На правах рукописи

ГОЛОВИН Сергей Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Специальность 25.00.14 - Технология и техника геологоразведочных работ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» МГРИ-РГГРУ.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Меркулов Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Нескоромных Вячеслав Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Ивченко Иван Александрович

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита состоится 30 августа 2016 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.121.05 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.
Автореферат разослан «_____»_____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н. А.П. Назаров

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В целях реализации Основ государственной политики в области недропользования, приказом Министерства природных ресурсов РФ от 8 июня 2005 г. № 160 утверждена «Долгосрочная государственная программа изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы России до 2020 года», ориентированная на обеспечение прироста ценности недр России при повышении эффективности геолого-разведочных работ (ГРР). При этом увеличение объёмов ГРР связано с активным освоением удалённых от инфраструктуры труднодоступных регионов с отрицательными среднегодовыми температурами. В таких технически сложных и климатически неблагоприятных условиях проведения работ задача энергообеспечения геолого-разведочных объектов приобретает первостепенное значение.

В современных экономических условиях, когда санкции иностранных государств непосредственно сказываются на работе геолого-разведочной отрасли России, тема импортозамещения в геологоразведке становится одной из наиболее актуальных, требующей модернизации геолого-разведочной техники по целому ряду параметров с учётом возросших требований к производительности, эргономичности и безопасности условий труда буровиков.

В этой связи назрела острая необходимость проведения научных исследований и практических разработок при комплексном подходе к вопросам энергоснабжения, позволяющих максимально полностью и без потерь использовать имеющиеся энергетические ресурсы на основе новейших технических решений.

Таким образом, тема диссертации отличается актуальностью.

Цель работы – повышение эффективности разведочного бурения путём оптимизации комплексного энергоснабжения технологических потребителей буровых работ при совместном решении задач электро- и теплоснабжения на основе совершенствования систем утилизации теплоты (СУТ) передвижных ДЭС в составе автономных энергетических комплексов (АЭК) буровых установок разведочного бурения (УРБ) и создания предпосылок для их автоматизации.

Идея работы – обоснование и разработка автоматизированных СУТ в качестве источника теплообеспечения в составе АЭК на базе передвижной ДЭС для УРБ при бурении геолого-разведочных скважин.

Основные задачи исследований.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– анализ особенностей электро- и теплоснабжения технологических объектов буровых работ и выделение типов систем энергоснабжения, подходящих для условий геолого-разведочного бурения;

– исследования и основные направления модернизации теплоутилизационных установок АЭК при бурении геолого-разведочных скважин;

– проведение теоретических и экспериментальных исследований по

теплообеспечению УРБ за счет утилизации теплоты ДЭС;

– определение оптимальных режимов работы установок утилизации теплоты передвижных ДЭС для повышения эффективности АЭК УРБ;

– разработка модели СУТ и прогнозирование параметров теплоэнергетических установок для различных режимов работы при комплексном энергообеспечении УРБ;

– исследование технико-экономических моделей вариантов комплексного автономного энергообеспечения ГРР и выбор на этой основе оптимального варианта энергоснабжения УРБ;

– исследование влияния технико-экономических параметров на выбор оптимального варианта энергоснабжения УРБ.

Методы исследований

Пути решения поставленных задач для достижения цели работы:

– анализ литературных источников, данных, полученных при обследовании производственных систем энергоснабжения, зарубежного и отечественного опыта работ, проводимых в этой области;

– аналитические и экспериментальные исследования величин тепловых потерь технологических потребителей на буровых работах;

– экспериментальные исследования процесса утилизации теплоты ДЭС;

– математический анализ полученных экспериментальных данных для разработки регрессионной модели и обоснования её качества;

– исследования на основе моделирования параметров СУТ и оптимизация режимов работы теплоэнергетических установок;

– технико-экономическое моделирование условий для выбора оптимальных вариантов автономного энергоснабжения буровых работ и исследование их эффективности.

Экспериментальные исследования проводились на действующей экспериментальной теплоутилизационной установке для комплексного энергоснабжения буровой установки УКБ-4 на Сергиево-Посадском учебно-научно-производственном полигоне МГРИ-РГГРУ.

Научная новизна данной работы заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований автором впервые:

– выявлены основные зависимости между утилизируемым тепловым потоком от радиатора охлаждения в системе утилизации теплоты и теплотехническими параметрами дизель-агрегата энергетического комплекса УРБ;

– выявлены основные зависимости утилизированного теплового потока, поступающего в обогреваемое помещение буровой установки, от конструктивных параметров дизель-агрегата энергетического комплекса буровой УРБ;

– выявлены основные причины и общие закономерности изменения величин тепловых потоков в СУТ в зависимости от технологических режимов работы УРБ, величин нагрузок на дизель-генератор и конструктивных параметров теплоутилизационной установки, предложено решение для стабилизации температурного режима помещения буровой установки;

– установлена закономерность изменения величины утилизированного теплового потока от нагрузки буровой установки и расхода вторичного теплоносителя, предложенная в качестве математической модели СУТ, позволяющая прогнозировать оптимальные теплотехнические параметры энергетического комплекса УРБ;

– установлены основные взаимные связи температурных режимов в рабочей зоне буровой установки и дизель-агрегата, а также расхода вторичного теплоносителя с состояниями и положениями регулирующего и коммутирующего оборудования теплоутилизационной установки АЭК УРБ;

– выявлены зависимости величины приведенных затрат от технико-экономических факторов основных вариантов энергоснабжения, позволяющие определить величину текущих затрат и на этой основе выделить оптимальный в данный период вариант энергоснабжения по критерию минимизации затрат.

Практическая ценность работы заключается в том, что в результате экспериментальных, аналитических и опытно-конструкторских исследований:

1. Разработана модернизированная СУТ передвижных ДЭС для комплексного энергообеспечения установок колонкового бурения, исключающая определяющее влияние режимов работы буровой установки и нагрузок ДЭС на температурный режим помещения буровой.

2. Разработана и практически проверена математическая модель СУТ, позволяющая проводить расчет её параметров для использования в составе оптимизированного АЭК УРБ на стадии проектирования, а также проверку используемых теплоутилизационных систем с целью оптимизации их теплотехнических параметров.

3. Разработана основа для проектирования системы автоматического регулирования работы (САР) теплоэнергетического комплекса, базирующаяся на предложенной матрице состояний регулирующего и коммутирующего оборудования теплоутилизационной установки.

4. Разработана методика экономической оценки и выбора оптимального варианта энергоснабжения с использованием оптимизированного АЭК передвижных УРБ.

5. Результаты исследований имеют все предпосылки к применению не только при проведении разведочного бурения, но и на других направлениях производства, где в качестве индивидуальных энергоисточников используются передвижные ДЭС.

6. Теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований в области утилизации теплоты используются при чтении лекций и курсовом проектировании по дисциплинам «Теплотехника и теплоснабжение геолого-разведочных работ» и «Автоматизация производственных процессов».

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и технико-технологических решений доказана большим практически полученным фактическим материалом и сходимостью теоретических результатов с экспериментальными данными. Статистическая обработка результатов исследований проводилась с использованием компьютерной техники.

Личный вклад автора в разработку проблемы.

Все приводимые в работе основные положения, результаты и выводы получены автором лично. Он принимал непосредственное участие в разработке, лабораторных и натурных испытаниях теплоэнергетических установок.

Апробация работы

Основные положения диссертации обсуждались на заседаниях энергетической комиссии РАЕН, проводимых в рамках XII Международной научно-практической конференции «Новые идеи наукам о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 8-10 апреля 2015 года) с участием профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов МГРИ-РГГРУ и Санкт-Петербургского горного университета, а также в рамках сессии «Энергоэффективность, энергосбережение и снижение ресурсоемкости» X международной энергетической недели с участием профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов МГРИ-РГГРУ и экспертов РАН.

Реализация результатов работы

Установка утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций использовалась при проведении учебно-производственных практик обучающихся МГРИ-РГГРУ на Сергиево-Посадском учебно-научно-производственном полигоне МГРИ-РГГРУ по дисциплине «Теплоснабжение геолого-разведочных работ».

Публикации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 5 работах, в том числе в 3 работах из перечня научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложений.

В главе 1 проведён анализ литературных источников и состояния вопроса комплексного энергоснабжения производственных потребителей децентрализованных ГРР, рассмотрены особенности энергоснабжения производственных потребителей. Выполнена постановка задач исследований при комплексном подходе к решению вопросов энергоснабжения с применением СУТ дизель-агрегатов АЭК УРБ.

В главе 2 рассмотрены особенности теплоэнергетических комплексов установок колонкового бурения, проведено обоснование теплотехнических параметров дизель-генератора передвижных ДЭС. Выполнен расчёт и приведено обоснование конструктивных параметров теплоэнергетического комплекса, предложен разработанный вариант усовершенствованной конструкции теплоэнергетического комплекса для буровых установок колонкового бурения

В главе 3 поставлены цели, определены задачи и разработана методика проведения опытно-экспериментальных исследований СУТ передвижных ДЭС, получены результаты экспериментальных исследований.

В главе 4 проведено моделирование систем утилизации теплоты при бурении геолого-разведочных скважин, по опытным данным, полученным в ходе опытно-

экспериментальных исследований СУТ передвижных ДЭС, разработано уравнение регрессии, предложенное в качестве математической модели СУТ.

В главе 5 рассмотрены основные виды систем энергообеспечения УРБ и типовые варианты их энергообеспечения при проведении ГРР на твердые полезные ископаемые. С использованием теоретических основ технико-экономического моделирования вариантов энергоснабжения рассмотрена структура затрат по базовым вариантам комплексного энергоснабжения УРБ, выявлен ряд экономических преимуществ использования варианта индивидуального АЭК с СУТ для комплексного энергоснабжения УРБ.

В заключении излагаются основные выводы и рекомендации, обобщающие основные положения проделанной работы.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю, д.т.н., профессору М.В. Меркулову, коллегам, сотрудникам кафедры механизации автоматизации и энергетики горных и геолого-разведочных работ Института современных технологий геологической разведки, горного и нефтегазового дела МГРИ-РГГРУ А.М. Лимитовскому, В.А. Косьянову, А.П. Жернакову и другим за советы, помощь и моральную поддержку в подготовке работы.

Содержание работы

Автор при проведении исследований опирался на результаты работ в области повышения эффективности разведочного бурения, использования вторичных энергоресурсов при производстве ГРР, выполненных В.В. Алексеевым, Е.А. Козловским, А.М. Лимитовским, Ю.Д. Безруких, П.П. Безруких, А.А. Гланцем, А.П. Жернаковым, В.Г. Кардышем, В.А. Косьяновым, Б.В. Лукутиным, Ю.А. Марковым, М.В. Меркуловым, Н.Д. Михайловой, Б.В. Мурзаковым, С.И. Наугольновым, А.С. Окмянским, Б.М. Ребриком, Н.В. Тихоновым, Ю.В. Тихоновым и другими.

В основу проведенных исследований были положены работы А.М. Лимитовского, в которых предельно детально рассмотрены влияние систем энергообеспечения на ГРР в целом и основные направления повышения эффективности систем комплексного энергообеспечения УРБ.

В перспективных регионах освоения месторождений полезных ископаемых ГРР зачастую проводятся в труднодоступных районах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока, удалённых от региональных линий электропередач, где в качестве основного, а зачастую и единственного, комплексного энергоисточника УРБ используются передвижные ДЭС, и применяют СУТ дизель-агрегатов ДЭС, позволяющие эффективно и безопасно для персонала решать задачи теплоснабжения буровой. Однако, теплоутилизационные системы не лишены своих недостатков и требуют научного подхода к вопросам их усовершенствования с учётом использования в составе АЭК УРБ.

С учётом мобильного характера ведения ГРР, более приемлемой является схема с «воздушным» ТН (рисунок 1).

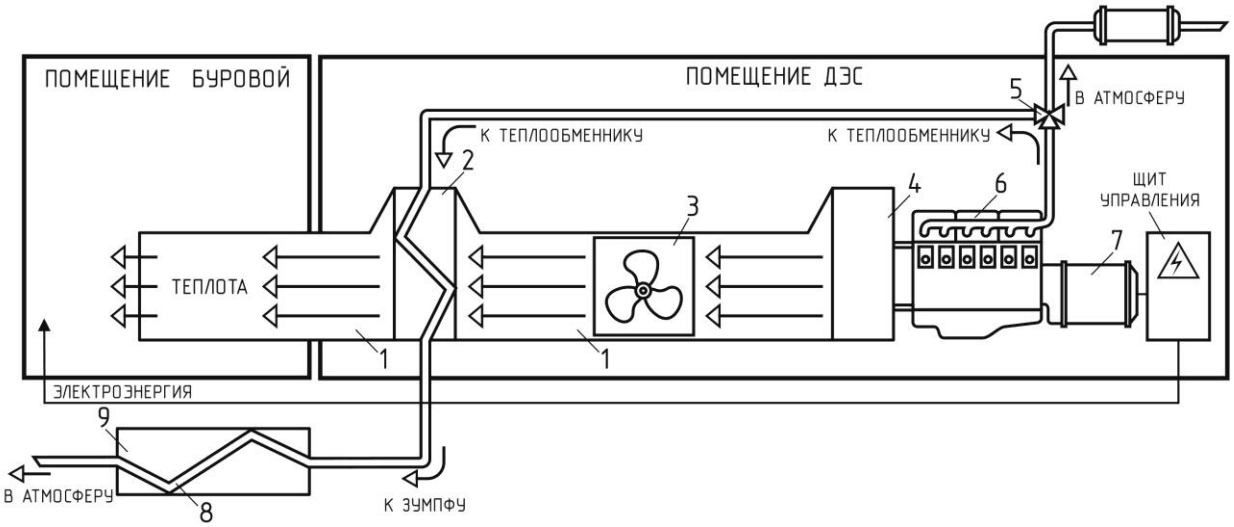

Рисунок 1 – Схема теплоутилизационной установки с использованием воздуха в качестве теплоносителя.

1 – воздуховод; 2 – газо-воздушный теплообменник; 3 – вентилятор; 4 – радиатор охлаждения дизель-агрегата; 5 – трехходовой атмосферный кран; 6 – дизель-агрегат; 7 – генератор; 8 – теплообменник зумпфа; 9 – зумпф.

Принцип работы такой установки заключается в отборе нагретого воздуха (вторичного теплоносителя) с радиатора дизель-агрегата и подаче его в обогреваемое помещение буровой через газо-воздушный теплообменник (ТО), где он дополнительно подогревается теплом выхлопных газов (первичного теплоносителя). Выхлопные газы далее поступают в ТО зумпфа, где остаточным теплом подогревают промывочную жидкость.

Комплексный анализ работы СУТ и производственного цикла проведения буровых работ, а также проведенные испытания позволили выявить ключевые проблемы, ограничивающие максимально эффективное использование АЭК и сформулировать основные направления их решения.

Причинами недостатков стали следующие проблемы:

1. «Жесткая» связь системы обогрева помещения буровой установки и системы охлаждения дизель-агрегата ДЭС.

2. Прямая зависимость мощности утилизированного теплового потока от величины технологической нагрузки дизель-агрегата.

3. Трудоёмкость управления процессом утилизации теплоты и обогрева рабочих мест, дополнительные трудозатраты и отвлечение буровиков от процесса бурения.

После перевода проблем в категорию задач, были предложены конкретные варианты решений по обозначенным направлениям и их конструктивная реализация.

Первое направление – зависимость теплового потока, поступающего в обогреваемое помещение буровой, от нагрузки дизель-агрегата.

Проблема: «жесткая» связь системы отопления буровой установки и системы охлаждения дизель-агрегата.

Задача: обеспечить независимость работы систем охлаждения дизель-агрегата и обогрева помещения буровой установки друг от друга при их тесной взаимной связи.

Решение: разобщение потока воздуха, поступающего с радиатора охлаждения дизель-агрегата, и потока воздуха, поступающего через ТО в помещение буровой.

Конструктивно решено путем установки заслонки-регулятора расхода воздуха в воздуховоде, где проточный вентилятор формирует поток воздуха от радиатора охлаждения дизель-агрегата.

Вторым направлением является обеспечение определяющего влияния температурного режима здания буровой на утилизируемый тепловой поток, не зависящего от технологической нагрузки дизель-агрегата.

Проблема: прямая зависимость мощности утилизированного теплового потока от величины нагрузки дизель-агрегата.

Задача: обеспечение определяющего влияния температуры в помещении буровой на поступающий тепловой поток, без зависимости от технологической нагрузки дизель-агрегата, что возможно в трех основных случаях.

Первое условие: электрическая нагрузка ДЭС падает до минимума. В этих условиях дизель-агрегат работает на холостом ходу и утилизируемый тепловой поток минимален. Этого может оказаться недостаточно для обеспечения заданного температурного режима помещения буровой, что потребует дополнительного теплового потока.

Решение: дозагрузка дизель-агрегата и дополнительный прогрев воздуха, поступающего в здание буровой.

Конструктивно решено путем установки в воздуховоде блока ТЭН, создающего дополнительную электрическую нагрузку и играющего роль доводочной подсистемы теплоснабжения.

Второе условие: в случае полной загрузки ДЭС, утилизируемый поток может поднять температуру в обогреваемом помещении буровой выше допустимых пределов. В этом случае потребуется уменьшить тепловой поток в здание буровой без ущерба для эффективного охлаждения радиатора дизель-агрегата.

Решение: уменьшение потока нагретого воздуха в обогреваемое помещение, без изменения величины воздушного потока, охлаждающего радиатор.

Конструктивно решено путём перекрытия потока воздуха через ТО заслонкой-регулятором расхода воздуха и перенаправление 3-ходовым краном потока выхлопных газов по обходной магистрали в ТО зумпфа.

Третье условие: в утилизации теплоты нет необходимости, но система должна продолжать эффективное охлаждение радиатора дизель-агрегата.

Решение: отключение СУТ в части расхода теплоносителей через ТО.

Конструктивно решено путём перекрытия потока воздуха через ТО заслонкой-регулятором расхода воздуха и перенаправление 3-ходовым краном потока выхлопных газов в атмосферу.

Совместное решение задач по данным направлениям усовершенствования СУТ

позволило предложить её модернизированный вариант (рисунок 2).

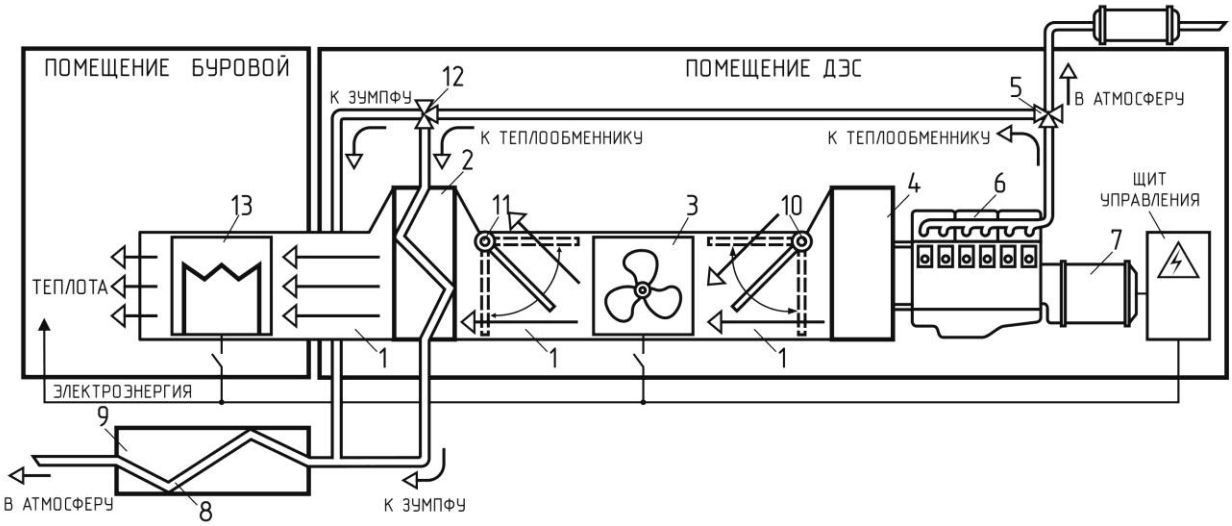

Рисунок 2 – Усовершенствованный вариант теплоутилизационной установки.
1– воздуховод, 2 – газо-воздушный ТО, 3 – вентилятор, 4 – радиатор охлаждения дизель-агрегата, 5 – 3-ходовой атмосферный кран, 6 – дизель-агрегат, 7 – генератор, 8 – ТО зумпфа, 9 – зумпф, 10 – регулятор расхода воздуха радиатора охлаждения дизель-агрегата, 11 – регулятор расхода воздуха газо-воздушного ТО, 12 – 3-ходовой кран газо-воздушного ТО, 13 – блок ТЭН.

Третье направление – автоматическое регулирование основных процессов, протекающих при реализации первых двух направлений совершенствования конструкции системы утилизации теплоты, внедрение системы автоматического регулирования (САР) СУТ, обеспечивающей заданный режим работы АЭК без вмешательства со стороны оператора.

Проблема: трудоёмкость управления процессом утилизации теплоты передвижных ДЭС, дополнительные трудозатраты и отвлечение буровиков от процесса бурения.

Решение: автоматизирование процесса регулирования утилизируемого теплового потока с целью минимизации трудозатрат буровой бригады и в интересах теплоснабжения помещения буровой установки.

Совершенствование СУТ и оптимизация режимов их работы в составе АЭК УРБ позволит выгодно перераспределить доли полезного использования теплоты в тепловом балансе ДЭС, а также создать условия для экономии топливных ресурсов, чем в значительной степени уменьшить влияние топливной составляющей в энергетическом балансе буровых работ.

Решение поставленных задач дало возможность разработать усовершенствованный вариант СУТ, в своей работе учитывающей режимы работы УРБ, создать предпосылки для её автоматизации, разработать математическую модель модернизированной СУТ и проверить её эффективность при технико-экономическом моделировании различных условий проведения ГРР, что позволило предложить обоснованное решение вопроса эффективного комплексного энергоснабжения технологических потребителей ГРР.

Исследования, проводимые в направлении решения поставленных задач, позволили сформулировать следующие защищаемые положения.

<u>Первое защищаемое положение</u>.

При расчете расхода воздуха от радиатора охлаждения в системе утилизации теплоты, следует руководствоваться полученной зависимостью, учитывающей температурный режим дизель-агрегата автономного энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения.

Общий тепловой поток, образующийся при сгорании топлива, зависит от мощности двигателя, удельного расхода топлива и его теплотворной способности

$$Q = \frac{Ne \cdot g \cdot Q_0}{3600}, \text{кВт} \qquad (1)$$

где Ne – номинальная мощность дизель-агрегата, кВт; g – удельный расход топлива, кг/кВт·ч; Q_0 – низшая теплота сгорания топлива кДж/кг.

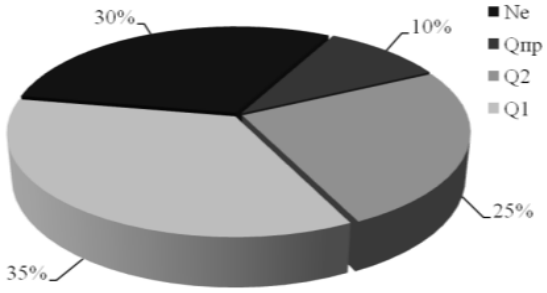

Рисунок 3 – Тепловой баланс дизель-агрегата

Распределение затраченной теплоты на полезную работу и различные потери называют тепловым балансом двигателя (рисунок 3). При сгорании топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в механическую работу (Ne) полезно преобразуется только 30-40% выделяемого тепла.

Остальное тепло теряется, причем в основном уносится охлаждающей жидкостью (Q1) и выхлопными газами (Q2), поэтому чрезвычайно важна задача минимизации энергопотерь за счёт максимальной утилизации теплоты ДЭС.

Рассмотрим основные теплотехнические параметры дизель-агрегата передвижной ДЭС. С точки зрения утилизации наибольший интерес представляют потоки теплоты, отводимые системой охлаждения дизель-агрегатаQ1 и системой газовыхлопа Q2.

Для того, чтобы отобрать количество теплоты $Q1_{ОЖ}$, подводимое к радиатору охлаждающей жидкостью (ОЖ), радиатор следует охлаждать потоком воздуха $Q1_В$.

При этом тепловой режим дизель-агрегата будет регулироваться расходом воздуха V_1, определяемым температурой ОЖ в системе охлаждения

$$V_1 = \frac{М_{ОЖ} С_{ОЖ}(t_К - t_Н)}{\rho_В С_В \Delta t_В} \qquad (2)$$

где $М_{ОЖ}$ – массовый расход ОЖ в системе охлаждения дизель-агрегата, кг/с;$С_{ОЖ}$ и $С_В$ – теплоемкость, соответственно, ОЖ и воздуха, кДж/кг ^oC;$t_К$, $t_Н$– температура ОЖ на входе и выходе из радиатора, ^oC;$\Delta t_В$ – перепад температуры воздуха на радиаторе, ^oC.

Учитывая то, что $М_{ОЖ}$, $\rho_В$ и $С_В$ величины постоянные, зависящие от мощности и конструктивных особенностей дизель-агрегата, можно применить константу Ч, характеризующую систему охлаждения дизель-агрегата

$$Ч = \frac{М_{ОЖ} С_{ОЖ}}{\rho_в С_в}, \qquad (3)$$

и после её подстановки в (2), получим зависимость

$$V_1 = Ч\frac{(t_К - t_Н)}{\Delta t_в}, м^3/с, \qquad (4)$$

Полученная зависимость отражает режим регулирования теплового потока радиатора в зависимости от температуры ОЖ в системе охлаждения дизель-агрегата, что позволяет определить граничные значения расхода воздуха исходя из требований оптимальной эксплуатации дизель-агрегата.

Это позволит при использовании предложенной модернизированной установки утилизации теплоты поддерживать рабочую температуру дизель-агрегата при переменных технологических нагрузках посредством изменения положения заслонки-регулятора расхода воздуха радиатора охлаждения дизель-агрегата ДЭС.

<u>Второе защищаемое положение.</u>

При расчёте систем утилизации теплоты автономного энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения следует учитывать зависимость величины поступающего в обогреваемое помещение буровой теплового потока от конструктивных параметров дизель-агрегата.

Следующий тепловой поток, представляющий интерес в целях полезного использования– тепловой поток от выхлопных газов (ВГ)дизель-генератора, определяется по формуле

$$Q2 = V2 \cdot C_{ВГ} \cdot P_{ВГ} \cdot \Delta T, кВт \qquad (5)$$

где V2 – объемный расход ВГ, м³/с; $C_{ВГ}$ – теплоемкость ВГ, кДж/кг град, $P_{ВГ}$ – плотность ВГ, кг/м³; ΔТ – перепад температур газов в ТО, ^{0}С.

Величину объемного расхода ВГ можно определить из уравнения состояния газа, находящегося в цилиндрах

$$V_Ц = \frac{\pi \cdot Д_Ц^2 \cdot Н \cdot n \cdot К}{480}, м^3/с \qquad (6)$$

где $Д_Ц$ – диаметр цилиндра дизель-агрегата, м; Н – ход поршня, м; n – число оборотов, об/мин, К – число цилиндров.

Уравнение состояния может быть записано в следующей форме

$$\frac{P_Ц \cdot V_Ц}{T_Ц} = \frac{P_{ВГ} \cdot V_2}{T_{ВГ}} \qquad (7)$$

откуда можно найти величину объемного расхода ВГ

$$V_2 = \frac{P_Ц V_Ц T_{ВГ}}{T_Ц P_{ВГ}}, м^3/с; \qquad (8)$$

где $P_Ц$ – давление в цилиндре перед выпуском, Па, $V_Ц$ – объём газа в цилиндрах, м³/с; $T_{ВГ}$ – температура газов в конце такта выпуска, ^{o}К, $T_Ц$ – температура газов в цилиндре перед выпуском, ^{o}К, $P_{ВГ}$ – давление газов в цилиндре в конце такта выпуска, Па.

Подставив в последнюю формулу (8) первоначальное значение $V_Ц$ (6) получим зависимость для объемного расхода ВГ

$$V_2 = \frac{\pi \cdot Д_Ц^2 \cdot Н \cdot P_Ц \cdot T_1 \cdot n \cdot К}{480 \cdot P_{ВГ} \cdot T_Ц}, м^3/с \qquad (9)$$

Расход воздуха, необходимый для отбора теплоты ВГ в газо-воздушном ТО

$$V_3 = \frac{Q}{P_В C_В \Delta t_{ТО}}, м^3/с \quad (10)$$

где $P_В$ – плотность воздуха, кг/м^3; $C_В$ – теплоемкость воздуха, кДж/кг град; $\Delta t_{ТО}$ – перепад температур воздуха на газо-воздушном ТО, ^oC.

Сравнивая значения расхода воздуха необходимого для отбора теплоты от радиатора системы охлаждения (V_1) и теплоты, выделяемой ВГ в газо-воздушном ТО (V_3), выбирают большее из этих значений. Выбранная величина расхода воздуха будет определять производительность вентилятора в канале формирования потока воздуха в воздуховоде СУТ.

Общий тепловой поток, отводимый от дизель-генератора ОЖ и ВГ,

$$Q_{об} = Q_{1ОЖ} + Q_2, кВт \quad (11)$$

После подстановки входящих значений получим величину теплового потока, отводимого от дизель-генератора, выраженную через его основные конструктивные параметры

$$Q_{об} = M_{ОЖ} \cdot C_{ОЖ} \cdot \Delta t_{ОЖ} + \frac{\pi \cdot Д_Ц^2 \cdot Р_Ц \cdot Т_В \cdot n \cdot К}{480 P_В Т_Ц} \rho_2 C_2 \Delta T, кВт \quad (12)$$

где $M_{ОЖ}$ – расход ОЖ в системе охлаждения дизель-генератора, кг/с; $C_{ОЖ}$ – теплоемкость ОЖ, кДж/кг град, $\Delta t_{ОЖ}$ – перепад температуры ОЖ ($t_Н$ и $t_К$) на входе и выходе из радиатора, ^{0}С,К – число цилиндров, $Д_Ц$ – диаметр цилиндра дизель-агрегата и Н – ход поршня, м; n – число оборотов, об/мин,$V_Ц$ – объем газа в цилиндрах, м³/с; $Р_Ц$ – давление в цилиндре перед выпуском, Па, $Р_{ВГ}$ – давление газов в цилиндре в конце такта выпуска, Па, $Т_Ц$ – температура газов в цилиндре перед выпуском, $^oК$, $Т_{ВГ}$ – температура газов в конце такта выпуска, $^oК$.

Последнее уравнение позволяет определить максимальный тепловой поток в зависимости от конструктивных параметров дизель-генератора, что дает возможность рассчитать основные характеристики СУТ для конкретного типа дизель-агрегата, используемого в ДЭС, применяемой на ГРР в качестве индивидуального АЭК УРБ.

Кроме того, такая оценка величины теплового потока, который можно отобрать от дизель-агрегата, получив его исходные тепловые параметры, позволит провести расчёт конструктивных параметров теплоутилизационной установки.

<u>Третье защищаемое положение.</u>

При расчете параметров системы утилизации теплоты для различных режимов работы автономного энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения следует руководствоваться разработанной математической моделью, учитывающей нагрузку буровой установки и расход теплоносителя.

Для практического выявления определяющего влияния параметров дизель-агрегата на величину потока утилизируемой теплоты и определения оптимальных режимов работы теплоутилизационной установки в лаборатории теплотехники на Сергиево-Посадском учебно-научно-производственном полигоне МГРИ-РГГРУ на действующей установке

утилизации теплоты были проведены экспериментальные исследования, целью которых являлось:

1. Определение величины теплового потока, поступающего в газо-воздушный ТО с ВГ при различной нагрузке дизель-агрегата.

2. Оценка величины теплового потока, утилизированного в газо-воздушном ТО в зависимости от расхода воздуха при различных нагрузках и постоянной температуре на входе в ТО.

3. Установление зависимости утилизированного теплового потока от температуры воздуха на входе в газо-воздушный ТО.

Состав установки (рисунок 4): дизельная электростанция ДЭС-60р, щит управления, нагрузка (электрический водонагреватель ЭВН-100 с системой принудительной циркуляции и охладителем), универсальный газо-воздушный ТО, подключенный к системе газовыхлопа и воздуховоду отвода нагретого воздуха от радиатора охлаждения дизель-агрегата осевым вентилятором ВМ-4, с шиберной заслонкой в канале воздуховода в качестве регулятора расхода воздуха от радиатора охлаждения дизель-агрегата к ТО, комплект контрольно-измерительных приборов для замера мощности на генераторе, расхода воздуха, расхода топлива, температур воздушного потока и температур ВГ, и тепловизор FLIR-i3.

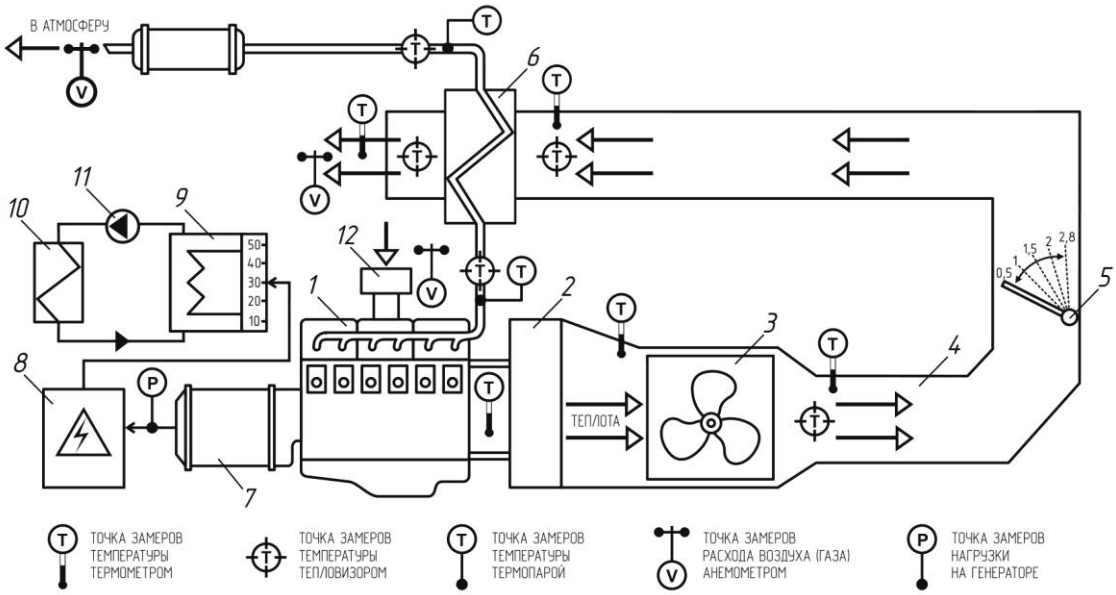

Рисунок 4 – Схема экспериментальной теплоутилизационной установки.

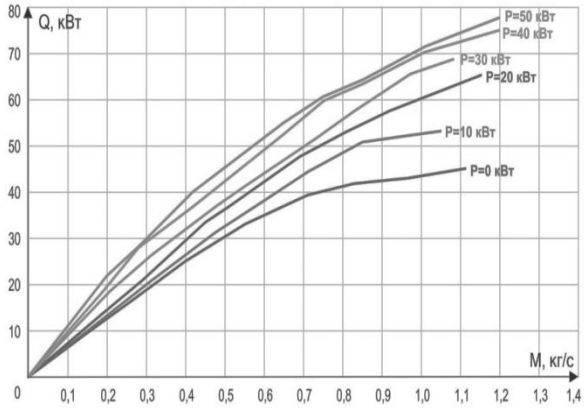

Рисунок 5 – Зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от расхода воздуха (M) и нагрузки дизель-агрегата (P)

Контролируемые параметры замерялись в соответствии с методикой, разработанной исходя из возможностей регулировки переменных параметров дизель-агрегата и теплоутилизационной установки. Такой объём проделанной работы позволил накопить массив данных, позволивший практически выявить и наглядно отобразить зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от расхода воздуха (M) и нагрузки дизель-агрегата (P) (рисунок 5).

Успешно выполненное физическое моделирование и полученные экспериментальные данные позволили получить статистическую выборку среднего объёма, что сделало возможным разработку статистической модели СУТ с целью определения параметров её оптимального режима работы.

Результаты эксперимента показали, что величина $Q_{УТ}$ существенно зависит от двух внешних факторов – нагрузки дизель-агрегата и величины расхода воздуха, которые и были включены в модель в качестве независимых случайных переменных.

Установлено, что зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от нагрузки дизель-агрегата (P) близка к линейной (рисунок 6), а зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от расхода воздуха (M) носит логарифмический характер (рисунок 7), и при влиянии на величину утилизируемого теплового потока Q факторов P и M, она в большей степени определяется расходом воздуха M.

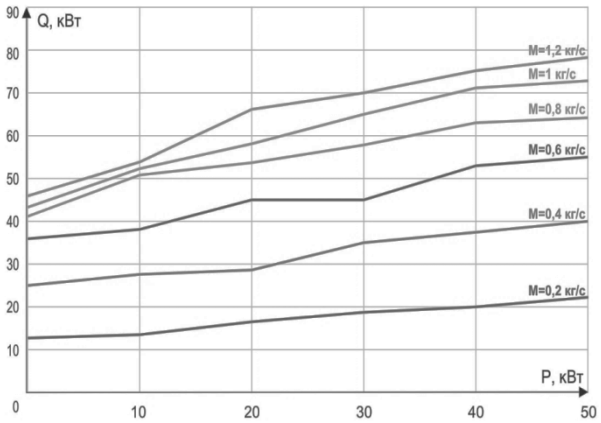

Рисунок 6 – Зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от нагрузки дизель-агрегата (P)

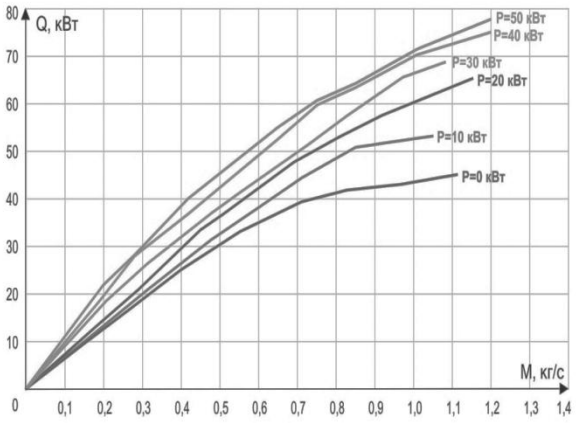

Рисунок 7 - Зависимость утилизируемого теплового потока (Q) от расхода воздуха (M)

По опытным данным получено уравнение регрессии (или корреляционной связи), устанавливающее связь между величиной утилизируемым тепловым потоком и двумя влияющими параметрами M и P

$$Q = (46{,}69 + 0{,}57 \cdot P) + (21{,}22 + 0{,}259 \cdot P) \cdot lnM, \text{кВт} \qquad (13)$$

Проверка качества модели показала, что модель является:

– точной (обобщенный коэффициент корреляции ϒ = 5,93, т.е. < 10%, что свидетельствует о приемлемом совпадении реальных значений теплового потока и воспроизводимых моделью);

– адекватной (скорректированный коэффициент детерминации $\check{R}^2$ = 0,981, т.е. близок к 1);

– значимой (при уровне значимости α = 0,05, расчетное значение критерия Фишера F = 2227,5, что значительно превышает табличное значение критерия Фишера $F_{ТАБ}$, = 3,22).

Это означает, что полученное уравнение регрессии может считаться математической моделью СУТ передвижной ДЭС и использоваться как для расчета новых СУТ, так и для проведения проверки эксплуатируемых с целью оптимизации режимов их эксплуатации.

<u>Четвертое защищаемое положение.</u>

Для достижения и поддержания стабильных оптимальных температурных режимов в рабочей зоне установки разведочного бурения и дизель-агрегата автономного энергетического комплекса при переменных технологических нагрузках без вмешательства оператора рекомендуется применять разработанную на основе предложенной математической модели систему автоматического регулирования тепловых потоков.

В развитие решения оптимизационной задачи, необходимо предусмотреть систему автоматического регулирования (САР) процесса утилизации теплоты ДЭС для достижения и поддержания стабильных температурных показателей дизель-агрегата и помещения буровой без вмешательства оператора, что приведёт к повышению значения КПД всей энергоустановки до максимального и освободит буровиков от дополнительной работы, что, как следствие, приведёт к повышению эффективности ГРР в целом.

Необходимо принять во внимание, что для каждого из регулирующих и коммутирующих элементов теплоутилизационной установки в каждый момент времени есть конечное число положений (состояний), в совокупности которых заключается смысл каждого из режимов работы всей системы, призванной при отклонении температурного режима помещения буровой и дизель-агрегата от заданного возвращать тепловую обстановку в установленные температурные границы.

Для автоматизации процесса утилизации теплоты ДЭС целесообразно использовать систему автоматического регулирования (САР) утилизируемых тепловых потоков.

В качестве предложения архитектура САР СУТ может быть реализована в виде контура регулирования с обратной связью. В разработанном варианте теплоутилизационной установки с САР (рисунок 8) в таком контуре регулирования комплексный процесс охлаждения дизель-агрегата, утилизации теплоты ДЭС и обогрева помещения буровой контролируется датчиками, отклонения от заданных значений тепловых режимов дизель-агрегата и помещения буровой компенсируются посредством

изменения регулирующими органами положения (состояния) исполнительных элементов по соответствующим сигналам регулятора.

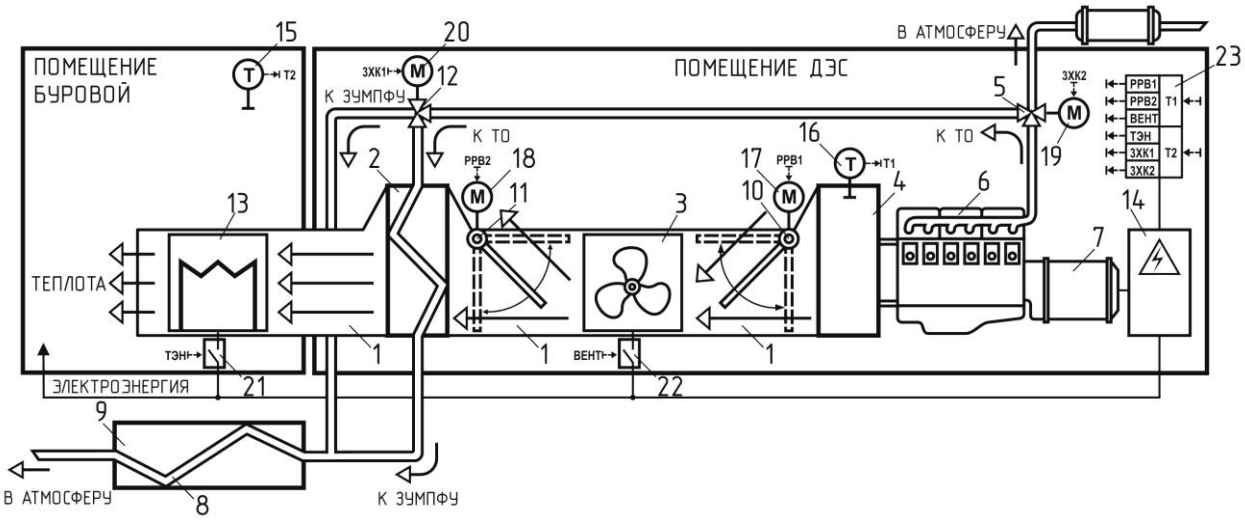

Рисунок 8 – Схема модернизированной СУТ с САР

1 – воздуховод; 2 – газо-воздушный ТО; 3 – вентилятор; 4 – радиатор дизель-агрегата; 5 – 3-ходовой атмосферный кран; 6 – дизель-агрегат; 7 – генератор; 8 – ТО зумпфа; 9 – зумпф; 10 – регулятор расхода воздуха радиатора; 11 – регулятор расхода воздуха газо-воздушного ТО; 12 – 3-ходовой кран газо-воздушного ТО; 13 – блок ТЭН; 14 – щит управления; 15 – термодатчик помещения буровой; 16 – термодатчик системы охлаждения дизель-агрегата; 17 – привод регулятора расхода воздуха радиатора; 18 – привод регулятора расхода воздуха газо-воздушного ТО; 19 – привод 3-ходового атмосферного крана; 20 – привод 3-ходового крана газо-воздушного ТО; 21 – управляемый выключатель вентилятора; 22 – управляемый выключатель блока ТЭН; 23 – блок управления теплоутилизационной установкой.

В развитие уровня автоматизации – САР в перспективе должна не только управлять процессом теплообеспечения по заданным алгоритмам, но и диагностировать работоспособность отдельных узлов и механизмов, постоянно контролировать подсистемой газоанализации воздушную обстановку в обогреваемом помещении на предмет обнаружения утечки ВГ из контура системы газовыхлопа в систему отопления, а также быть способной к интеграции с АСУ процессом бурения.

В сложившихся хозяйственно-экономических условиях, когда к перспективам освоения труднодоступных регионов страны приковано повышенное внимание не только специалистов в области геологоразведки, но и экономистов, принимающих активное участие в формировании концепции освоения, технико-экономические аспекты определяют новый подход к вопросам обеспечения геолого-разведочных работ необходимыми энергетическими мощностями, учитывающий преимущества применения энергосберегающих технологий при обосновании оптимальной модели энергообеспечения для каждого конкретного случая.

Особенности энергообеспечения ГРР в удаленных от централизованных энергосистем регионах предполагают:

- использование большого разнообразия возможных вариантов энергообеспечения,

значительно различающихся по затратной части;

- производство тепловой и электроэнергии на местах и комплексное решение вопросов электро- и теплоснабжения;

- потребность в переходе от одного варианта энергообеспечения к другому, в зависимости от масштаба и стадийности проводимых работ.

В зависимости от объёмов ГРР, удаленности от централизованной электрической сети (ЦЭС), рассредоточенности потребителей по площади производства работ и некоторых прочих условий, могут быть применены следующие варианты энергоснабжения буровых установок (рисунок 9):

- от ЦЭС с трансформацией электроэнергии по линиям электропередач (ЛЭП) и электрообогревом помещений УРБ;

- от стационарной ДЭС (СДЭС) с трансформацией электроэнергии по ЛЭП и печным (или электрическим) отоплением помещений УРБ;

- от полустационарных групповых ДЭС (ГДЭС) без трансформации энергии и печным отоплением помещений УРБ;

- от индивидуальных автономных передвижных ДЭС (ПДЭС) с утилизацией теплоты дизель-агрегатов на нужды теплоснабжения помещений УРБ.

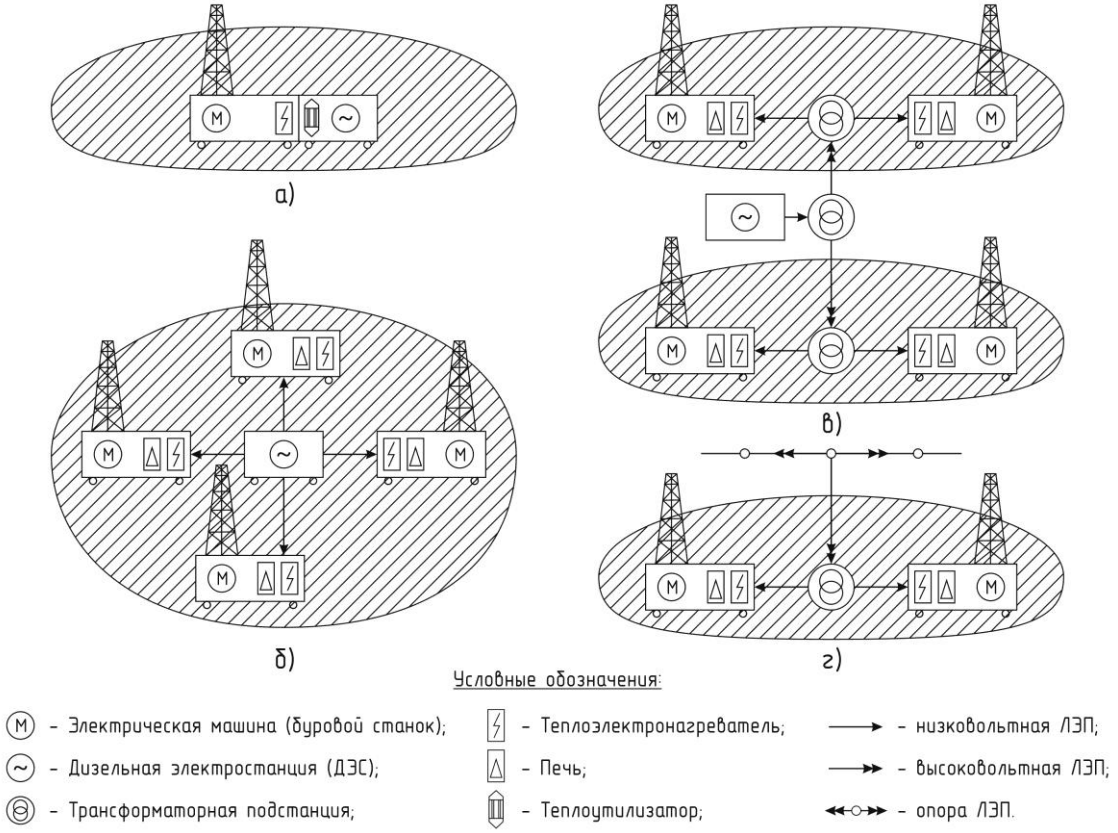

Рисунок 9 – Базовые варианты энергообеспечения УРБ

В основном, выбор приемлемого варианта энергообеспечения не представляет сложности. Например, когда через месторождение или в непосредственной близости от него проходит линия ЦЭС, варианты энергообеспечения с помощью ДЭС можно рассматривать в качестве резервных (аварийных). Однако, в отдельных случаях, может

быть одновременно рассмотрено несколько вариантов и тогда выбор наиболее предпочтительного из них становится сложной задачей, требующей значительного объема технических и экономических расчетов по каждому из них с последующим сравнением результатов.

Для расчета финансового потока выбранного для анализа варианта энергоснабжения имеет смысл рассматривать только статьи затрат, так как понятие «доход» в области энергоснабжения ГРР не имеет смысла. В этой связи формула затрат будет иметь вид:

$$Z = -\text{К} - \text{К}_{\text{ОБ}} - \text{И} + D + E + A \quad (14)$$

где К – первоначальные капиталовложения на приобретение оборудования, его транспортировку и возможный капремонт, $\text{К}_{\text{ОБ}}$ – начальный оборотный капитал (в основной массе – резерв на приобретение топлива), И – издержки производства,

$$\text{И} = \text{И}_{\text{КВ}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (15)$$

где $\text{И}_{\text{КВ}}$ – квартальные затраты; i – ставка (квартальная) альтернативного вложения (доли единиц); n – количество анализируемых единиц времени (кварталов); D – остаточные капиталовложения, приведенные к начальному моменту:

$$D = \frac{K(1-pn)}{(1-i)^n} \quad (16)$$

где p – амортизационный коэффициент для оборудования; Е – экономия на налоге на прибыль (в связи с текущими затратами):

$$E = \text{И}_{\text{К}}\text{С}_{\text{НП}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (17)$$

где $\text{С}_{\text{НП}}$ – ставка налога на прибыль (доли единиц); А – экономия на налоге на прибыль (в связи с амортизационными отчислениями):

$$A = \text{К} \cdot p \cdot \text{С}_{\text{НП}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (18)$$

Такие зависимости, применяемые для расчёта финансовых затрат по рассматриваемым вариантам энергоснабжения геолого-разведочных объектов, приведённые к начальному моменту времени, можно принять за экономико-математическую модель. В качестве критерия оптимизации можно рассматривать минимум приведенных затрат. Это позволит провести сравнительный анализ возможных в определённых условиях вариантов энергоснабжения технологических объектов и отобрать из них удовлетворяющие оптимизационному критерию.

Сравнение затрат по возможным вариантам энергоснабжения при постановке задачи с конкретными заданными условиями (буровые установки УКБ-4; количество буровых установок – 3 ед.; годовой объем бурения – 10800 метров в год, глубина скважины – 300 метров; стоимость дизельного топлива с учетом доставки к месту работ –30000 руб./т.; стоимость электроэнергии по тарифу госсети – 2,5 руб./кВт·ч; теплоснабжение – от ТЭН мощностью 10 кВт и печей; электрическая нагрузка – 38,5 кВт; тепловая нагрузка – 40 кВт) приводится на рисунке 10.

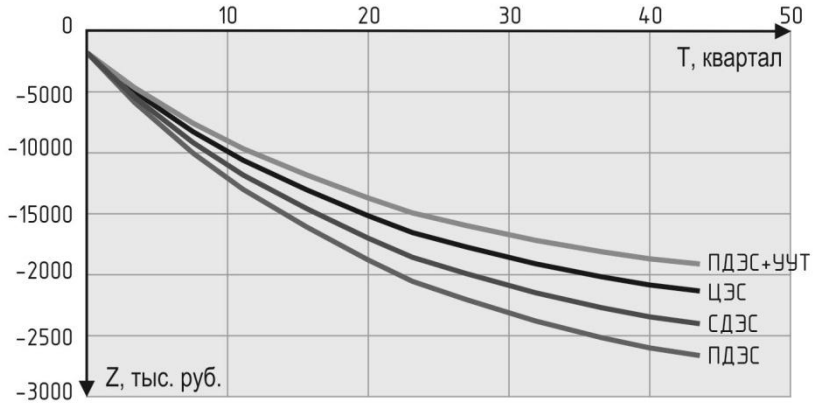

Рисунок 10 - Сравнение вариантов энергоснабжения по критерию минимума затрат.

Минимальные затраты обеспечивал вариант энергоснабжения от ЦЭС, который и являлся оптимальным для заданных условий, пока из затрат не исключили расходы на теплообеспечение буровой от электрообогревателей и печей за счёт использования теплоутилизационной установки. При такой постановке вопроса оптимальным стал вариант энергоснабжение от ПДЭС с СУТ.

Среди параметров, также выступающих в качестве критерия оптимизации, можно выделить расстояние от места производства работ до линий ЦЭС или предельное расстояние подключения$l_{\text{ПР}}$ – расстояние, при превышении которого рассматриваемый вариант энергоснабжения перестает удовлетворять требованиям оптимальности. Это чрезвычайно важный показатель эффективности того или иного варианта энергоснабжения, так как понятие расстояния, в конечном итоге, определяет область эффективного применения тех или иных энергоисточников.

Проведённые расчёты показали:

– сроки проведения работ мало влияют на величину предельного расстояния, тогда как утилизация теплоты в целях отопления помещений буровых установок при энергоснабжении от ПДЭС в 6-7 раз уменьшает предельное расстояние подключения к ЦЭС, а, следовательно, и существенно сокращает область оптимального использования энергоснабжения от госсети, что объясняется существенным сокращением затрат при энергоснабжении от ПДЭС с СУТ за счёт отказа от использования печного и электрического отопления помещений буровых установок;

– увеличение электрической мощности технологических потребителей – УРБ, приводит к увеличению предельного расстояния, поскольку с увеличением мощности потребителей затраты на топливо для передвижных ДЭС растут быстрее, чем затраты на электроэнергию при энергоснабжении от ЦЭС. Однако, интенсивность такого влияния значительно снижается при росте стоимости печного топлива, и тем сильнее, чем выше его стоимость, снова отдавая предпочтение энергоснабжению от ПДЭС с СУТ;

– с ростом стоимости электроэнергии предельное расстояние уменьшается по причине увеличения эксплуатационных расходов по варианту энергоснабжения от ЦЭС.

Таким образом, затраты по рассматриваемым вариантам комплексного

энергоснабжения УРБ в значительной степени определяются затратами на теплообеспечение. Снижение затрат на теплоснабжение за счет применения СУТ оказывает определяющее влияние на выбор оптимального варианта энергоснабжения - использование СУТ в составе АЭКУРБ на базе ПДЭС расширяет область эффективного применения этого варианта энергообеспечения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующему.

1. Анализ используемых систем и вариантов энергоснабжения ГРР позволил осуществить постановку востребованных вопросов, требующих решения для совершенствования АЭК УРБ, которые в большей степени влияют на эффективность ГРР в удалённых регионах освоения месторождений твердых полезных ископаемых в условиях отрицательных среднегодовых температур.

2. Исследование энергетических параметров технологических потребителей и комплексных энергоисточников дало возможность на основе научного подхода разработать адаптированные, с учётом особенностей производства ГРР, методы комплексного поддержания электрических и тепловых нагрузок УРБ, оценить возможность их достаточной компенсации за счёт использования СУТ, в основу работы которых положены впервые полученные математические зависимости величин утилизируемых тепловых потоков от теплового режима и конструктивных особенностей дизель-агрегата АЭК УРБ.

3. Разработана схема модернизированной СУТ для работы в составе индивидуальных АЭК УРБ и алгоритмы её функционирования применительно к независимому обеспечению рабочего температурного режима дизель-агрегата энергетического комплекса и теплового режима рабочих мест буровиков в условиях переменных технологических нагрузок буровой установки при проведении ГРР, что позволило добиться максимальной производительности комплекса.

4. Разработана методика и проведены опытно-экспериментальные исследования влияния технологических параметров энергетического комплекса и теплоутилизационной системы на утилизируемый тепловой поток, обеспечивающий тепловой режим помещения буровой, на основе полученных экспериментальных данных разработана математическая модель СУТ передвижных ДЭС, позволяющая не только проектировать СУТ для различного типа энергетических комплексов, но также проводить проверочный расчет на предмет оптимизации рабочих параметров эксплуатируемых СУТ.

5. Определены направления дальнейшего усовершенствования энергетических комплексов УРБ на основе применения САР процессами охлаждения силового агрегата АЭК, утилизации его теплоты, обогрева рабочих мест буровой бригады и подогрева технологического раствора, что позволит добиться высокой эффективности и безопасности производства работ.

6. Проведен оценочный расчет для определения величины зависимости приведённых затрат от технико-экономических факторов при использовании СУТ в составе

индивидуальных АЭК УРБ для различных условий и характеров ведения ГРР по критериям минимума затрат, а также величины предельного расстояния подключения с централизованным энергосетям, что наглядно продемонстрировало очевидное преимущество использования предложенных модернизированных энергосистем с СУТ по сравнению с прочими вариантами.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Косьянов В.А., Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Головин С.В. Повышение эффективности комплексного энергообеспечения децентрализованных геолого-разведочных объектов в условиях Заполярья и Крайнего Севера // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, № 4'2014, стр. 81-85.

2. Меркулов М.В., Головин С.В., Черезов Г.В. Проблемы и варианты решения повышения эффективности автономного комплексного энергообеспечения геолого-разведочных объектов при работах в условиях Заполярья и Крайнего Севера. XII Международная конференция «Новые идеи в науках о земле», Доклады конференции, Москва, 2015, стр.77-78.

3. Головин С.В. Модернизация автономного энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения – направления и варианты оптимизационных решений // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, № 5'2015, стр. 88-92.

4. Косьянов В.А., Черезов Г.В., Головин С.В. Выбор оптимального варианта комплексного энергоснабжения буровых установок разведочного бурения на основе технико-экономического моделирования // Разведка и охрана недр, № 2’2016, стр.22.

5. Черезов Г.В., Головин С.В. Основные направления моделирования систем утилизации теплоты в составе комплексных энергоисточников на геолого-разведочных работах. Научные ведомости Белгородского государственного университета, №11’2016, Выпуск 35.