

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

---

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»**

Горн Евгений Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ С КОГЕНЕРАЦИОННЫМИ  
ТЕХНОЛОГИЯМИ**

25.00.21 – «Теоретические основы проектирования горнотехнических  
систем»

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехнологии освоения  
недр» ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС»

Агафонов Валерий Владимирович

Москва, 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Функционирование угольной отрасли на современном этапе недропользования неразрывно и достаточно в сильной степени связано с проблемой диверсификации производственно-хозяйственной деятельности угледобывающих предприятий. Данный аспект обуславливает необходимость поиска нетрадиционных путей повышения их технико-экономической эффективности на базе технологий углубленной переработки угля, улавливания, каптирования и утилизации шахтного метана и отходов углеобогащения непосредственно в местах их добычи.

И здесь, с учетом вышеизложенного, главенствующее положение занимают технологии получения сжиженного метана для перевода карьерного автотранспорта на газомоторное топливо и высокоэффективные когенерационные теплоэнергетические технологии. Их использование в качестве конечной цели предполагает изменение структуры цен на конечный реализуемый продукт, где эксплуатационные издержки производства (себестоимость добычи угля) уже не рассматривается в качестве решающего фактора, а заявляется как одна из составляющих.

Следует отметить, что реализация данного направления осуществима в, первую очередь, на предприятиях, которые имеют на георесурсном балансе значительные промышленные запасы угля и шахтного газа метана, то есть классифицируются как газугольные. Актуальность такого заявленного подхода обуславливается значительным потреблением дизельного топлива и электро – и теплоэнергии самими угледобывающими предприятиями, которые постоянно вынуждены адаптироваться к их непрерывному росту и лимитированию потребления в условиях монополизации, что в конечном итоге негативно влияет на уровень операционной рентабельности предприятий.

**Степень разработанности.** Следует отметить определенный объем исследований в области внедрения когенерационных и тригенерационных технологий в различные сферы экономики страны (нефтяная и газовая отрасли, сельское хозяйство, автотранспортный сектор, энергетика и т.д.). Эти исследования связаны с такими учеными, как Бирюков А. Б., Лебедев А. Н., Онищенко С. А., Мехтиев А. Д., Армашова-Тельник Г.С., Бойко Е.А., Полей А. К., Борисов К. И., Тимошенко Д.В., Щеклеин С. Е., Буланин В.А.,

Сухих А. А., Сафин Р.Г., Дикарев П.В., Камлюк В. В., Березинец П. А., Гуляева А.В., Малая Э.М., Жарков В. Я., Войтенко И.А. и др.

Появление когенерационных технологий в горном производстве связано с *проблемой энергосбережения, которая неразрывно увязана с вопросами обеспечения приемлемого уровня рентабельности и промышленно-экологической безопасности.* В угольной отрасли РФ и ближнего зарубежья имеется ряд реализованных проектов с когенерационными технологиями, но как правило, они немногочисленны и не обладают соответствующим научно-методическим обеспечением. В области теоретических разработок можно отметить работы Агафонова В.В., Куркутова С.А., Кирсанова А.В., Коровицына А.П., Руденко Н.С., Шевцова А.Г. и др.

**Целью работы** заявляется повышение технико-экономической эффективности угледобывающего производства на базе высокоэффективных технологий сжижения метана, перевода карьерного автотранспорта на газомоторное топливо и использования когенерационных теплоэнергетических технологий.

**Идея работы** заключается в использовании стирлинг-технологий и мобильных газопоршневых ТЭЦ в функциональной структуре углегазоэлектрического комплекса, реализующего когенерационные технологии и технологии сжижения метана.

Поставленная цель предполагает решение **следующих задач исследований:**

- анализ функциональных вариантов отечественных и зарубежных когенерационных технологий, адаптированных для их использования в условиях угольной отрасли и выделение их рациональных областей применения;
- изучение процесса и принципиальной технологической схемы когенерации тепловой и электрической энергии с привлечением первоисточника энергии – шахтного газа метана;
- разработка научно-методических и системотехнических принципов проектирования горных производств с когенерационными технологиями и технологиями ожижения метана для заправки автомобильного транспорта ;
- разработка и системное представление на базе использования теории термодинамического равновесия, математического и численного

моделирования, когенерации и тригенерации георесурсов концептуальных основ методологии проектирования горных производств с использованием когенерационных технологий;

- сравнительный анализ возможностей, преимуществ и характеристик разных типов технических средств для разработки рекомендаций по выбору оптимальной энергоустановки на базе методов многокритериальной оптимизации ;

- анализ экономических перспектив реализации когенерационных технологий;

- верификация, валидация и апробация проведенных исследований с использованием вычислительных экспериментов для выявления сложившихся закономерностей в условиях Апсатского каменноугольного месторождения.

**Объектом исследования** являются технологии сжижения метана, когенерационные технологии и закономерности преобразования углеродной массы в тепловую и электрическую энергию.

**Предмет исследования** – математическое и численное моделирование процессов стирлинг -и когенерационных технологий в условиях угольного производства.

**Методы исследований.** В работе заявлен и принят к использованию комплекс научных методов, включающий объектно-ориентированный анализ исследований теоретического и прикладного плана в области проектирования горных производств с привлечением когенерационных технологий и технологий ожижения метана, методы, использующие системы поддержки принятия проектных решений, методы математического и численного, экономико-математического и имитационного моделирования, процедур многокритериальной оптимизации и ряд других для реализации вспомогательных аспектов поставленной задачи.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1.В современных макроэкономических условиях недропользования и проектирования технологических систем угледобывающих предприятий для формирования должного уровня технико-экономической эффективности и конкурентоспособности актуализируется научно-производственная задача инициирования интенсивного внедрения в процесс угледобычи стирлинг – и

когенерационных технологий, что связано со значительными экономическими и экологическими преимуществами.

2. Концептуальные положения повышения технико-экономической эффективности угледобывающих предприятий базируются на разработанных научно-методических положениях и принципах проектирования технологических систем с использованием технологий ожижения шахтного газа метана для заправки автомобильного транспорта и использованием его в качестве первичного источника энергии в мобильных газопоршневых когенерационных ТЭЦ для выработки электрической и тепловой энергии.

3. Научно-методические положения и принципы проектирования базовых и вспомогательных элементов функциональной структуры когенерационных технологических систем диктуют использование комбинированного подхода, основанного на использовании методов многокритериальной оптимизации, системы поддержки проектных решений на основе экономико-математического моделирования и экспертных методов теории принятия сложных решений, которые формируют должный уровень синергического эффекта.

**Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается** проведенным анализом репрезентативного объема информации статистического плана о тенденциях и закономерностях создания и развития стирлинг – и когенерационных технологий в РФ и за рубежом, теоретических и практических исследованиях в области создания методологии проектирования технологических систем когенерационных технологий, наличием, корректной адаптацией и реализацией современных методов исследований (методы многокритериальной оптимизации, системной и комплексной поддержки принятия оптимизационных решений на основе экономико-математического и имитационного моделирования, теории квалиметрии и принятия сложных решений в соответствующей постановке и пр.), проведенной верификацией и валидацией результатов исследований применительно к условиям Апсатского каменноугольного месторождения.

**Новизна полученных результатов заключается в следующем:**

- актуализирована необходимость разработки и адаптации к горному производству концептуальных основ методологии проектирования угольных

производств с использованием когенерационных технологий, что является следствием эволюционных преобразований угольной отрасли;

- разработаны научно-методические и системотехнические принципы проектирования горных производств с использованием когенерационных технологий;
- разработана и обоснована система технологических преобразований угольной продукции в тепловую и электрическую энергию на базе когенерационных технологий;
- разработаны концептуальные основы угольно-энергетического комплекса, адаптированного к горно-геологическим и горнотехническим условиям Апсатского каменноугольного месторождения.

**Научное значение работы** состоит в разработке концептуальных методологических и методических, организационно-управленческих основ проектирования горных производств с использованием когенерационных технологий.

**Практическое значение работы** определяется в конечном итоге разработанными практическими рекомендациями в области реализации научно-методического обеспечения при проведении процедуры формирования и оптимизации элементов функциональной структуры угледобывающих производств с когенерационными технологиями, оптимизации их основных параметров и оценке технико-экономической эффективности принятых проектных решений.

**Реализация выводов и рекомендаций.** Представленная разработанная автором методика синтеза элементов функциональной структуры угледобывающих производств с когенерационными технологиями и оптимизации их параметров с оценкой технико-экономической эффективности качества проектных решений рекомендованы к использованию проектными отделами и управлениями угольных компаний в процессе проектирования высокорентабельных угледобывающих производств. Отдельные теоретические аспекты работы рекомендуются к использованию в рамках учебного процесса в высших учебных заведениях горного профиля при подготовке соответствующих специалистов.

**Апробация результатов работы.** Содержание основных научных положений, методических и методологических основ работы с результатами

проведенных исследований в рамках представленной диссертации неоднократно докладывались на соответствующих секциях ежегодно проводимого в НИТУ МИСиС международного научного симпозиума «Неделя горняка» (г. Москва, 2017, 2018, 2019 гг), были представлены на VIII Международной научно-технической конференции "Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий" (Санкт-Петербург, 2017г.). По мере написания диссертации основополагающие составляющие теоретических и практических исследований представлялись в форме научных докладов на семинарах кафедры «Геотехнологии освоения недр» Горного института НИТУ МИСиС (Москва, 2017-2018 гг.).

**Публикации.** Степень опубликованности теоретических и практических результатов работы подтверждается 16 научными публикациями: 15 - в изданиях соответствующего шифра специальности 25.00.21, которые входят в список, рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ и 1 - систему цитирования SCOPUS.

**Структура работы.** Структура диссертации представлена введением, четырьмя главами, заключением, списком использованной литературы из 123 наименований, 57 таблицами и 74 рисунками.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** освещена актуальность тематики исследования, раскрыта научная новизна, сформулированы научные положения, определена теоретическая и практическая значимость работы на основе высокой степени проработанности вопроса.

**Первая глава** посвящена анализу тенденций и закономерностей использования стирлинг – и когенерационных технологий в мире, трендам и перспективам развития, анализу теоретических и практических исследований в заявленной области проведения исследований, основополагающих принципов проектирования и внедрения альтернативных вариантов когенерационных технологий генерации энергоносителей в горном деле и угольной отрасли, сформулированы идея, цель и задачи исследования.

Во **второй главе** разработана концепция построения системы проектирования технологических схем по сжижению метана и переводу карьерного автотранспорта на газодизельный режим работы. Произведена

оценка перспектив и возможные направления развития проектных проработок по переводу автотранспорта АО «СУЭК» на сжиженный природный газ (СПГ) с обоснованием технологии сжижения метана и выбору рациональной функциональной структуры завода по производству СПГ. С использованием экономико-математического моделирования проведена оценка возможных вариантов перевода всей крупно - и малотоннажной техники на газодизельный режим работы.

**В третьей главе** разработана процедура многокритериальной оптимизации, выбора и обоснования технических средств когенерационных технологий утилизации шахтного метана. Проведен анализ технических средств улавливания и утилизации метана, используемых в функциональной структуре АО «СУЭК-Кузбасс», рассмотрены и проанализированы различные типы силовых когенерационных энергоустановок, проведен сравнительный анализ характеристик разных типов технических средств для реализации когенерационных технологий, разработан практический механизм интегральной оценки газопоршневых установок и рекомендации по выбору оптимальной и наиболее подходящей энергоустановки когенерационной технологии для реальных условий эксплуатации.

**В четвертой главе** приведено описание объекта моделирования, разработка и обоснование проектных решений когенерационных технологий утилизации запасов метана Апсатского каменноугольного месторождения с установлением рациональных параметров, проведена оценка экономической эффективности и конкурентных преимуществ когенерационной технологии при освоении Апсатского газопоршневого месторождения.

В большинстве случаев разработки угольных месторождений сопутствующим георесурсом выступает газ - метан ( $\text{CH}_4$ ), причем объемы его выделения в мировом масштабе оцениваются в 20-21 млрд.  $\text{м}^3/\text{год}$ . Значимость его учета при реализации производственных процессов угледобычи обусловлена двумя аспектами, которые нельзя не учитывать и игнорировать:

- первый аспект связан с промышленной безопасностью ведения подземных горных работ, так как этот газ при образовании взрывоопасных концентраций от 5 до 14 % метановоздушной смеси приводит к техногенным катастрофам с большими людскими и экономическими

потерями ;

- второй аспект связан с экологической составляющей, так как этот газ занимает второе место в формировании парникового эффекта и разрушении озонового слоя на планете, причем его агрессивность в 20 и более раз выше, нежели первой составляющей - диоксида углерода).

Следует отметить, что несмотря на тот факт, что Российская Федерация занимает второе место в мире по запасам угля и связанного в нем метана, степень его извлечения и утилизации далека от требуемого уровня и существенно отстает от ведущих мировых угледобывающих стран (Китай, США, ЮАР, Индонезия, Австралия и др.). Это подтверждается тем фактом, что в России фактически утилизируется всего лишь чуть более 4% всего метана, который выделяется в процессе ведения подземных горных работ. Только ряд отдельных шахт имеют в своей функциональной структуре системы извлечения метана и технические устройства для его утилизации (как правило добытый метан используется в качестве топливной составляющей для котелен). Отчасти такая закономерность объясняется тем, что технологии промышленной добычи угольного метана имеют весьма существенные отличия от технологий промышленной добычи природного газа.

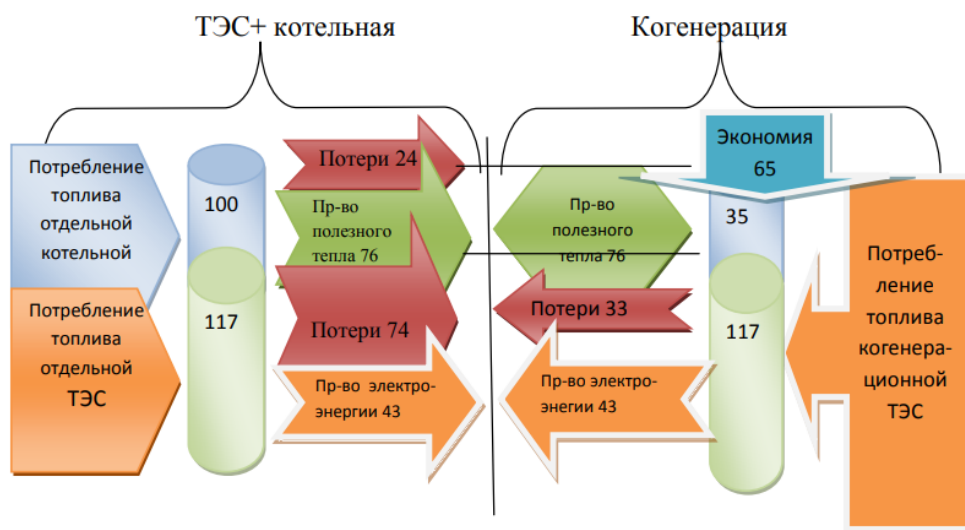
В связи с этим, вновь разрабатываемые технологии извлечения угольного метана должны быть увязаны с максимально возможным, экономически оправданным его извлечением из недр и технологиями его практического использования, при учете формирования тенденций резкого снижения его эмиссии в соответствующие слои атмосферы, и должны основываться на концепции единой технологической платформы.

Реализация данной концепции в объемах угольной отрасли требует решения целого ряда задач научного, методического, методологического, организационно-управленческого характера.

Исследования показали, что утилизация добытого метана может осуществляться в нескольких направлениях когенерации. В Донбассе, Кузбассе и ряде стран Европы вначале обозначили приоритет его использования для заправки парка автомобильного транспорта. Затем перешли на использование когенерационных двигателей с классом производительности между 2 и 3 МВт, которые производили

электроэнергию, а образующееся тепло из охлаждающей воды и газообразных отходов использовали для коммунально-бытовых нужд.

Внедрение когенерационных технологий в горное производство несет ощутимые экономические и экологические преимущества (рис.1).



**Рис.1 – Сопоставление основных составляющих эффективности когенерационных технологий и традиционных технологий горного производства**

Приведенный рисунок показывает, что в обоих случаях производится одинаковый объем электрической и тепловой энергии. Но если принимать к рассмотрению отдельное производство, то потери в условном сопоставлении могут достигать 98 единиц против 33 единиц при использовании когенерационных технологий. При отдельном производстве эффективность использования первичного источника топлива (КПД) достигает 55% против 78% при когенерации. Это говорит о том, что когенерационные технологии требуют на 30% меньше первичного топлива при производстве одинаковых объемов продукции. В сфере рационализации природопользования это означает уменьшение выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду на ту же величину.

В условиях функционирования угледобывающего производства на данном этапе развития научно-технического прогресса возможна реализация в промышленных масштабах нескольких альтернативных **вариантов когенерационных технологий генерации энергоносителей:**

- вариант, реализующий скважинную подземную газификацию с комбинированным циклом парогенерации и аккумулирования тепловой

энергии;

- вариант, реализующий улавливание, каптирование и утилизацию сопутствующего газа метана при разработке месторождений газугольного типа;
- вариант, реализующий процесс надстройки двигателей непосредственно на тепловых генерирующих мощностях;
- вариант, реализующий использование тепловых насосов для утилизации низкопотенциальной теплоты таких составляющих угледобывающего производства, как горный массив, шахтные воды, вентиляционные выбросы, оборотная вода охлаждения компрессорных установок и др.

Мировая практика использования СПГ показывает его предназначение в качестве газомоторного топлива для двигателей внутреннего сгорания автомобилей, тракторов, тепловозов, самолетов и вертолетов. Испытания автомобилей на СПГ выявили техническую, экологическую и экономическую целесообразность применения газа.

Исследованиями установлено, что при одинаковой мощности двигателей, работающий на СПГ, газовый имеет в 1,5 – 2 раза больший межремонтный ресурс, в 2 раза меньший расход масла, а также хорошие экологические характеристики. СПГ при этом, предпосылается большая перспективность среди других видов альтернативных моторных топлив (водород, этанол, пропан, бутан, метанол, электричество).

Следует отметить, что переоснащение автотранспорта сложными криогенными топливными системами наиболее эффективно в случае использования их на транспортных средствах большой мощности и грузоподъемности. Вопрос заправки таких автомобилей не стоит, так как существующие центробежные насосы формируют давление и скорость, аналогичные бензиновым.

Эквивалент энергетической эффективности 1 л СПГ выглядит следующим образом: 0,67 л бензина и 0,59 л дизельного топлива.

Проектные проработки в области оценки перспектив и возможных направлений по переводу транспорта АО «СУЭК» на сжиженный природный газ (СПГ) рассматривались в двух отдельных независимых направлениях:

- 1. Перевод автотранспорта на газодизельный режим работы.**

1.1. Перевод малотоннажных автосамосвалов Scania, Volvo в газодизельный режим.

1.2. Перевод автосамосвалов БелАЗ 130 т на газодизельный режим работы.

1.3. Перевод автосамосвалов БелАЗ 220 т на газодизельный режим работы.

## 2. Строительство завода по производству СПГ

2.1. Строительство завода по производству СПГ из шахтного газа метана.

С учетом этого произведена оценка эффективности работы газодизельной системы, соответствие заявленным показателям: расход топлива 50/50, расчет экономического эффекта.

Для оценки эффективности работы техники в газодизельном режиме предполагается ежесменный статистический учет следующих показателей:

Средний расход топлива за смену, кг: СПГ и ДТ;

Маршрут (с привязкой к высотным отметкам);

Масса перевезенного груза за смену;

Расход масла.

Оценка инвестиционного проекта проведена для единицы техники, так как эффект от реализации масштабируется пропорционально количеству.

В работе разработаны экономические модели с выкладками по анализу рентабельности проекта перевода автосамосвальной техники на газодизельный режим работы.

Опыт применения СПГ в качестве топлива показывает реальное замещение до 50% дизельного топлива.

Применение СПГ - систем на малотоннажной технике (SCANIA, VOLVO) на основе предварительных данных не является рентабельным. Основная причина – высокая стоимость ежегодного технического обслуживания. Для экономической эффективности проекта требуется снижение стоимости обслуживания с 220 000 рублей до 60 000 рублей.

Применение СПГ – систем на крупнотоннажной техники (БелАЗ130т) является рентабельным проектом со сроком окупаемости 3 года.

Применение СПГ – систем на крупнотоннажной технике (БелАЗ 220т) на основании коммерческого предложения ООО «СТК» является нерентабельным проектом при условии 50% замещения ввиду высокой стоимости переоборудования. Достижение 70% замещения дизельного топлива позволит получить окупаемость на уровне 6 лет.

Стоимость переоборудования 220 тонных БелАЗов составляет 16 млн руб., что в 5 раз превышает затраты на переоборудование 130 тонных.

Высокие расходы дизельного топлива предполагают сравнительно небольшие сроки окупаемости при стоимости переоборудования в пределах 5 млн. рублей и стоимости годового обслуживания криогенного оборудования 200-300 тыс. руб.

Получение промышленных объемов СПГ связано с технологией его ожижения, основанного на процедуре охлаждения исходных компонентов природного газа до конечной точки конденсации. Данный процесс происходит в специальных промышленных холодильных установках со специальным хладагентом. В основе технологического процесса ожижения шахтного метана заложены следующие основные параметры: - криогенная температура ( $-162^{\circ}\text{C}$ ) и сверхнизкое давление (0.1 МПа). Исходя из этих параметров, становится очевидно, почему до настоящего времени отсутствует сравнительно дешевая технология получения сжиженного шахтного метана.

На основе проведенных автором исследований выявлено, что наиболее перспективной и экономически эффективной технологией получения сжиженного шахтного метана являются в современных условиях развития научно-технического прогресса стирлинг-технологии. В основу данной технологии заложен цикл Стирлинга в криогенных газовых устройствах, - в техническом плане они представляют криогенераторы с контурами внешнего охлаждения тепловых процессов. Установки с циклами Стирлинга, как правило, работают с газами с максимальной температурой конденсации в  $-200^{\circ}\text{C}$  и поэтому их использование наиболее подходяще для ожижения шахтного метана( температура ожижения  $-162^{\circ}\text{C}$ ) [16].

Представленная технология с использованием циклов Стирлинга характеризуется наличием одного немаловажного преимущества: - процесс ожижения шахтного метана осуществляется без ступени предварительного сжатия (в качестве рабочего используется атмосферное давление), что позволяет резко удешевить технологические процессы, обеспечить соответствующую компактность и простоту эксплуатации и технического обслуживания промышленной установки. Принципиально важная отличительная особенность технологии Стирлинга заключается в

достижении 100% порога сжижения подаваемого объема газа при низком давлении, что обуславливает полное отсутствие сбросовых производственных трубопроводов (несжижившаяся часть), чем отличаются промышленные установки с наличием в технологическом процессе высокого давления (установки дроссельно-детандерного типа и вихревые трубы).

Следует отметить, что создание установки (криогенератора) с заявленной производительностью 1.0 т/ч связано с технологическими особенностями использования так называемых традиционных способов (цикл дроссельно-детандерного тип и цикл вихревой трубки Ранка), и новых, инновационных способов, которые основаны на комбинаторике тепловых процессов в контурах внешнего и внутреннего охлаждения. Внутреннее охлаждение основано на изобарном расширении метана (частичное ожижение), внешнее – за счет использования конденсатора, который является составной частью КГМ Стирлинга. Общий вид установки (криогенератора ожижения метана) приведен на рис. 2.

Технология сжижения СПГ предусматривает несколько модификаций циклов. Практика показала, что наибольшее распространение получили циклы сжижения, основанные на использовании внешней криогенной установки, хладагентом в которой являются углеводородные газы или азот со степенью сжижения около 97%. Очень широко используется технология, основанная на циклах со смесями хладагентов.

Основными ограничениями при выборе криогенного цикла и технологии сжижения являются следующие составляющие: производительность, качественные характеристики исходного сырья, температура сжижения, давление, качество конечного продукта.



**Рис. 2 – Принципиальная функциональная структура завода-криогенератора по ожижению шахтного метана**

В таблице 1 приведена статистика использования технологических процессов сжижения в мировой практике.

Таблица 1 – Технологические процессы производства сжиженного природного газа

№№ п/п	Технологический процесс	Число технологических линий	Общая производительность, млн т/год
1	Классический каскад	4	2.2
2	CROCP	8	29.5
3	TEALARC	3	2.55
4	PRISO	3	3.35
5	APCI SMR	4	3.0
6	APCI C3-MR	71	156.5
7	APCI C3-MR/Split MR	9	37.9
8	APCI AP-X	6	46.8
9	Statoil/Linde MFC	1	4.3
10	Shell DMR	4	18.4
	<b>Итого:</b>	<b>113</b>	<b>304.5</b>

Стоимость строительства завода по производству СПГ существенно зависит от производителя, выбранной технологии сжижения и объемов производства. Сравнительная стоимость организации производства уже реализованных проектов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная стоимость строительства завода СПГ

Компания	Оборудование	Производи- тельность	Исполнение	Способ сжижения	Мощность	Стоимость
Dresser-Rand, Siemens (Германия)	Установка сжижения LNGO	2т/час	Мобильное	Турбодетандерный с азотным охлаждением	1.9 Мвт	11500000\$
Criostar (Франция), Intratool	Стационарный завод под ключ	3т/час	Стационарное	Азотный цикл	3.5 Мвт	21030000\$

(Россия)						
Criostar (Франция), Intratool (Россия)	Стационарный завод под ключ	1.5т/час	Стационарное	Азотный цикл	2.2 Мвт	14458500\$
Plum Energy (США)	Мобильный завод СПГ (оборудование)	1.85 т/час	Мобильное	Смешанный хладагент	1.0 Мвт	8600000\$
Sermem (Китай) Нефтегазовые инновации (Россия)	Мобильный завод под ключ	1.5 т/час	Мобильное	Смешанный хладагент	1.2 Мвт	20299847\$
Sermem (Китай) Нефтегазовые инновации (Россия)	Стационарный завод под ключ	3.0 т/	Стационарное	Смешанный хладагент	2.1 Мвт	23655015\$
Sermem (Китай) Нефтегазовые инновации (Россия)	Стационарный завод под ключ	1.5 т/час	Стационарное	Смешанный хладагент	1.1 Мвт	18450612\$
ООО НПФ «Криоген – Холод – Технологии» (Россия)	Стационарный завод под ключ	1.5 т/час	Стационарное	Смешанный хладагент	н/д	20672584\$
ООО НПФ «Циклогаз» (Россия)	Блок комплексной очистки газа перед блоком сжижения	1.5 т/час	Мобильное	Очистка газа методом коротко- цикловой адсорбции	0.3 Мвт	764526\$
ЗАО «Криогаз» (Россия)	Стационарный завод под ключ	1.5 т/час	Стационарное	Азотный цикл	н/д	19113150\$
ЗАО «Криогаз» (Россия)	Стационарный завод под ключ	3.0 т/час	Стационарное	Азотный цикл	н/д	25993884\$
ООО НПФ «Циклогаз» (Россия)	Мобильный комплекс с системой подготовки газа (оборудование)	1.5 т/час	Мобильное	Детандерный цикл с азотным охлаждением	1.94 Мвт	6880734\$

Расчет инвестиционного проекта по строительству завода СПГ из природного газа производился с учетом потребления топлива парком автосамосвалом БелАЗ 130 тонн (33 – собственные, 38 – привлеченные единицы, при переоборудовании за наш счет). Требуемое потребление СПГ составит порядка 3 т/ч.

Завод производительностью 3 т/ч с отгрузкой готовой продукции по цене СПГ 25 руб/кг окупится за 12 год после ввода в эксплуатацию. Если принимать к учету экономический эффект от перевода БелАЗов 130 тонн, то срок окупаемости снижается до 8 лет.

Основным фактором, влияющим на окупаемость являются высокие капитальные затраты, имеющие темпы роста намного ниже, чем увеличение производительности. Поэтому увеличение производительности завода в 3 раза позволит значительно снизить срок окупаемости, но для этого требуется рынок сбыта, которого на данный момент не существует.

В качестве силовых установок в конструкциях современных когенерационных установок преимущественное применение нашли поршневые двигатели внутреннего сгорания (ГПУ), газотурбинные двигатели (ГТУ) и силовые установки с топливными элементами (ТЭ).

Проведенный анализ основных характеристик и параметров применимости альтернативных силовых установок на базе использования ГПУ, ГТУ и ТЭ в целях создания мини-ТЭЦ на угледобывающих предприятиях позволяет сделать следующие выводы:

- при учете всех составляющих наиболее рациональным в составе мини-ТЭЦ является использование силовых установок на базе ГПУ, что обусловлено следующими аспектами:
- на угледобывающих предприятиях имеется технологическая потребность в тепловой энергии в виде пара (до 10–12 бар и 180–200° С) и горячей воды круглогодично;
- имеется технологическая потребность в промышленно-отопительных котельных в целях удовлетворения собственных нужд по электроэнергии и частично или полностью тепловой нагрузки горячего водоснабжения;
- имеется технологическая потребность утилизации шахтного газа, что позволяет избежать выбросов метана в атмосферу и выработать электроэнергию и тепло в районе добычи угля.

Следует отметить, что использование для обслуживания когенерационных технологий шахтного газа метана напрямую оказывает влияние на такие конструктивные характеристики и основные параметры, как степень сжатия, агрегатная мощность, среднее эффективное давление и, как следствие, наработку на отказ. В связи с этим необходимо провести исследования по сравнительному анализу характеристик разных типов технических средств и разработать практический механизм и рекомендации по выбору оптимальной и наиболее подходящей энергоустановки для реальных условий эксплуатации.

Проведенный анализ исследований, посвященных выбору технических средств, обслуживающих когенерационные технологии показал, что наиболее эффективными и оптимальными с точки зрения их обслуживания являются электростанции с использованием газопоршневых двигателей Стирлинга (внутреннего сгорания). В основу этих суждений положены такие составляющие, как самый высокий КПД при производстве тепловой и электрической энергии, самый низкий уровень экологически вредных выбросов в окружающую среду, высокие эксплуатационные характеристики с высокой степенью надежности и большая наработка на отказ. Исследования показали, что наиболее приемлемыми для горного производства являются газопоршневые двигатели в диапазоне мощности от 1 до 4 МВт в зависимости от объемов потребляемой тепловой и электрической энергии, что в свою очередь предопределяется объемами производства основной продукции.

Для выбора конкретной газопоршневой установки использовался метод многокритериальной оптимизации, суть которого заключается в построении единого обобщающего безразмерного интегрального критерия, по количественной величине производится ранжирование всех принятых к учету альтернатив.

Учитывая основной вид топлива газопоршневой электростанции – шахтный метан, график ее работы и характер электрических нагрузок потребителей в работе рассматривается **следующая категория газовой смеси**: ( $Q_{\text{нр}}=16,41 \text{ МДж/м}^3$ ,  $\gamma=1,11 \text{ кг/нм}^3$ ).

Оценочная матрица включает следующие технические, экономические и эксплуатационные характеристики:

- Значение электрического КПД генератора ( $KПД_{эл}$ ), % — основополагающий параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует отличительные конструктивные технические и термодинамические особенности газопоршневой установки;
- Значение метанового числа (метановый индекс), (безразмерная величина) — параметр, стремящийся к оптимуму-минимуму, характеризует возможность эксплуатационной работы газопоршневой установки без тенденции снижения электрической мощности обеспечивать безостановочную работу на различных концентрациях газа-метана;
- Значение экологического показателя по концентрации  $NO_x$ , (оксид азота),  $мг/нм^3$  (при 5%  $O_2$ ) — параметр, стремящийся к оптимум-минимуму, характеризует уровень негативного воздействия работы газопоршневой установки на окружающую экологическую среду;
- Значение удельной массы газопоршневой установки (отношение сухой массы/ $N_{эл}$ ),  $кг/кВт$  — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень технического совершенства энергетической установки с учетом габаритов и материалоемкости с учетом одинакового количества рабочих оборотов);
- Значения ресурсных показателей (общая продолжительность работы газопоршневой установки до отказа и капитального ремонта с учетом полного заявленного ресурса), часы — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень технического совершенства технологической конструкции газопоршневой установки и минимальный уровень эксплуатационных издержек в течении ее работы с учетом одинакового количества оборотов.
- Значение диапазона, в пределах которого возможно регулирование мощности (представляет из себя отношение, в числителе которого заявляется минимальная электрическая мощность, которая обеспечивает устойчивую работу газопоршневой установки в течение заданного промежутка времени, - в знаменателе представлена номинальная мощность энергоустановки), % — параметр, стремящийся к оптимуму-минимуму, характеризует уровень возможности обеспечения устойчивой работы установки в области номограмм электрических нагрузок, где ярко выражены максимумы и минимумы энергопотребления;

- Значение скорости нагружения и разгружения энергоустановки (представляет из себя отношение, в числителе которого заявлена разрешенная заводом-изготовителем величина шага набора/сброса электрической мощности, - в знаменателе представлена номинальная мощность энергоустановки), % — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень возможности, обеспечивающей устойчивую работу газопоршневой установки с учетом возникновения и проявления резкопеременных электрических нагрузок, которые формируются во время пуска приводов технических устройств и механизмов, оснащенных рядом мощных асинхронных электродвигателей);
- Значение средневзвешенной стоимости регламентного технического обслуживания газопоршневой установки с учетом стоимости расходных комплектующих и запасных частей в интервале временного периода, предшествовавшего первому капитальному ремонту, руб./кВт\*ч — параметр, имеющий оптимум-минимум, в его основу заложен уровень минимальных эксплуатационных издержек (затраты на смазочное масло (удельный суммарный годовой расход, соотнесенный с 1 кВт\*ч электроэнергии, которая выработана за этот же период, л/кВт\*ч). Показатель показывает уровень конструктивного технического совершенства двигателя газопоршневой установки в сфере потребления дорогого синтетического масла.

В свою очередь оценочная матрица была дополнена следующими экономическими критериями согласно рекомендациям комитета по промышленному развитию ООН ЮНИДО:

- Значение внутренней нормы рентабельности проекта, % — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму. Характеризует доходность инвестиционного проекта;
- Значение чистого дисконтированного дохода, млн руб., — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму. Характеризует доходность инвестиционного проекта за весь период оптимизации;
- Значение индекса прибыльности (безразмерная величина), - параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует относительную величину доходности инвестиционного проекта, характеризует величину суммы прибыли в пересчете на единицу вложенных средств.

Результаты проведенной интегральной всех принятых к учету альтернативных вариантов газопоршневых установок, наиболее предпочтительным и оптимальным вариантом являются **среднеоборотные MWM, входящие в концерн Caterpillar, затем следуют компании Waukesha серий ATGL и VHP.**

Синергический эффект этих энергоустановок обеспечивают следующие основные преимущества:

- Соответствующая степень надежности эксплуатации ГПУ, связанной с большим объемом камеры сгорания.
- Обеспечение щадящего режима работы при низком среднеэффективном давлении.
- Снижение уровня эксплуатационных затрат за счет увеличенных временных интервалов технического обслуживания (замена масла через 3000-4000 часов).
- Высокий эксплуатационный ресурс газопоршневых энергоустановок - 72000 часов до первого капитального ремонта, обозначенный завода-изготовителя - до 360000 - 400000 часов.

С учетом вышеизложенного, в современных реалиях научно-технического прогресса лучшими газопоршневыми установками для утилизации шахтного газа-метана, исходя из технических параметров, уровня надежности и привлечения соотношения цена/качество, являются немецкие MWM, входящие в концерн Caterpillar, которые и принимаются для технического оснащения в рамках данного проекта.

Апробация результатов исследований, разработка и обоснование проектных решений когенерационных технологий утилизации запасов метана в рамках представленной работы была проведена для условий Апсатского каменноугольного месторождения.

Ресурсы метана прогнозного плана, отнесенные к категории  $P_1$  оцениваются в 4205 млн.  $m^3$ , отнесенные к категории  $B_1$  - 499 млн.  $m^3$ , отнесенные к категории  $B_{2+3}$  - 574 млн.  $m^3$ , отнесенные к категории  $B_4$  - 422 млн.  $m^3$ , отнесенные к категории  $B_5$  - 975 млн.  $m^3$ , отнесенные к категории  $B_7$  - 552 млн.  $m^3$

Проведенный анализ целесообразности строительства когенерационной ТЭЦ на базе газопоршневых установок МWM в условиях Апсатского каменноугольного месторождения позволяет сделать вывод о приемлемой экономической эффективности и высокой эффективности ее эксплуатации, что позволяет в целом решить проблемные составляющие обеспечения соответствующей надежности и бесперебойности энергоснабжения в условиях высоких ценовых и технологических рисков. В результате реализации этого проекта будут полностью покрываться энергетические нужды всех потребителей Апсатского ГОКа и формируется возможность поставлять избыточную электрическую и тепловую энергию и мощность для дополнительных потребителей Чаро-Удоканского территориально-промышленного комплекса. Все это подтверждается результатами расчетов экономической эффективности сооружения когенерационной ТЭЦ, так как она:

- обеспечивает сравнительно низкий уровень эксплуатационных издержек производства электроэнергии – 0,65 коп. /кВт·ч против системного тарифа в 116 коп. /кВт·ч;
- обеспечивает в необходимом количестве тепловой энергией жилищно-коммунальную инфраструктуру вахтового поселка угольного разреза и все энергетические установки для производства угольной продукции;
- формирует комплекс источников добавленной стоимости и экономии затрат за счет технологических и технических преимуществ когенерационных установок;
- формирует реальную возможность получения дополнительных источников дохода, связанных с внешней продажей энергоносителей.

Технологии когенерационных ТЭЦ позволяют экономить до 15–25% энергоресурсов, что в эквиваленте приводит к снижению эксплуатационных издержек на 10–15%. Расчеты показали, что величина экономии энергоресурсов от собственной когенерационной ТЭЦ Апсатского каменноугольного месторождения составит в прямом исчислении порядка 498.0 млн руб и дополнительно формируется экономия в 56.0 млн руб за счет утилизации тепла уходящих газов при сроке окупаемости капитальных вложений в 4,5 года (без учета дисконтирования).

Кроме этого, основным достоинством предлагаемой когенерационной ТЭЦ является возможность участия в покрытии пиковой части графика нагрузки, где электроэнергия является более дорогой и то, что она максимально приближена к основным потребителям энергии, что, в свою очередь, предопределяет наличие очень простой инфраструктуры. Такая инфраструктура когенерационной ТЭЦ позволяет эффективно работать как в основном сегменте электрических нагрузок, так и в полупиковом и пиковом сегментах, что приводит к существенному повышению уровня энергобезопасности и энергоэффективности в условиях Апсатского месторождения.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором исследований решена научно-техническая задача, заключающаяся в развитии методологии проектирования технологических систем предприятий угольной отрасли с использованием стирлинг-технологий и мобильных газопоршневых ТЭЦ в функциональной структуре углегазоэлектрического комплекса, имеющая важное значение для теории и практики устойчивого функционирования и создания должного уровня конкурентоспособности угольной отрасли.

**Основные выводы, научные и практические результаты работы, полученные автором, заключаются в следующем:**

1. В результате проведенного анализа тенденций и закономерностей использования стирлинг – и когенерационных технологий, технологий перевода работы грузового транспорта, обслуживающего угледобывающие предприятия на газодизельный режим работы в мире, трендов и перспектив развития установлено, что существуют реальные предпосылки повышения технико-экономической эффективности угледобывающих предприятий за счет проектирования и внедрения технологических систем с использованием технологий ожижения шахтного газа метана для заправки автомобильного транспорта и использованием его в качестве первичного источника энергии в мобильных газопоршневых когенерационных ТЭЦ для выработки электрической и тепловой энергии.

2. В ходе исследований установлено, что реализация данного направления осуществима в, первую очередь, на предприятиях, которые имеют на

георесурсном балансе значительные промышленные запасы угля и шахтного газа метана, то есть классифицируются как газугольные.

3. В ходе проведенных исследований установлен реальный порог применения СПГ в качестве топлива, который показывает реальное замещение до 50% дизельного топлива. Применение СПГ - систем на малотоннажной технике (SCANIA, VOLVO) на основе предварительных данных не является рентабельным. Основная причина – высокая стоимость ежегодного технического обслуживания. Для экономической эффективности проекта требуется снижение стоимости обслуживания с 220 000 рублей до 60 000 рублей. Применение СПГ – систем на крупнотоннажной технике (БелАЗ 130т) является рентабельным проектом со сроком окупаемости 3 года. Применение СПГ – систем на крупнотоннажной технике (БелАЗ 220т) является нерентабельным проектом при условии 50% замещения ввиду высокой стоимости переоборудования. Стоимость переоборудования 220 тонных БелАЗов составляет 16 млн руб., что в 5 раз превышает затраты на переоборудование 130 тонных БелАЗов. Достижение 70% замещения дизельного топлива позволит получить окупаемость на уровне 6 лет.

4. Рассматривая возможный вариант перевода всей крупно - и малотоннажной техники на газодизельный режим работы, показано, что наиболее логичным этапом является вопрос строительства завода по производству собственного СПГ, который исключит монопольные поставки и предполагает наличие шахтного газа метана, извлекаемого в процессе предварительной дегазации угольных пластов с помощью пробуренных скважин кустово-разветвленной направленности с целью обеспечения максимальной метаноотдачи.

5. На основе многокритериальной оптимизации выполнена интегральная оценка технических средств обеспечения когенерационных технологий. Результаты оценки говорят о том, что при работе с таким первоисточником энергии как шахтный газ-метан, лучший интегральный эффект присущ среднеоборотным газопоршневым установкам (частота вращения 1000 об/мин). Хотя у других типов энергоустановок есть более превалирующие показатели (например, тепловая экономичность), но ряд других, более важных с технической точки зрения оценочных критериев, к которым с полным основанием можно отнести: эксплуатационный ресурс (у

газопоршневых установок типа MWM и VHP9500GSI он достигает 400000 часов) и сравнительно большие интервалы технического обслуживания и капитального ремонта, позволили сформировать большую величину синергического эффекта.

6. Установлено, что из ряда альтернативных по технологическим и техническим характеристикам газопоршневых модульных установок, которые имеют частоту вращения рабочего вала в 1000 об/мин, оптимальные значения интегральных показателей при их работе на шахтном газе-метане присущи энергоустановкам типа MWV концерна Caterpillar, Waukesha серий ATGL и VHP. Близкими к ним являются энергоустановки фирмы Cummins серий 1750 и 1160. Выявлено, что их близость к лучшим образцам обусловлена возможностью работать в условиях переменных нагрузок и сравнительно невысокой стоимостью, -резко улучшается такая составляющая производства, как экологичность, что в соответствии с условиями Киотского протокола позволяет получать дополнительную экономическую выгоду.

7. Установлено, что технологии когенерационных ТЭЦ позволяют экономить до 15–25% энергоресурсов, что в эквиваленте приводит к снижению эксплуатационных издержек на 10–15%. Расчеты показали, что величина экономии энергоресурсов от собственной когенерационной ТЭЦ Апсатского каменноугольного месторождения составит в прямом исчислении порядка 498.0 млн руб и дополнительно формируется экономия в 56.0 млн руб за счет утилизации тепла уходящих газов при сроке окупаемости капитальных вложений в 4,5 года (без учета дисконтирования).

8. Разработанные методические положения проектирования горных производств с когенерационными технологиями и результаты практических и теоретических исследований автора использованы при управлении качеством проектов в сфере повышения уровня обоснованности принятия стратегических решений при планировании развития горных работ в АО «СУЭК». Проведенный анализ целесообразности строительства когенерационной ТЭЦ на базе газопоршневых установок MWM в условиях Апсатского каменноугольного месторождения позволяет сделать вывод о приемлемой экономической эффективности и высокой эффективности ее эксплуатации, что позволяет в целом решить проблемные составляющие

обеспечения соответствующей надежности и бесперебойности энергоснабжения в условиях высоких ценовых и технологических рисков.

Основные положения и результаты диссертационных исследований отражены в 16 публикациях автора: 15 - в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 – SCOPUS, соответствующих специальности 25.00.21 – Теоретические основы проектирования горнотехнических систем:

1. **Горн Е.В.**, Гурков А.А., Разумняк Н.Л., Якунчиков Е.Н. Технологические схемы извлечения, утилизации и рационального использования метана на основе когенерационных технологий. Пути повышения эффективности горнодобывающих и горноперерабатывающих производств: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 12 (специальный выпуск 47), 2019.

2. **Горн Е.В.**, Гурков А.А., Разумняк Н.Л., Якунчиков Е.Н. Функциональная модель утилизации низкопотенциальной теплоты шахтных вод. Пути повышения эффективности горнодобывающих и горноперерабатывающих производств: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 12 (специальный выпуск 47), 2019.

3. **Горн Е.В.**, Гурков А.А., Разумняк Н.Л., Якунчиков Е.Н. Моделирование функциональной структуры инновационных угледобывающих предприятий с использованием нечетких когнитивных карт и систем поддержки принятия проектных решений. Пути повышения эффективности горнодобывающих и горноперерабатывающих производств: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 12 (специальный выпуск 47), 2019.

4. **Горн Е.В.**, Гурков А.А., Разумняк Н.Л., Якунчиков Е.Н. Синтез и оптимизация параметров многофункциональной технологической шахтосистемы отработки запасов Апсатского каменноугольного месторождения. Пути повышения эффективности горнодобывающих и горноперерабатывающих производств: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 12 (специальный выпуск 47), 2019.

5. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Ковтун А.А., Карасев Г.А. Технологические схемы извлечения, утилизации и рационального использования метана на

основе когенерационных технологий. Научно-методическое обеспечение выбора и обоснования когенерационных технологий горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 38), 2019.

6. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Снигирев В.В., Ковтун А.А. Когенерационная система энергосбережения угольной шахты. Научно-методическое обеспечение выбора и обоснования когенерационных технологий горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 38), 2019, с.29-36.

7. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Снигирев В.В., Ковтун А.А. Технологические схемы утилизации вентиляционного метана (МВС). Научно-методическое обеспечение выбора и обоснования когенерационных технологий горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 38), 2019, с. 45-52.

8. **Горн Е.В.**, Снигирев В.В., Ковтун А.А., Карасев Г.А. Техно-экономическое обоснование когенерационных технологий утилизации метана. Научно-методическое обеспечение выбора и обоснования когенерационных технологий горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 38), 201, с. 58-62.

9. **Горн Е.В.**, Ютяев А.Е., Агафонов В.В. Повышение уровня обоснованности проектных решений технологических систем угольных шахт на базе метода реальных опционов.

Уголь. 2019. № 9 (1122). С. 48-53. (SCOPUS)

10. **Горн Е.В.**, Кабиров М.П., Агафонов В.В. Задачи проектирования горнодобывающих предприятий на современном этапе недропользования. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S11. С. 15-19. (ВАК)

11. **Горн Е.В.**, Кабиров М.П., Агафонов В.В. Системное представление методики обоснования параметров технологических систем горнодобывающих предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S11. С. 20-24. (ВАК)

12. **Горн Е.В.**, Кабиров М.П., Агафонов В.В. Алгоритм реализации методики обоснования параметров технологических систем горнодобывающих

предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S11. С. 25-30. (ВАК)

13. **Горн Е.В.**, Кабиров М.П., Агафонов В.В. Развитие методических подходов к оптимальному проектированию технологических систем горнодобывающих предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S11. С. 3-8. (ВАК)

14. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Агафонов В.В. Алгоритм модульного синтеза прогрессивных технологических систем горнодобывающих предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S25. С. 13-16. (ВАК)

15. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Агафонов В.В. Минимаксные критерии при оптимизации параметров угледобывающих шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S25. С. 22-25. (ВАК)

16. **Горн Е.В.**, Куркутов С.А., Агафонов В.В. Логико-информационная модель проектирования технологических систем угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S25. С. 3-7. (ВАК)

Личный вклад автора в публикациях [1-16] состоит в постановке задач исследований, разработке концепции и научно-методического обеспечения выбора и обоснования когенерационных технологий утилизации метана, разработке соответствующего программного обеспечения, обобщении и интерпретации результатов исследований.