разработки месторождений, одновременно являются низкопотенциальными возобновляемыми источниками энергии и вторичными энергоресурсами. Одна из причин их негативного воздействия на атмосферу городов угледобывающих регионов – недостаточная утилизация, трансформация и возвращение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов, что приводит не только к экологическим, но также к значительным экономическим потерям. Факторами, приводящими к загрязнению атмосферы при угледобыче подземным способом, являются выбросы метана и водяных паров, а также вторичной и низкопотенциальной теплоты, не используемой в технологическом цикле и хозяйственной деятельности, назовём её ВНТ. Для комплексного учета всех экологически вредных факторов необходимо учитывать выбросы на тепловых электрических станциях, соответствующие выработке электроэнергии для обеспечения работы добывающих предприятий. При работе тепловых электрических станций загрязнение атмосферы происходит из-за выбросов углекислого газа, паров воды, окислов азота, летучей золы, а также выбросов ВНТ. Поэтому процессы утилизации, трансформации и возвращения в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов, неизбежно возникающих при функционировании угольных шахт, в виде электроэнергии, являются одним из путей снижения негативного воздействия на атмосферу, повышения энергоэффективности угледобычи и требуют серьёзной научной проработки.

Таким образом, тема диссертационной работы, посвященная уменьшению загрязнения атмосферы за счёт энергосбережения при работе угольных шахт путём использования вторичной и низкопотенциальной теплоты для генерации электрической энергии, является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Основные исследования теоретического и прикладного характера выполнены в соответствии с государственными научно-исследовательскими темами: К-3-05-11 «Повышение уровня безопасности в строительстве, жилищной и производственной сфере» и проектом федерального закона РФ о государственном регулировании выбросов и поглощений парниковых газов, Законом Донецкой Народной Республики «О государственном регулировании в области добычи и использования угля, об

особенностях социальной защиты работников организаций угольной промышленности»

Степень разработанности темы исследования. Вопросы минимизации негативного воздействия на атмосферу при работе различных, в том числе и угольных, предприятий представлены в работах С.П. Высоцкого, Е.С. Матлака, М.Д. Молева, К. Фольке, А.Сингх. Исследованию процессов энергосбережения и их влиянию на экологию посвящены работы таких учёных, как В.Г. Лисиенко, Я.М. Щёлоков. Вопросы использования угольной пыли и водоугольных смесей представлены в работах М.В. Губинского.

Однако до настоящего времени исследования снижения загрязнения атмосферы за счёт генерации электрической энергии с использованием ВНТ в качестве первичного источника и её влияние на повышение экологической безопасности атмосферы в условиях угольной шахты практически не проводились, что и обусловило необходимость проведения исследований в данном направлении.

Цель исследования – снижение теплового и химического загрязнения атмосферы угледобывающих регионов с использованием выбросов в качестве вторичных энергоресурсов для генерации электрической энергии.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ состояния проблемы повышения экологической безопасности атмосферы за счёт уменьшения загрязнения при работе угольных шахт на основе производственного опыта и информации в литературных источниках.

2. Разработать методику, позволяющую определять удельные приведенные значения вредных выбросов в атмосферу, отнесенные к 1 т добытого угля.

3. Определить запасы источников ВНТ шахты, образующихся как естественным путем, так и в процессе утилизации вредных выбросов, с учетом температурных потенциалов, возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов шахты, которые могут быть использованы для снижения загрязнения атмосферы.

4. Экспериментально исследовать величину техногенных тепловыделений, определяющих тепловое загрязнение атмосферы при работе электрических машин, обеспечивающих процесс угледобычи, в общем потоке ВНТ шахты.

5. Исследовать возможность освоения всего потока ВНТ, полученного от утилизации загрязняющих веществ и источников низкопотенциальной теплоты шахты посредством комплекса на базе паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и реализации других технических решений.

6. Определить величину снижения загрязнения атмосферы, укрупнённые экономические показатели и срок окупаемости оборудования при использовании выбросов для генерации электрической энергии и обеспечения децентрализованного энергоснабжения на примере конкретной шахты.

Объект исследования – тепловое и химическое загрязнение атмосферы угледобывающих регионов, обусловленное работой угледобывающих

предприятий, и выработкой электроэнергии для обеспечения их потребностей на тепловых электрических станциях.

Предмет исследования – закономерности снижения загрязнения атмосферы в результате использования ВНТ для генерации электрической энергии в условиях угольной шахты и обеспечения ее децентрализованного энергоснабжения.

Научная новизна полученных результатов:

– впервые разработан метод для определения приведённых удельных значений вредных выбросов, а также запасов вторичной и низкопотенциальной теплоты комплекса по подземной разработке угольного месторождения в зависимости от его характеристик;

– обосновано, что наиболее рациональными и равноценными с точки зрения энергетической эффективности способами снижения вредных выбросов в атмосферу горнодобывающим предприятием являются варианты использования отдельно паротурбинной установки и комплекса из паротурбинной установки и холодильной машины;

– доказано, что для максимально возможного снижения вредных выбросов горнодобывающего предприятия в атмосферу и освоения всего потока ВНТ, образующегося при подземной добыче угля от разных источников с различной температурой, необходимо создание комбинированного энергогенерирующего комплекса, в котором паротурбинная установка дополнена энергогенерирующей станцией, использующей ВНТ при температурах ниже температуры испарения рабочего тела паротурбинной установки;

– впервые установлено, что для всех вариантов реализации энергогенерирующих станций, использующих потенциальную энергию жидкой фазы рабочего тела в канале, расположенном по высоте ствола, с учетом условий угледобычи в Донбассе при использовании в качестве рабочего тела – фреона R407с КПД не превышает 4 %, а общий КПД комбинированного энергогенерирующего комплекса достигает 14 %.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в разработке методики, позволяющей определять запасы ВНТ, которые могут быть использованы для повышения экологической безопасности в результате уменьшения загрязнения атмосферы и принятия решения о потенциальной возможности ее использования для получения электроэнергии;

– в обосновании целесообразности использования горных пород геотермальной, нейтральной зоны для отвода теплоты от тепловой машины для снижения выбросов парниковых газов и теплового загрязнения атмосферы;

– в обосновании того, что наиболее рациональным, следовательно, наиболее эффективным в экологическом и экономическом плане является энергогенерирующий комплекс, первый контур которого, представляет традиционную паротурбинную установку на низкокипящем рабочем теле, а второй контур – гравитационную установку с изменяемыми параметрами рабочего тела;

– в обеспечении возможности сокращения вредных выбросов в атмосферу и улучшения экологической обстановки при угледобыче подземным способом в

результате утилизации образующейся ВНТ для производства электроэнергии и обеспечения децентрализованного энергоснабжения шахты.

Методология и методы исследования. Анализ процессов загрязнения атмосферы при угледобыче выполнен для нескольких типичных шахт Донбасса. Количество вредных выбросов (метан, водяные пары, низкопотенциальная теплота), образующихся при угледобыче, определяются с учетом известных из литературных источников характеристик процессов образования загрязняющих веществ при подземной добыче угля с глубиной разработки более 800 м. Определение количественных характеристик загрязнения атмосферы при генерации электрической энергии выполнено для условий Старобешевской тепловой электростанции. Количество потребляемого кислорода и выбросов вредных загрязняющих веществ, образующихся при выработке электроэнергии (в виде: углекислого газа, окислов азота, водяных паров, летучей золы) определяются по известным методикам расчёта процесса горения и потерь охлаждающей воды в испарительных градирнях. Для оценки энергетического потенциала возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов, сравнения энергетической эффективности комплексов на базе различных сочетаний паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и тепловых машин обратного цикла, оценки реальных энергетических характеристик гибридного ЭК используются базовые подходы соответствующих разделов технической термодинамики. Для оценки техногенной составляющей в общем потоке низкопотенциального теплового загрязнения в лабораторных условиях на сертифицированном оборудовании проведены экспериментальные исследования современных электрических машин, задействуемых в технологии подземной добычи угля. В основу разработки инновационных технических решений по эффективному использованию возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов с целью энергосбережения и уменьшения загрязнения атмосферы положен синтез известных представлений об использовании тепловых насосов, холодильных машин и паротурбинных установок на низкокипящем рабочем теле для утилизации ВНТ и предварительная инженерная проработка данного вопроса, позволяющая рационально решить поставленную задачу. Экономические показатели определяются на основе методик ценообразования и сметного нормирования в строительстве на основе сметно-нормативной базы РФ и разрабатываемого законопроекта РФ «О регулировании выбросов парниковых газов».

Положения, выносимые на защиту:

- новый метод определения величины вредных выбросов в атмосферу, образующихся при угледобыче и генерации электрической энергии на тепловых электростанциях, отнесенных к 1 т добытого угля, и оценки на их основе запасов источников ВНТ, которые могут быть использованы для децентрализованной генерации электрической энергии;
- обеспечение более эффективной утилизации вредных выбросов, загрязняющих атмосферу, за счет использования результатов исследования синтеза

различных сочетаний паротурбинных установок на низкокипящем рабочем теле и тепловых машин обратного цикла и их первичного термодинамического анализ, выполняемого сравнением соответствующих КПД идеального цикла Карно;

– обеспечение более полной утилизации всего потока ВНТ, образующегося в процессе угледобычи, за счет дополнения паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле энергогенерирующей станцией, способной утилизировать ВНТ при температурах более низких, чем температура испарения рабочего тела паротурбинной установки;

– альтернативные схемы генерации электрической энергии с использованием ВНТ и оценка их энергетической эффективности;

– оценка фактического снижения вредных выбросов в атмосферу при использовании для генерации электрической энергии предлагаемого энергогенерирующего комплекса в условиях конкретной шахты.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена корректным использованием положений технической термодинамики и теории горения, известных закономерностей о влиянии парниковых газов на разрушение озонового слоя, использованием сертифицированного оборудования и гостированных методик для проведения экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации представлены в докладах на научных семинарах кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «ДОННТУ», кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии ГОУ ВПО «ДОННУ», кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «ДОННАСА»; региональной научно-практической интернет-конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в оборудовании пищевой промышленности и теплохладотехнике» (ДОННУЭТ им. Туган-Барановского, Донецк, 2018); XII-ой Международной научной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (ДОННУ, Донецк, 2018); 14-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (ТГУ, Тула, 2018); III-ей Международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2018); XVII-ой Республиканской научно-технической конференции «Технологические машины и оборудование» (ДОННТУ, Донецк, 2018).

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя включает: постановку цели и задач исследования; обоснование методов выполнения теоретических и экспериментальных исследований; аналитические исследования зависимости КПД энергогенерирующего комплекса и соответственно, комплекса вредных выбросов от изменения внешних факторов; анализ вариантов схемы отбора теплоты от первичных источников с различными температурами; разработка схемы гибридного энергогенерирующего комплекса для условий

угольной шахты; исследование термодинамических циклов традиционной паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и гибридного энергогенерирующего комплекса в условиях угольной шахты; определение и сравнительный анализ энергетических характеристик и укрупнённых экономических показателей традиционной паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и гибридного ЭК в условиях конкретной угольной шахты; выбор методов и разработка способов снижения величины комплекса вредных выбросов в процессе угледобычи.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 2 рецензируемых научных изданиях; 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённый ВАК ДНР, одном патенте на полезную модель и двух патентах на изобретение.

Объём и структура диссертации. Работа состоит из введения, шести основных разделов, выводов, списка сокращений, списка используемых источников и приложений. Общий объём работы составляет 173 страницы, в том числе 149 страниц основного текста, 16 страниц списка использованных источников, состоящего из 133 наименований, 6 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной прикладной задачи, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, указаны положения, вынесенные на защиту.

В первом разделе выполнен анализ литературных источников и производственного опыта по проблемам экологической безопасности атмосферы предприятий топливно-энергетического комплекса в структуре города, использования возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов для энергосбережения. Исторически так сложилось, что на территории Донбасса часть инфраструктуры городского хозяйства – это добывающие и энергогенерирующие предприятия топливно-энергетического комплекса. Многие шахты являются градообразующими. Угольная промышленность загрязняет атмосферный воздух, водные объекты, нарушает земли (в особенности, почвенный слой), является источником образования огромного количества отходов, выбрасываемых в атмосферу. Одним из основных негативных результатов деятельности угольной отрасли является выброс метана – угольными шахтами и разрезами выбрасываются за год в атмосферу от 1,5 до 2 млрд. м³ метана. Постоянно растёт глубина угледобычи (на шахтах Донбасса она достигла 1,5 км) а, следовательно, энерговооружённость горно-шахтного оборудования и потребление электроэнергии. Для комплексной оценки загрязнения атмосферы угольными шахтами необходимо учитывать выбросы вредных веществ при производстве электроэнергии на тепловых электростанциях, необходимой для обеспечения процесса угледобычи. При этом основными энергосберегающими мероприятиями при добыче угля подземным способом являются: разработка и

внедрение более энергоэффективных технологий и оборудования, таких как повышение удельной энерговооружённости очистной и проходческой техники, внедрение универсальных автоматизированных и роботизированных комплексов и технологий добычи угля, оптимизация шахтных электрических сетей, компенсация реактивной мощности и повышение качества подаваемой электроэнергии, совершенствование внутришахтной транспортной логистики; совершенствование обогащения угля перед отгрузкой потребителю, то есть, снижение потерь угля с отходами и повышение производительности труда на новых автоматизированных обогатительных фабриках, использование в качестве топлива твердых горючих отходов угледобычи и углеобогащения в теплогенерирующих установках; повышение доли полезно используемого шахтного метана от суммарных выбросов в атмосферу, то есть, использование в качестве дутьевого, отработанного рудничного воздуха в теплогенерирующих установках, использование в качестве топлива дегазационного метана в когенерационных установках. Показано, что для повышения экологической безопасности в результате уменьшения загрязнения атмосферы, в принципе, могут быть использованы способы прямого преобразования теплоты, образующейся при утилизации вредных выбросов шахт, в электроэнергию на базе термоэлектрических и термоэмиссионных явлений, а также паротурбинных установок замкнутого цикла на низкокипящем рабочем теле, использующих низкопотенциальное тепло.

Проанализированы широко распространенные способы утилизации дегазационного метана на базе газокompрессорных и газотурбинных установок. Рассмотрены, технологии катализационного окисления вентиляционного метана для производства электрической и тепловой энергии. В качестве одного из наиболее перспективных направлений выделены энергосистемы «VOCSIDIZER», работающие с низкими концентрациями метана, от 0,1 %, без дополнительных затрат энергии. Эффективность такой энергосистемы (тепло и электричество) достигает 98 %.

Однако до настоящего времени исследования повышения экологической безопасности атмосферы в результате снижения вредных выбросов при их утилизации и трансформации в электроэнергию в условиях угольной шахты с использованием ВНТ в качестве первичного источника и влияние процесса утилизации и трансформации вредных выбросов на снижение номенклатуры и уровня экологически вредных факторов практически не проводились, что и обусловило постановку цели и задач данной диссертационной работы.

Во втором разделе разработана методика, позволяющая определить уровень потребления кислорода, природных и техногенных вредных выбросов в атмосферу (как на самой угольной шахте, так и на тепловой электростанции при производстве электроэнергии для обеспечения шахты), отнесенных к 1 т добытого угля. Методика реализует принципы построения материальных и тепловых балансов исследуемых процессов; при этом используются элементы теории горения топлива (для определения удельных выбросов при сжигании топлива на тепловой электростанции), укрупненные балансовые зависимости, характеризующие цикл

производства электроэнергии на электростанции; учитываются характеристики процесса угледобычи.

Для условий шахты ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько» и для особенностей производства электроэнергии на Старобешевской тепловой электростанции при сжигании антрацита с теплотой сгорания 22 МДж/кг, в соответствии с методиками, описанными во втором разделе, установлено, что суммарное количество потребляемого кислорода и вредных выбросов из различных источников (выбросы парниковых газов в CO_2 эквиваленте, оксидов азота, выход летучей золы, тепловое загрязнение), отнесенное к 1 т добытого угля составляет: $V_{\text{O}_2}=53,6 \text{ м}^3/\text{т}$; $V_{\text{CO}_2\text{эк}}=1125,7 \text{ кг}/\text{т}$; $\text{NO}_x=127,04 \cdot 10^3 \text{ мг}/\text{т}$; $A_3=9,13 \text{ кг}/\text{т}$; $Q_{\text{тз}\Sigma}=1263,9 \text{ МДж}/\text{т}$. При получении этих результатов выбросы метана и водяных паров при помощи специальных коэффициентов пересчета ($K_{\text{CH}_4}=21$, $K_{\text{H}_2\text{O}}=2,5$) учтены в выбросах в CO_2 эквиваленте.

Кроме того, при передаче электроэнергии от тепловой электростанции к шахте оказывается вредное влияние на прилегающие территории городского хозяйства электромагнитным полем, создаваемым элементами линий электропередач с напряжением 110 кВ.

Низкопотенциальное тепловое загрязнение носит как природный, так и техногенный характер. К природной составляющей следует относить теплоту, выделяемую горными породами и выносимую на поверхность шахтными водами и отработанным рудничным воздухом. Техногенная составляющая низкопотенциального теплового загрязнения угольной шахты – это в основном тепловые потери электрооборудования. При реализации опытно-конструкторских работ по разработке шахтного электропривода выполнены испытания электродвигателя ЭКВД 3,5-36 – привода подачи очистного комбайна и электродвигателя ВРВА 160М2-1У2.5 – привода вентилятора местного проветривания. Определён КПД названных машин. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлены зависимости КПД от полезной мощности на валу:

$$- \text{ЭКВД 3,5-36: } \eta=10^{-12} \cdot P_2^3 - 10^{-7} \cdot P_2^2 + 0,0031 \cdot P_2 - 61,014 \quad (1)$$

$$- \text{ВРВА 160М2-1У2.5: } \eta=2 \cdot 10^{-12} \cdot P_2^3 - 10^{-7} \cdot P_2^2 + 0,0026 \cdot P_2 - 73,55, \quad (2)$$

где η – КПД электродвигателя;

P_2 – полезная механическая мощность на валу электродвигателя, кВт.

Для осуществления технологического процесса угледобычи в шахте применяются различные типы электропривода, аппаратуры управления, трансформации и передачи электроэнергии. Тогда, с учетом удельного энергопотребления на добычу 1 т угля доля техногенной составляющей низкопотенциального теплового загрязнения составит:

$$W_{\text{тех.}} = 3,6 \cdot W_{\text{эл}} \cdot (1 - \eta_{\text{ср}}), \quad (3)$$

где $W_{\text{тех.}}$ – техногенная часть теплового загрязнения в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», МДж/т,

3,6 – коэффициент перевода кВт·ч в МДж;

$W_{эл1}$ – удельное энергопотребление на добычу 1 т угля в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», кВт·ч/т, $W_{эл1} = 95,8$ кВт·ч/т;

$\eta_{ср}$ – средний КПД всех электрических устройств (принят по результатам выполненных экспериментальных исследований), $\eta_{ср} = 0,9$.

$$W_{тех.} = 3,6 \cdot 95,8 \cdot (1 - 0,9) = 34,5 \text{ МДж/т.}$$

Таким образом, обосновано, что техногенная часть теплового загрязнения составляет не более 2 % от общего потока ВНТ и поэтому сделан вывод о нецелесообразности создания инфраструктуры для отдельного использования техногенной ВНТ.

Различная структура загрязняющих веществ, температура источников теплоты, их удалённость друг от друга как на поверхности, так и в горных выработках обуславливает достаточно сложную схему отбора ВНТ, что может привести к большим капитальным затратам. Для упрощения тепловой схемы, без значительных потерь общего экологического и энергетического эффекта, возможен вариант с переносом акцента на использование только основных источников ВНТ, таких как: вторичная теплота утилизации дегазационного метана (Q_1); вторичная теплота утилизации угольного шлама (Q_2); низкопотенциальная теплота шахтных вод (Q_3); низкопотенциальная теплота отработанного рудничного воздуха или вторичная низкопотенциальная теплота утилизации метана на установках «VOCSIDIZER», содержащегося в отработанном рудничном воздухе (Q_4).

Для оценки запасов видов ВНТ, выделенных для рассмотрения, разработана соответствующая методика, которая позволяет решать эту задачу для условий любой шахты, специализирующейся на подземной добыче угля, в зависимости от ее конкретных характеристик.

В третьем разделе исследованы пути технологической реализации повышения экологической безопасности атмосферы города в результате снижения загрязнения при работе угольных шахт. Большинство экологически вредных факторов являются возобновляемыми источниками энергии и вторичными энергоресурсами. Они могут быть утилизированы и трансформированы в ВНТ, а затем в электроэнергию посредством паротурбинной установки замкнутого цикла на низкокипящем рабочем теле, поэтому для максимально возможного снижения вредных выбросов в атмосферу необходимо исследовать процесс генерации электрической энергии при утилизации потока ВНТ на базе паротурбинной установки.

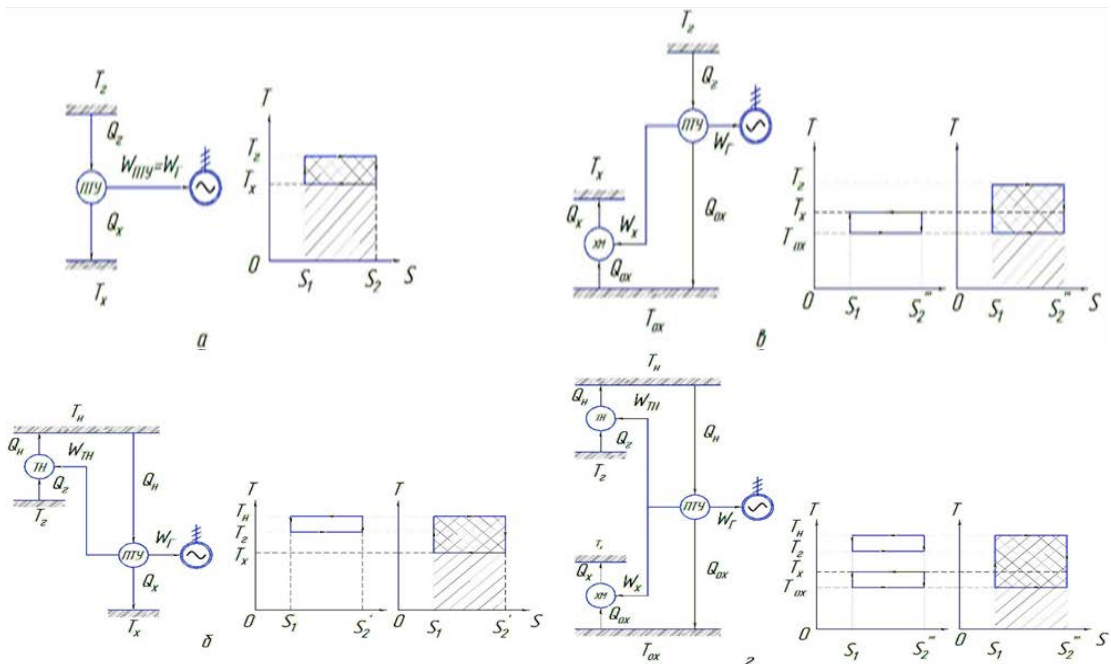
Для анализа приняты следующие условия. В связи с наиболее подходящими теплотехническими и технологическими характеристиками, экологической безопасностью и относительно низкой стоимостью в тепловой машине прямого цикла в качестве низкокипящего рабочего тела выбран фреон R407с. Источником теплоты с более высоким температурным уровнем – нагревателем является теплоноситель (вода), поступающий от источников ВНТ шахты с максимальной температурой плюс 110 °С. Максимальную температуру нагрева рабочего тела паротурбинной установки (T_T) принимаем плюс 100 °С. Источником тепла с более низким температурным уровнем – холодильником могут служить породы на

глубине от 30 до 100 метров со средней температурой плюс 12 °С и атмосферный воздух при его температуре ниже плюс 12 °С. Таким образом, годовой цикл работы энергогенерирующей станции делится на два периода, весенне-летне-осенний, когда холодильником являются горные породы с практически постоянной температурой плюс 12 °С и осенне-зимне-весенний период, когда отвод тепла от тепловой машины осуществляется в атмосферу. Поэтому минимальную температуру рабочего тела энергогенерирующей станции (T_x), принимаем на 10 °С выше температуры холодильника.

Поскольку, с одной стороны, температуру рабочего тела можно увеличить по сравнению с T_r за счет использования теплового насоса, а температуру конденсации можно уменьшить по сравнению с T_x отводом теплоты с помощью холодильной машины, а с другой стороны, для обеспечения работы машин обратного цикла требуются затраты энергии, то вопрос об эффективности и целесообразности использования машин обратного цикла в энергогенерирующем комплексе на базе паротурбинной установки не является однозначным и требует исследования.

Для этого синтезированы все возможные сочетания паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и тепловых машин обратного цикла и выполнено сравнение их эффективности на основании сопоставления КПД идеального цикла Карно.

Все возможные сочетания паротурбинной установки и машин обратного цикла приведены на рисунке 1.



а) паротурбинная установка без машин обратного цикла; б) паротурбинная установка и тепловой насос; в) паротурбинная установка и холодильная машина; г) паротурбинная установка совместно с тепловым насосом и холодильной машиной

Рисунок 1 – Термодинамические схемы ЭК с идеальным циклом Карно

На рисунке 1 для каждого из предложенных сочетаний также построен цикл в T-S координатах. Результаты упрощённого анализа итоговых выражений для определения КПД идеального цикла Карно показывают, что:

– для паротурбинной установки (рисунок 1 а)

$$\eta_{\text{ТМУ}} = \frac{W_{\text{ЭГ}}}{Q_{\Gamma}} = \frac{(T_{\Gamma} - T_{\text{X}}) \cdot (S_2 - S_1)}{T_{\Gamma} \cdot (S_2 - S_1)} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\Gamma}}; \quad (4)$$

– для паротурбинной установки и теплового насоса (рисунок 1 б)

$$\eta_{\text{ТМУ}} = \frac{W_{\text{ЭГ}}}{Q_{\text{Н}}} = \frac{(T_{\Gamma} - T_{\text{X}}) \cdot (S_2' - S_1)}{T_{\text{Н}} \cdot (S_2' - S_1)} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\text{Н}}}; \quad (5)$$

– для паротурбинной установки и холодильной машины (рисунок 1 в)

$$\eta_{\text{ТМУ}} = \frac{W_{\text{ЭГ}}}{Q_{\Gamma}} = \frac{(T_{\Gamma} - T_{\text{X}}) \cdot (S_2'' - S_1)}{T_{\Gamma} \cdot (S_2'' - S_1)} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\Gamma}}; \quad (6)$$

– для паротурбинной установки, теплового насоса и холодильной машины (рисунок 1 г)

$$\eta_{\text{ТМУ}} = \frac{W_{\text{ЭГ}}}{Q_{\text{Н}}} = \frac{(T_{\Gamma} - T_{\text{X}}) \cdot (S_2''' - S_1)}{T_{\text{Н}} \cdot (S_2''' - S_1)} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\text{Н}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{ЭГ}}$ – работа на входном валу электрогенератора, Дж; $W_{\text{ПТУ}}$ – работа на валу паротурбинной установки, Дж; Q_{Γ} – количество ВНТ, необходимое для получения $W_{\text{ЭГ}}$, Дж; $Q_{\text{Н}}$ – количество теплоты на выходе теплового насоса, Дж; T_{Γ} – температура испарения рабочего тела, К; T_{X} – температура конденсации рабочего тела, К; $T_{\text{Н}}$ – температура конденсации рабочего тела теплового насоса, К; $T_{0\text{X}}$ – температура испарения рабочего тела холодильной машины, К; S_1 – энтропия системы при адиабатном сжатии, Дж/К; S_2, S_2', S_2'', S_2''' – энтропия системы при адиабатном расширении, Дж/К; $\eta_{\text{ТМУ}}$ – КПД на входном валу электрогенератора.

Очевидно, что КПД идеального цикла Карно максимален и одинаков для термодинамических схем, приведенных на рисунке 1а и рисунке 1в. В связи с тем, что аппаратная часть схемы на базе одной лишь паротурбинной установки проще, она выбрана для дальнейшей разработки и определения реальных характеристик энергетической эффективности.

Удельные приведённые запасы ВНТ шахты, которые могут быть получены при утилизации загрязняющих веществ, приведены в таблице 1.

Для обеспечения испарения и перегрева низкокипящего рабочего тела для паротурбинной установки проанализирован вариант схемы нагрева низкокипящего рабочего тела с последовательным повышением температуры первичных источников. В режиме с наибольшим потреблением ВНТ (когда температура холодильника составляет плюс 12 °С, с перегревом пара в испарителе-пароперегревателе паротурбинной установки и подводом теплоты вблизи критической точки, без использования установки «VOCSIDIZER»), количество ВНТ, которое может быть использовано при данной схеме в условиях рассматриваемой шахты составит $Q_{\Sigma} = 192721$ кВт. Температура воздуха на выходе из ствола (T_1) плюс 26 °С и $Q_4 = 3000$ кВт (таблица 1), температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора плюс 22 °С.

Использовать низкопотенциальное тепло отработанного рудничного воздуха в условиях данной шахты, при данном уровне развития техники крайне сложно

из-за малого перепада температур (4 °С) и, как следствие, огромных габаритов (площадь поверхности теплообмена составит порядка $40 \cdot 10^3 \text{ м}^2$). Таким образом, для максимально возможного снижения вредных выбросов в атмосферу обоснована необходимость создания комбинированного энергогенерирующего комплекса, использующего основной поток ВНТ.

Таблица 1 – Результаты оценки запасов ВНТ для условий ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько»

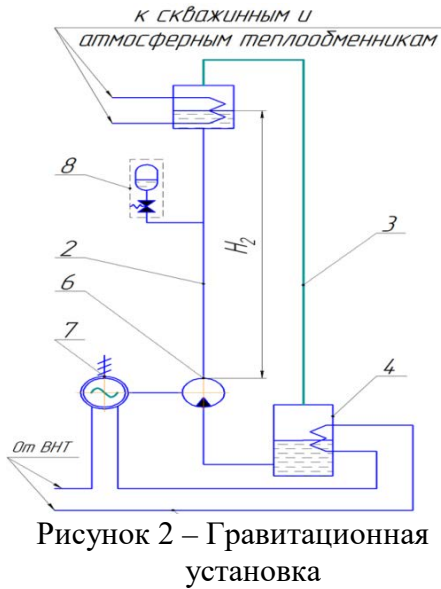
Наименование источника	Способ получения теплоты	Удельные запасы теплоты, МДж/т	Мощность теплового потока, МВт	Температура источника, °С
Дегазационный метан	Сжигание в газопоршневых установках типа JMS 620	$W_M = 0 \div 72,2 \text{ МДж/т}$	$Q_1 = 0 \div 4,7$	110
Угольный шлак и отходы углеобогащения	Сжигание в котлах с пылеугольными горелками и горелками на водоугольной эмульсии	$W_{II} = 90 \cdot 28 = 2520 \text{ МДж/т}$	$Q_2 = 162,8$	110
Шахтные воды	Природный геотермальный и техногенный характер	$W_{\text{вод}} = 304,7 \text{ МДж/т.}$	$Q_3 = 19,7$	49
Отработанный рудничный воздух	Природный геотермальный и техногенный характер (при применении установок «VOCSIDIZER»)	$W_{\text{рв}} = 47,2 \text{ МДж/т,}$ (При использовании установок «VOCSIDIZER») $W_{\text{рв}} = 519,4 \text{ МДж/т}$	$Q_4 = 3$ ($Q_4 = 33,7$)	26 (66)

В четвёртом разделе исследованы несколько возможных альтернативных, «экологически чистых» (не связанных со сжиганием углеродсодержащих компонентов) схем генерации электрической энергии. Возможным вариантом является термоэлектрический преобразователь, работающий совместно с холодильной машиной, например, типовой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной, используемой в шахтных системах кондиционирования. Ожидаемый КПД термоэлектрического преобразователя составляет более 20 % при минимальной материалоёмкости. Однако для разработки технологии изготовления и производства термодарной поверхности данного типа необходимо использование нанотехнологий, что в наших условиях, требует значительных материальных затрат.

Синтезированы все возможные варианты второго контура энергогенерирующего комплекса, позволяющие максимально освоить доступные

запасы ВНТ, в основе работы которых лежит использование потенциальной энергии высоты столба жидкой фазы рабочего тела в канале, расположенном по высоте ствола, а подъем рабочего тела наверх осуществляется за счет ВНТ, без использования электрической энергии.

Первый вариант – гравитационная установка (рисунок 2) – предполагает использование в качестве рабочего тела фреона R407с или H₂O. Энергогенерирующим элементом является гидротурбина 6 с электрогенератором 7. ВНТ подводится к испарителю 4 по линии 1. Рабочее тело транспортируется к конденсатору 5 на верхний горизонт по паропроводу 3 в виде пара. Подача жидкой фазы рабочего тела из конденсатора к гидротурбине происходит по гидравлической линии 2. Регулирующий элемент 8 меняет параметры рабочего тела в зависимости от температуры холодильника.



Для первичного анализа приняты температура холодильника – $T_x = +12\text{ }^\circ\text{C}$, температура ВНТ – T_n в зависимости от глубины, при геотермальной ступени $3\text{ }^\circ\text{C}$ на каждые 100 м и температуре геотермальной нейтральной зоны плюс $8\text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 30 м. Тогда,

$$\eta_{\text{ТМУ}} = \frac{N_{\text{ТМУ}}}{Q_{\text{ВНТ}}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{ТМУ}}$ – КПД на муфте электрогенератора;

$N_{\text{ТМУ}}$ – мощность на муфте электрогенератора, кВт;

$Q_{\text{ВНТ}}$ – удельное потребление ВНТ, кВт.

$$N_{\text{ПОТ}} = \frac{N_{\text{ТМУ}}}{\eta_{\text{ГТ}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{ПОТ}}$ – удельная мощность потока перед гидротурбиной, кВт;

$\eta_{\text{ГТ}}$ – КПД серийно выпускаемых турбин турбобуров, $\eta_{\text{ГТ}} = 0,5$.

$$G = \frac{N_{\text{ПОТ}} \cdot \rho}{9,81 \cdot H}, \quad (10)$$

где G – массовый расход рабочего тела, кг/с;

ρ – плотность рабочего тела, кг/м³;

H – расстояние, по вертикали, от зеркала рабочего тела в конденсаторе до входа в гидротурбину, м.

$$Q_{\text{ВНТ}} = c \cdot G \cdot [(T_n - 5^\circ\text{C}) - (T_x + 5^\circ\text{C})] + r \cdot G, \quad (11)$$

где c – удельная теплоёмкость жидкой фазы рабочего тела, Дж/кг·К;

r – удельная теплота парообразования рабочего тела, Дж/кг.

Расчёты выполнены для H₂O и R407с. Результаты расчёта, представленные в виде графика на рисунке 3, показывают, что КПД установки растёт с увеличением

глубины источников ВНТ, а соответственно повышением температуры вмещающих пород и увеличением гидростатической энергии жидкой фазы рабочего тела, зависящей от H . Для условий рассматриваемой шахты КПД такой установки не превышает 4 % (рабочее тело – R407с). Очевидно, что использование в качестве рабочего тела фреона R407с значительно повышает КПД установки при одинаковых условиях эксплуатации.

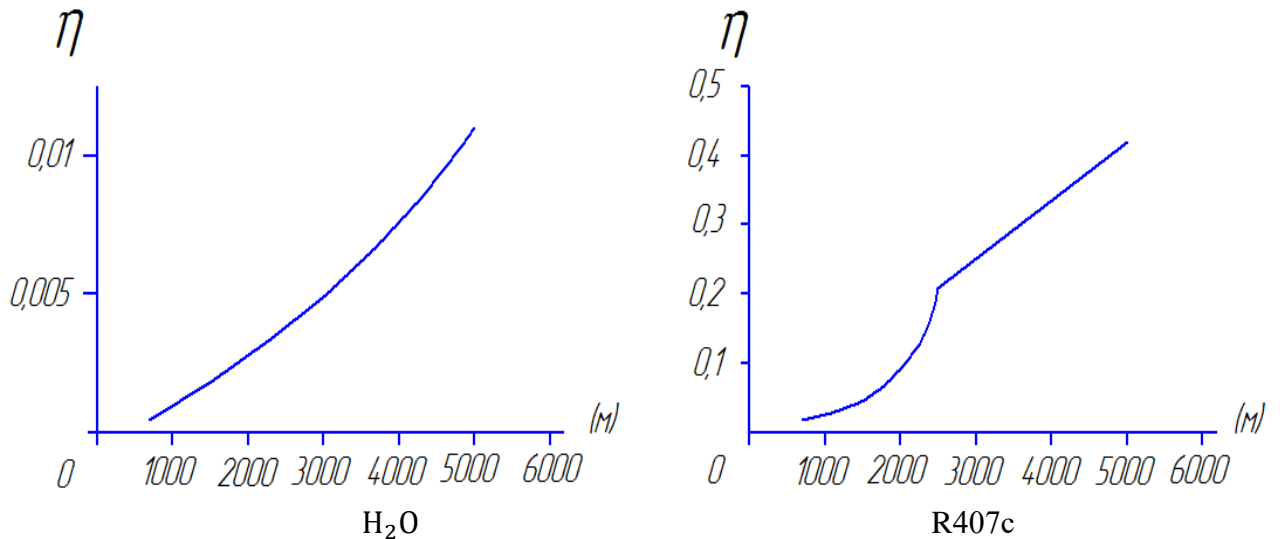


Рисунок 3 – КПД гравитационной установки в зависимости от глубины

Вторым возможным вариантом является схема генерации электрической энергии с использованием эрлифта. На рисунке 4 представлена схема эрлифтной установки, которая включает два контура: водяной контур (позиция 1), контур на низкокипящем рабочем теле (позиция 2) и термодинамический цикл контура низкокипящего рабочего тела.

Работа по подъёму воды в такой установке осуществляется, практически, без затрат ВНТ из-за разности плотности составляющих бинарного рабочего тела. Теплота затрачивается только на восполнение тепловых потерь и при наличии теплоизоляции не превышает 5 % потребляемого ВНТ, что позволяет максимально использовать регенерацию теплоты в термодинамической схеме тепловой машины за счёт гидростатического столба жидкой фазы бинарного рабочего тела, обусловленного глубиной шахтного ствола. В условиях данной шахты η установки не превышает 4 %.

Таким образом, поскольку оба предложенных варианта являются равноценными в плане экологии (используют «экологически чистое» не связанное со сжиганием углеродсодержащих компонентов низкопотенциальное тепло) и энергетической эффективности, для создания второго контура, комбинированного энергогенерирующего комплекса предложено использование первой схемы, как более простой, а следовательно, наиболее экономичной.

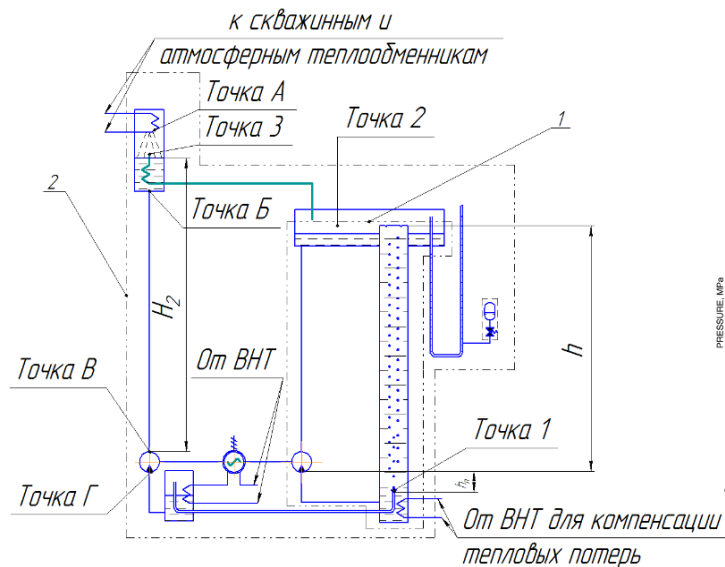
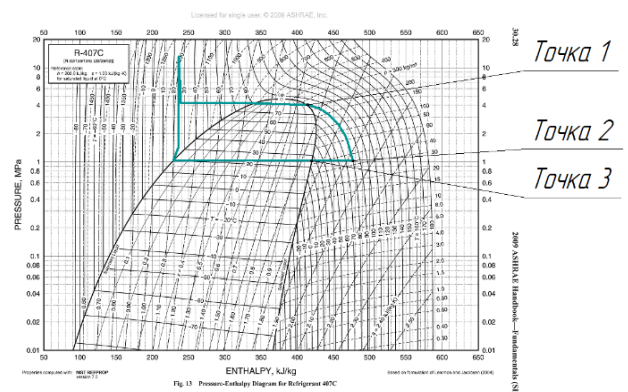


Рисунок 4 – Эрлифтная установка



В пятом разделе выполнен сравнительный анализ повышения экологической безопасности атмосферы из-за уменьшения вредных выбросов при использовании ВНТ в качестве первичного источника при генерации электрической энергии с помощью традиционной паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле и двухконтурного энергогенерирующего комплекса (рисунок 5).

Из-за малого теплоперепада на паровой турбине для расчёта приняты: паротурбинная установка с пароперегревателем, с одновенечной, с одной ступенью скорости, конденсационной, осевой турбиной, работающей на перегретом паре. В представленном двухконтурном энергогенерирующем комплексе подвод теплоты к каждому контуру осуществляется отдельно, массообмен между контурами отсутствует. К первому контуру, представляющему традиционную паротурбинную установку на низкокипящем рабочем теле, подводятся излишки тепла установок JMS 620 (Q_1 , в межтопительный период) и тепла утилизации угольного шлама и отходов углеобогащения (Q_2), теплота отработанного рудничного воздуха (Q_4 , после использования в установке «VOCSIDIZER»). Второй контур – гравитационная установка, к которой подводится тепло шахтных вод (Q_3), и тепло, отводимое от конденсатора первого контура.

При температуре атмосферного воздуха ниже плюс 12 °С гидротурбина является приводом электрогенератора второго контура. Для традиционной ПТУ располагаемое количество ВНТ – $Q_{\text{ВНТ}\Sigma} = 166500$ кВт, для первого контура энергогенерирующего комплекса – $Q_{\text{ВНТ}\Sigma} = 198850$ кВт. Количество ВНТ, подводимое к низкокипящему рабочему телу в испарителе-пароперегревателе:

$$Q_{\text{ВНТ и}} = 0,95 \cdot Q_{\text{ВНТ}\Sigma}, \quad (12)$$

где 0,95 – термический КПД испарителя-пароперегревателя.

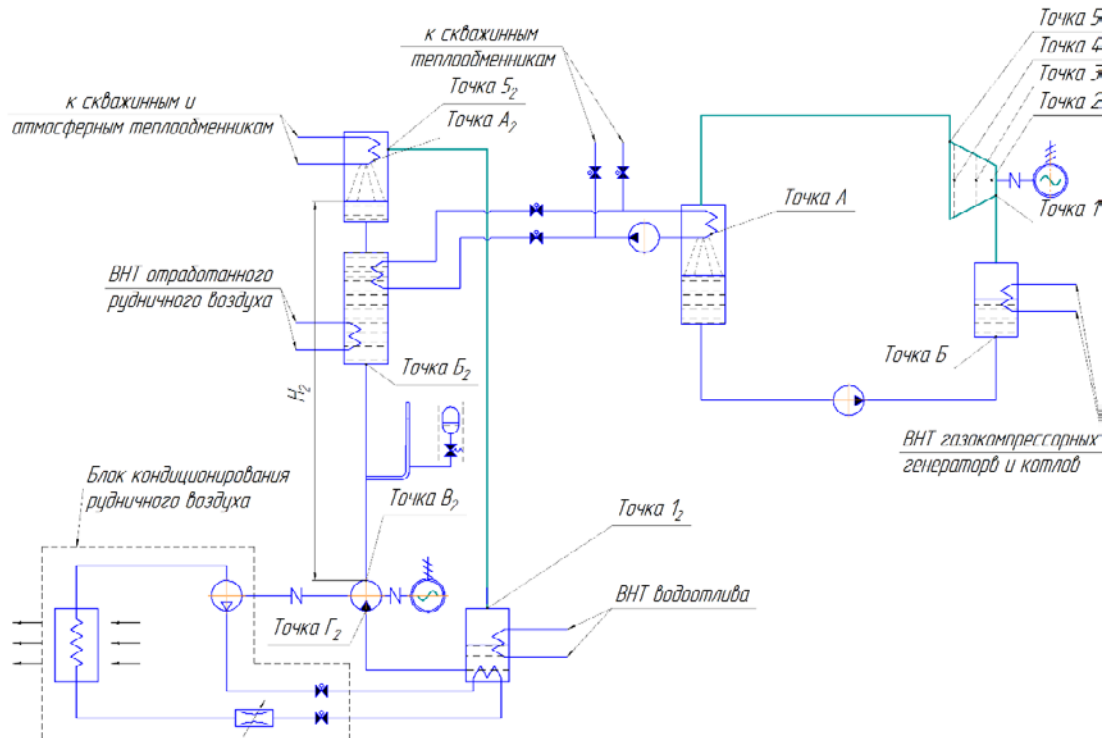


Рисунок 5 – Двухконтурный комбинированный энергогенерирующий комплекс

Тогда,

$$G = \frac{Q_{\text{ВНТ и}}}{i_1 - i_A}, \quad (13)$$

где G – расход пара низкокипящего рабочего тела в данном режиме, кг/с;
 i_1 – энтальпия рабочего тела на входе в турбину, кДж/кг, $i_1 = 452,4$ кДж/кг;
 i_A – энтальпия рабочего тела на выходе из конденсатора, кДж/кг,
 $i_A = 232,6$ кДж/кг.

$$G = \frac{188908}{452,4 - 232,6} = 867,3 \text{ кг/с}$$

$$N_{\text{ПТ}} = G \cdot H_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{ТМ}} \cdot \eta_{\text{э}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{ПТ}}$ – мощность генерации электрической энергии паровой турбиной, кВт;

$H_{\text{и}}$ – использованный теплоперепад, кДж/кг, $H_{\text{и}} = 867,3$ кДж/кг;

$\eta_{\text{ТМ}}$ – механический КПД паровой турбины, $\eta_{\text{ТМ}} = 0,98$;

$\eta_{\text{э}}$ – КПД электрогенератора, $\eta_{\text{э}} = 0,95$.

$$N_{\text{ПТ}} = 867,3 \cdot 25,3 \cdot 0,98 \cdot 0,95 = 20429 \text{ кВт}$$

Основные результаты сравнительного расчёта представлены в таблице 2.

Таким образом, использование двухконтурной установки данного типа позволяет полностью утилизировать весь поток ВНТ. Кроме того, более 40 % источников, утилизируемых вредных выбросов можно назвать «экологически чистыми», так как их трансформация в электроэнергию во втором контуре

энергогенерирующего комплекса в условиях угольной шахты, не связана с горением углеродсодержащих компонентов, выбросами метана, углекислого газа и потреблением кислорода и, как следствие, значительно снижаются удельные приведённые вредные выбросы, в результате повышается экологическая безопасность атмосферы.

Таблица 2 – Основные результаты сравнительного расчёта традиционной паротурбинной установки и двухконтурного энергогенерирующего комплекса

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			Трад. ПТУ	Гибридная ТМУ
1	H_2 – расстояние по вертикали от зеркала конденсата входа в гидротурбину	м	–	1278
2	Количество теплоты, подводимое к НРТ в испарителе пароперегревателе 2-го контура $Q_{и2} = G \cdot (i_5 - i_A) \cdot 0,95 + Q_3$	кВт	–	183186
3	Расхода пара в данном режиме во втором контуре $G_2 = \frac{Q_{и2}}{i_{12} - i_{A2}}$	кг/с	–	856
4	η_r – гидравлический КПД контура	–	–	0,65
5	Мощность генерации электрической энергии гидроагрегатом $N_{R407c} = \frac{G_2 \cdot g \cdot (H_2 - P_{12})}{1000} \cdot \eta_r \cdot \eta_э$	кВт	–	8905
6	Суммарная мощность генерации электрической энергии $N_\Sigma = N_{ПТ} + N_{R407c}$	кВт	14014	29334
7	Суммарный КПД установки $\eta_\Sigma = \frac{N_\Sigma}{Q_{ВНТ\Sigma}}$	–	0,085	0,14

В шестом разделе выполнена комплексная оценка снижения величины вредных выбросов при использовании двухконтурного энергогенерирующего комплекса, утилизирующего весь поток ВНТ, образующийся в процессе угледобычи.

Минимальный КПД двухконтурного энергогенерирующего комплекса, составляет 10,7 % при постоянных параметрах низкокипящего рабочего тела. При минимальном КПД:

$$W_{\Sigma\text{ген}} = (W_M + W_{\text{вод}} + W_{\text{орв}}) \cdot \text{Пр}_r \cdot \eta, \quad (15)$$

где $W_{\Sigma\text{ген}}$ – электроэнергия, полученная в результате утилизации «экологически чистой» составляющей ВНТ, кВт·ч/год;

Пр_r – годовая производительность шахты, т/год, $\text{Пр}_r = 2,031 \cdot 10^6$ т/год.

$$W_{\Sigma\text{ген}} = (20,2 \cdot 0,5 + 84,7 + 145,4) \cdot 2,031 \cdot 10^6 \cdot 0,107 = 52,2 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$$

$$B = W_{\Sigma\text{ген}} \cdot B_{\text{уд}}, \quad (16)$$

где B – количество реального топлива, необходимое для выработки данного количества электроэнергии на тепловой электростанции, т,

$B_{уд}$ – удельное количество реального топлива, необходимое для выработки 1 кВт·ч электроэнергии на тепловой электростанции, т/кВт·ч,
 $B_{уд}=0,47 \cdot 10^{-3}$ т/кВт·ч;

$$B=52,2 \cdot 10^6 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}=24,5 \cdot 10^3 \text{ т.}$$

КПД второго контура зависит от температуры атмосферного воздуха, поэтому в условиях рассматриваемой шахты второй контур используется для генерации электрической энергии при падении температуры ниже плюс 12 °С.

Изменения мощности генерации электрической энергии второго контура от температуры атмосферного воздуха в период изменения температуры от плюс 12 °С до минус 2 °С не превышает 1 %. Для расчёта среднемесячных значений мощности в зависимости от температуры атмосферного воздуха была использована выборка температур в Донецке с октября 2015 г. по сентябрь 2016 г. из архива погоды гидрометеорологического центра ДНР. Время между измерениями температуры атмосферного воздуха – 3 ч.

Максимум КПД второго контура достигается при падении температуры атмосферного воздуха ниже минус 2 °С. При дальнейшем понижении температуры КПД остаётся постоянным и имеет максимальное значение, в результате чего достигается максимальная величина утилизации вредных выбросов и низкопотенциального теплового загрязнения.

Количественные показатели вредных выбросов до и после внедрения двухконтурного энергогенерирующего комплекса в условиях шахты ГП «Шахта им. А.Ф.Засядько» приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Объемы вредных выбросов до и после внедрения двухконтурного энергогенерирующего комплекса

Вид ЗВ	Было	Стало	Изменилось
Парниковые газы			
CH ₄ - CO ₂ -ЭК, (кг/т доб. уг.)	717,1	25,13	Снизилась на 96,5 %
H ₂ O - CO ₂ -ЭК, (кг/т доб. уг.)	313,33	210,1	Снизилась на 32,9 %
CO ₂ - (кг/т доб. уг.)	95,3	150,7	Возросли на 58,1 %
Суммарные выбросы парниковых газов (кг/т доб. уг.)	1125,7	360,8	Снизилась на 67,5 %
Оксиды азота			
NO _x - (мг/т доб. уг.)	127,04 · 10 ³	90,2 · 10 ³	Снизилась на 29 %
Летучая зола			
Летучая зола – (кг/т доб. уг.)	6,93	6,07	Снизилась на 12,4 %

С учётом стоимости избыточных квот на выброс углекислого газа был проведен укрупнённый сравнительный анализ экономических показателей угледобычи на базе имеющегося оборудования при наличии установок

«VOCSIDIZER» и двухконтурного энергогенерирующего комплекса, утилизирующего поток ВНТ, образующийся в процессе угледобычи (таблица 4).

Таким образом, использование предлагаемого энергогенерирующего комплекса в условиях рассматриваемой шахты позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ в виде: парниковых газов в CO_2 -эквиваленте на 67,5 %; оксидов азота на 29 %; выбросов летучей золы на 12,4 %. При снижении вредных выбросов в результате их утилизации в более экологически безопасных установках выработки электроэнергии КПД децентрализованной системы электроснабжения шахты составит 17 % в весенне-осенний период и 22 % в осенне-весенний период. Это делает конкурентоспособной децентрализованную систему электроснабжения шахты по сравнению с тепловой электростанцией.

Таблица 4 – Сравнительный экономический анализ эффективности предложенных решений по снижению загрязнения атмосферы и обеспечению децентрализованного энергоснабжения шахты

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			Имеющееся оборуд.	При наличии двухконтурн. ЭК
1	Среднесуточный тариф на электроэнергию	рос. руб. за кВт·ч	2,2	2,2
2	Стоимость электроэнергии за годовой цикл $C_3^{\text{год}} = k_{\text{и}} \cdot N_{\Sigma} \cdot 2,2 \cdot 24 \cdot 365$	рос. руб.	$3,5 \cdot 10^8$ (потребляемой)	$6,8 \cdot 10^8$ (вырабатываемой)
3	Предполагаемая стоимость избыточной квоты $C_{\text{КВ}}$, CO_2 -эквивалент	рос. руб/т	–	511,5
4	Снижение выбросов ПГ за годовой цикл в CO_2 -эквиваленте: $\text{CO}_2^{\text{год}}\text{-эквивалент} = \text{CO}_2\text{-эквивалент} \cdot 10^{-3}$	т	–	$1,6 \cdot 10^6$
5	Средства от реализации избыточных квот за годовой цикл $C_{\text{КВ}}^{\text{год}} = C_{\text{КВ}} \cdot \text{CO}_2^{\text{год}}\text{-эквивалент}$	рос. руб.	0	$54,5 \cdot 10^6$
6	Суммарный экономический эффект за годовой цикл после 2025 года $C_{\Sigma\text{эф}} = C_{\text{КВ}}^{\text{год}} + C_3^{\text{год}}$	рос. руб.	0	$14,7 \cdot 10^8$
7	Срок окупаемости установки $T = \frac{C_{\Sigma}}{C_{\Sigma\text{эф}}}$	год	–	5,3

При производстве электроэнергии на тепловой электростанции и её транспорте на шахту КПД традиционной системы электроснабжения не превышает 27,5 % от величины тепловой энергии, полученной в результате сжигания топлива, приобретаемого по закупочным ценам.

Определим также укрупнённо величину предотвращённого экологического ущерба за годовой цикл эксплуатации децентрализованной системы электроснабжения в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько»:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{уд}} \cdot [(M1_{\text{ПГ}} - M2_{\text{ПГ}}) \cdot k_{\text{эПГ}} + (M1_{\text{NO}_x} - M2_{\text{NO}_x}) \cdot k_{\text{эNO}_x} + (M1_{\text{П}} - M2_{\text{П}}) \cdot k_{\text{эП}}] \cdot j, \quad (17)$$

где $U_{\text{пр}}$ – величина предотвращённого экологического ущерба, рос. руб.

$U_{\text{уд}}$ – величина экономической оценки удельного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, рос. руб/т, $U_{\text{уд}} = 47$ рос. руб/т;

$(M1_{\text{ПГ}} - M2_{\text{ПГ}})$ – сокращение выбросов парниковых газов за годовой цикл эксплуатации децентрализованной системы электроснабжения в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», т, $(M1_{\text{ПГ}} - M2_{\text{ПГ}})=150623,8$ т;

$k_{\text{эПГ}}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России для парниковых газов, $k_{\text{эПГ}}=0,4$;

$(M1_{\text{NO}_x} - M2_{\text{NO}_x})$ – сокращение выбросов оксидов азота за годовой цикл эксплуатации децентрализованной системы электроснабжения в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», т, $(M1_{\text{NO}_x} - M2_{\text{NO}_x})=75$ т;

$k_{\text{эNO}_x}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России для оксидов азота, $k_{\text{эNO}_x}=16,5$;

$(M1_{\text{П}} - M2_{\text{П}})$ – сокращение выбросов летучей золы за годовой цикл эксплуатации децентрализованной системы электроснабжения в условиях ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», т, $(M1_{\text{П}} - M2_{\text{П}})=1746,6$ т;

$k_{\text{эП}}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России для не дифференцированной по составу пыли, $k_{\text{эП}}=0,7$;

j – индекс-дефлятор, устанавливаемый Минэкономки России для топливно-энергетического комплекса за 2019 г., $j=1,03$.

$$U_{\text{пр}}=47 \cdot (150623,8 \cdot 0,4 + 75 \cdot 16,5 + 1746,6 \cdot 0,7) \cdot 1,03 \approx 3,04 \text{ млн. рос. руб.}$$

Кроме того, при децентрализации электроснабжения шахты и использовании линий электропередач 110 кВ только в качестве резерва, достигается снижение вредного влияния электрического поля за счет восемнадцатикратного снижения напряженности электрического поля.

ВЫВОДЫ

В работе решена научно-прикладная задача снижения загрязнения атмосферы угледобывающих регионов в результате использования выбросов горных предприятий в качестве вторичных энергоресурсов для генерации электрической энергии.

1. Теоретически и экспериментально установлено снижение загрязнения атмосферы городов угледобывающих регионов с использованием выбросов в качестве вторичных энергоресурсов для генерации электрической энергии.

2. Разработана методика для оценки удельных значений приведенных вредных выбросов шахты, в которые включены вредные выбросы тепловой электростанции, образующиеся при выработке электроэнергии, потребляемой шахтой. В качестве примера с использованием данной методики для условий ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», выбросы составляют: парниковых газов в CO_2 -эквиваленте $=1125,7$ кг/т, оксидов азота $\text{NO}_x=127,04 \cdot 10^3$ мг/т, выбросы летучей золы $A_3=6,93$ кг/т, тепловое загрязнение окружающей среды $Q_{\text{тз}}=1263,9$ МДж/т.

3. В результате экспериментального исследования электрических машин ЭКВД 3,5-36 и ВРВА 160М2-1У2.5 установлены зависимости величины техногенного тепловыделения в зависимости от режимов эксплуатации. С учетом этих данных и характеристик другого шахтного оборудования, обосновано, что техногенная часть теплового загрязнения в условиях рассматриваемой шахты составляет $W_{\text{тех}}=34,5$ МДж/т и не превышает 2 % от общего количества запасов ВНТ шахты.

4. Установлено, что для максимально возможного снижения вредных выбросов горнодобывающего предприятия в атмосферу в результате освоения всего потока ВНТ наиболее эффективной и экономичной является схема двухконтурного энергогенерирующего комплекса с отдельным подводом теплоты к каждому контуру от различных источников. Расчетным способом установлено, что использование гибридного двухконтурного энергогенерирующего комплекса позволяет полностью использовать весь поток ВНТ горнодобывающего предприятия; максимальный КПД такой установки достигается при снижении температуры атмосферного воздуха ниже минус 2 °С и составляет 14 %, мощность электрогенерации для условий ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько» при этом достигнет 29,3 МВт, что больше, чем на треть превышает потребности в электроэнергии данной шахты, переводя её в категорию просьюмера, а излишки полученных энергоносителей (тепловая и электрическая энергия) поставляются для нужд городского хозяйства.

5. При условии утилизации всего метана и использовании двухконтурного энергогенерирующего комплекса вредные выбросы за годовой цикл работы для условий ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько» в абсолютных единицах снизятся на: $1,5 \cdot 10^6$ т для парниковых газов в CO_2 -эквиваленте или 67,5 %; 75 т для оксидов азота или 29 %; и выбросов летучей золы на $1,7 \cdot 10^3$ т или 12,4 %. При этом потребление кислорода сократится на $36,4 \cdot 10^6$ м³ или 33 %.

6. Показано, что дополнительным положительным эффектом от создания шахтного энергогенерирующего комплекса является децентрализация электроснабжения, что уменьшает вредное влияние электрического поля линий электропередач за счет восемнадцатикратного снижения его напряженности, достигаемого разгрузкой внешней линий электропередач при переводе её в резервный режим и переходе внутришахтных сетей, обеспечивающих работу шахты, на напряжение 6 кВ, вместо 110 кВ при транспорте электроэнергии от тепловой электростанции.

7. В результате оценки экономических характеристик реализации предложенной технологии установлено, что эколого-экономический эффект от предотвращенных выбросов в атмосферу для условий ГП «Шахта им. А.Ф. Засядько», с учетом снижения выработки электроэнергии на Старобешевской тепловой электростанции составляет 3,05 млн. руб. в год. При тарифе 2,2 рубля за кВт·ч. срок окупаемости двухконтурного энергогенерирующего комплекса составит 5,3 года.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- публикации в рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК ДНР и ВАК РФ:

1. Бирюков, А.Б. Использование вторичных энергоресурсов для снижения вредных выбросов в условиях угольных шахт [Текст] / А.Б. Бирюков, **В. В. Варакута**, П. А. Гнитиёв // Вестник академии гражданской защиты. – Донецк, 2019. – № 3 (19). – С. 108-116. (*Теоретически и экспериментально установлено снижение загрязнения атмосферы городов угледобывающих регионов с использованием выбросов в качестве вторичных энергоресурсов для генерации электрической энергии*)

2. Бирюков, А.Б. Комплексный анализ вредных выбросов при угледобыче [Текст] / А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, **В.В. Варакута** // Вести Автомобильно-дорожного института. – Горловка, 2019. – № 2. – С. 52-60. (*Разработана методика для оценки удельных значений приведённых вредных выбросов шахты, в которые включены вредные выбросы тепловой электростанции, образующиеся при выработке электроэнергии, потребляемой шахтой*)

- патенты:

3. Пат. 42849 Украина, МПК⁷ F 24 D 11/00 F 24 D 3/00. Одноконтурна опалювальна система малої та середньої потужності [Текст] / **Варакута В.В.**, Пархоменко Д.И., Мазурина И.А. ; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «ДОННТУ». - № 200901291 ; заявл. 16.02.09; опубл. 27.07.09, Бюл. № 14. – 4 с.

4. Пат. 162553 Российская Федерация, МПК⁷ H01L 35/30 (2006.01). Термоэлектрический преобразователь [Текст] / **В.В. Варакута**, Пархоменко Д.И., Гридин С.В., Масюк Л.Н., Дудченко А.Ю., Максименко Д.И. ; заявитель и патентообладатель Варакута В.В., Пархоменко Д.И., Гридин С.В., Масюк Л.Н., Дудченко А.Ю., Максименко Д.И. – № 2015152939/28 ; заявл. 09.12.2015; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17. – 7 с.

5. Пат. 2681565 Российская Федерация, МПК⁷ C1 F03B 13/00 (2018.08). Система энергоснабжения [Текст] / **Варакута В.В.**, Пархоменко Д.И., Гридин С.В., Масюк Л.Н., Максименко Д.И., Безбородов Д.Л., Зубков С.С., Дудченко А.Ю. ; заявитель и патентообладатель В.В. Варакута, Пархоменко Д.И., Гридин С.В., Зубков С.С. – № 2018111779 ; заявл. 17.07.2017; опубл. 11.03.2019. Бюл. №8. – 9 с.

- публикации в других изданиях:

6. Варакута, В.В. Термоэлектрический преобразователь [Текст] / **В.В. Варакута**, С.В. Гридин, Д.И. Пархоменко, Л.Н. Масюк, Д.И. Максименко // Взрывозащищённое электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк, 2017. – №1. – С. 73–85. (*Приведена одна из альтернативных схем генерации электрической энергии*)

7. Бирюков, А.Б. Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа [Текст] / А.Б. Бирюков, **В.В. Варакута**, П.А. Гнитиёв // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново, 2018. – № 2. – С. 12-20. (*Установлено, что наиболее рациональными с точки зрения энергетической эффективности способами снижения вредных выбросов в атмосферу горнодобывающим*

предприятием являются варианты использования отдельно паротурбинной установки и комплекса из паротурбинной установки и холодильной машины)

8. Бирюков, А.Б. Оценка показателей работы энергогенерирующей станции на НРТ как потребителя ВНТ в условиях угольной шахты [Текст] / А.Б. Бирюков, **В.В. Варакута**, П.А. Гнитиёв, А.С. Приходько // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново, 2018. – № 4. – С. 12–19. *(Обосновано, что для максимально возможного снижения вредных выбросов горнодобывающего предприятия в атмосферу и освоения всего потока ВНТ, образующегося при подземной добыче угля от разных источников с различной температурой, необходимо создание комбинированного энергогенерирующего комплекса)*

9. Бирюков, А.Б. Пути использования низкопотенциальных возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов угольных шахт [Текст] / А.Б. Бирюков, Д.И. Пархоменко, В.В. Варакута, П.А. Гнитиёв // Вестник МЭИ. – М., 2018. – № 5. – С. 24-33. *(Определены запасы источников ВНТ шахты, образующихся как естественным путем, так и в процессе утилизации вредных выбросов, с учетом температурных потенциалов, возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов шахты)*

10. Бирюков, А.Б. Двухконтурная энергогенерирующая станция с изменяемыми параметрами рабочего тела второго контура [Текст] / А.Б. Бирюков, **В.В. Варакута**, П.А. Гнитиёв // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. – Донецк, 2018. – № 4. – С. 66–78. *(Обосновано, что наиболее эффективным в экологическом и экономическом плане является энергогенерирующий комплекс, первый контур которого, представляет традиционную паротурбинную установку на низкокипящем рабочем теле, а второй контур – гравитационную установку с изменяемыми параметрами рабочего тела)*

АННОТАЦИЯ

Варакута Виктор Владимирович. Снижение загрязнения атмосферы угледобывающих регионов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2021 г.

Диссертация посвящена снижению загрязнения атмосферы угледобывающих регионов.

В работе проанализированы факторы негативного воздействия на атмосферу, при угледобыче и электрогенерации. Теоретически и экспериментально установлен уровень загрязнения атмосферы при работе одной из типичных шахт Донбасса. Разработана методика, позволяющая определить приведённые удельные значения вредных выбросов угольной шахты.

Научно обоснована и разработана экологически безопасная технологическая схема утилизации вредных выбросов, образующихся при подземной добыче угля.

Разработана схема, экологически безопасного двухконтурного энергогенерирующего комплекса потребляющего в качестве первичного источника загрязняющие вещества и низкопотенциальное тепловое загрязнение. Данный комплекс позволяет значительно снизить загрязнение атмосферы угледобывающих регионов парниковыми газами, оксидами азота, летучей золой, а также уменьшить потребление кислорода в процессе угледобычи. Аналитически определён эколого-экономический эффект от предотвращенных выбросов в атмосферу для условий одной из типичных шахт Донбасса.

Результаты диссертационного исследования приняты предприятием ЧПП «Горняк-95» и внедрены в учебный и научный процесс ДОННТУ.

Ключевые слова: атмосфера, экологическая безопасность, загрязняющие вещества, тепловое загрязнение, угледобывающие регионы, парниковые газы, энергогенерирующий комплекс, эколого-экономический эффект.

ANNOTATION

Varakuta Viktor. **Reducing air pollution in coal mining regions.** – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.19 - Ecological safety of construction and municipal facilities. - State educational institution of higher professional education «Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture». - Makeevka, 2021

The dissertation is devoted to the reduction of air pollution in coal-mining regions.

The work analyzes the factors negatively affecting the atmosphere during coal mining and power generation. The level of atmospheric pollution during the operation of one of the typical mines of Donbass has been theoretically and experimentally established. A technique has been developed that allows one to determine the reduced specific values of harmful emissions from a coal mine.

Scientifically substantiated and developed an environmentally friendly technological scheme for the disposal of harmful emissions generated during underground coal mining. A scheme has been developed for an environmentally safe two-circuit power generating complex that consumes pollutants and low-potential thermal pollution as a primary source. This reduces air pollution by greenhouse gases, nitrogen oxides, and fly ash. The ecological and economic effect of avoided emissions into the atmosphere for the conditions of one of the typical mines of Donbass is analytically determined.

The results of the dissertation research were accepted by the private enterprise «Gornyak-95» and introduced into the educational and scientific process of DONNTU.

Keywords: atmosphere, environmental safety, pollutants, thermal pollution, coal mining regions, greenhouse gases, power generating complex, environmental and economic effect.