

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ)

На правах рукописи

Головин Сергей Владимирович

Повышение эффективности разведочного бурения путем оптимизации  
теплоутилизационных систем автономных энергетических комплексов

Шифр и наименование специальности

25.00.14 Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Меркулов Михаил Васильевич

Москва – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ.....	14
1.1 Обзор литературных источников.....	14
1.2 Анализ энергопотребления децентрализованных технологических объектов геолого-разведочных работ.....	17
1.3 Расчет и обоснование конструктивных параметров теплоэнергетического комплекса.....	20
1.4 Особенности энергоснабжения производственных потребителей децентрализованных геолого-разведочных работ.....	23
1.5 Постановка задач исследований при комплексном подходе к решению вопросов энергоснабжения с применением систем утилизации теплоты дизель-агрегатов автономных энергетических комплексов установок разведочного бурения.....	27
Выводы.....	29
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК.....	31
2.1 Особенности теплоэнергетических комплексов установок колонкового бурения.....	31
2.2 Обоснование теплотехнических параметров дизель-генератора передвижных ДЭС.....	45
2.3 Расчет и обоснование конструктивных параметров теплоэнергетического комплекса.....	50
2.4. Разработка усовершенствованной конструкции теплоэнергетического комплекса для буровых установок колонкового бурения.....	56

Выводы.....	75
ГЛАВА 3. ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПЕРЕДВИЖНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	78
3.1 Цели, задачи и планирование экспериментальных исследований..	78
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	86
3.3 Результаты экспериментальных исследований.....	96
Выводы.....	104
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН.....	106
4.1 Выбор и обоснование параметров, входящих в модели.....	106
4.2 Разработка уравнения регрессии по опытным данным.....	113
4.3 Оценка качества уравнения регрессии.....	118
Выводы.....	121
ГЛАВА 5. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ БУРОВЫХ УСТАНОВОК РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ.....	123
5.1 Основные виды систем энергообеспечения буровых установок разведочного бурения при бурении геолого-разведочных скважин.....	123
5.2 Типовые варианты энергообеспечения буровых установок разведочного бурения при проведении геолого-разведочных работ на твердые полезные ископаемые.....	127
5.3 Теоретические основы технико-экономического моделирования вариантов энергоснабжения буровых установок разведочного бурения при бурении геолого-разведочных скважин.....	131
5.4 Структура затрат по базовым вариантам комплексного энергоснабжения буровых установок разведочного бурения.....	135
5.4.1 Энергоснабжение от индивидуальных автономных передвижных комплексных энергоисточников на основе дизельных	

электростанций с печным и/или электрообогревом, или применением теплоутилизационных установок.....	136
5.4.2 Энергоснабжение от полустационарных ДЭС с печным и/или электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения.....	138
5.4.3 Энергоснабжение от стационарной ДЭС с трансформацией электроэнергии с печным и/или электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения.....	139
5.4.4 Энергоснабжение от ЦЭС с электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения.....	141
5.5 Выбор оптимального варианта комплексного энергоснабжения буровых установок разведочного бурения на основе технико-экономического моделирования.....	142
Выводы.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	149
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
Приложения.....	168

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Общая характеристика работы**

#### **Актуальность проблемы**

В целях реализации Основ государственной политики в области использования минерального сырья и недропользования, утвержденных распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2003 года № 494-р (Собрание законодательства Российской Федерации, 2003, № 17, ст. 1637), и протокольного решения Правительства Российской Федерации от 11 ноября 2004 года № 43 по рассмотрению проекта долгосрочной государственной программы изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы России на основе баланса потребления и воспроизводства минерального сырья, 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 [171].

Главные задачи Программы – укрепить и расширить сырьевые базы за счет выявления новых перспективных районов, новых сырьевых баз с целью снижения импортной зависимости ряда ключевых отраслей промышленности и экономики России [171].

Среди ожидаемых конечных результатов реализации Программы – воспроизводство минерально-сырьевой базы, обеспечивающее компенсацию погашения запасов их приростом в соответствии с потребностями развития добывающих мощностей и базовых отраслей экономики – топливно-энергетического комплекса, атомной промышленности, черной и цветной металлургии, химической промышленности до 2020 года; выявление новых минерально-сырьевых баз, в том числе и для создания минерально-сырьевого фонда будущих поколений граждан Российской Федерации.

Реализация мероприятий, предусмотренных Программой, создает необходимые предпосылки для дальнейшего развития инфраструктуры России, укрепления национального присутствия в отдаленных регионах и защиты отечественных геополитических интересов.

При этом увеличение объемов геолого-разведочных работ связано с активным освоением удалённых от инфраструктуры труднодоступных регионов в условиях отрицательных среднегодовых температур [43, 71, 86, 90]. Это требует доставки значительного количества топлива к месту проведения работ, что повышает его стоимость [6, 8, 50, 53, 88, 140, 152] и, следовательно, стоимость проведения геолого-разведочных работ в целом. В таких технически сложных и климатически неблагоприятных условиях проведения работ задача энергообеспечения геолого-разведочных объектов приобретает первостепенное значение.

Основным способом разведки месторождений полезных ископаемых является бурение геолого-разведочных скважин [22, 65, 67, 140, 157, 158]. При этом процесс бурения связан не только с потреблением электроэнергии, но и со значительным потреблением теплоты. Так, в общем объеме затрат на геолого-разведочные работы доля затрат на комплексное энергоснабжение – электроснабжение и теплоснабжение – может превышать 20% [61, 82, 109].

В силу вышесказанного, вопросы использования энергосберегающих технологий в интересах комплексного энергообеспечения геолого-разведочного бурения приобретают большое значение, от оптимизации их решения практически напрямую зависит эффективность бурения геолого-разведочных скважин [2, 82, 88] и, как следствие, – всего комплекса геолого-разведочных работ.

Кроме того, условия труда буровых бригад при бурении геологоразведочных скважин, регламентированные СанПиН [162] и ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [45], зачастую не соответствуют требованиям в силу сложности и трудоемкости процесса поддержания комфортного микроклимата помещения

буровой установки, что приводит к снижению эффективности труда буровиков и повышению травматизма на производстве [27, 47, 139].

В современных экономических условиях, когда санкции иностранных государств непосредственно сказываются на работе геолого-разведочной отрасли, тема импортозамещения в геологоразведке становится одной из наиболее актуальных. «Запланированная к реализации Правительством РФ программа импортозамещения – важный шаг, который позволит создать отечественные технические решения, чтобы в среднесрочной перспективе перейти на использование российского оборудования в геологической отрасли, обеспечив безопасность для этого важнейшего для национального благосостояния сегмента экономики, – отметил генеральный директор АО «Росгеология» Роман Панов в своём докладе на расширенном заседании по вопросам импортозамещения 3 декабря 2014 года в Санкт-Петербурге с производителями оборудования для геологоразведки [150] – Это возможность перебороть сложившуюся зависимость отечественных геологоразведочных компаний от поставок оборудования, технологий и программного обеспечения импортного производства».

Из доклада главного геолога АО «Росгеология» Алексея Соловьёва на IX Международной конференции «Нефтегазовый сервис России»: «Основные задачи Росгеологии в рамках реализации программы импортозамещения в геологоразведке – это, в первую очередь, диверсификация рынка поставок оборудования, адаптация отечественного оборудования под отраслевой заказ и формирование соответствующих отраслевых стандартов. Такой комплекс мер помог бы существенно снизить зависимость отечественных геологоразведочных компаний от поставок оборудования, технологий и программного обеспечения импортного производства».

Актуальность импортозамещающих решений также predetermined состоянием парка буровых установок разведочного бурения, который представлен, в основном, отечественной техникой со значительным сроком амортизации, требующей модернизации по целому ряду параметров или

замены на современную, изготовленную 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 и с использованием современной материальной базы. Постоянно изменяющиеся экономические условия требуют пересмотра старых, создания и развития новых научных принципов, на базе которых стали бы возможными разработка, испытание и внедрение сбалансированных систем комплексного энергоснабжения геолого-разведочных работ нового технического уровня. Поэтому, поставленные в данной работе задачи являются актуальными, имеющими важное хозяйственное значение, решение которых способствует укреплению минерально-сырьевой безопасности страны.

Работа выполнена на основе теоретических и опытно-экспериментальных исследований, проведенных автором с 2013 по 2015 г.г. и базируется на теоретических и практических исследованиях отечественных специалистов, а также разработках, выполненных автором лично.

**Цель работы** – повышение эффективности бурения геолого-разведочных скважин за счет оптимизации комплексного энергоснабжения технологических потребителей буровых работ при совместном решении задач электро- и теплоснабжения на основе совершенствования систем утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций и создания предпосылок для их автоматизации.

**Идея работы** – оптимизация комплексного энергоснабжения буровых работ на основе использования математической модели системы утилизации

теплоты передвижных ДЭС и применения разработанной с помощью этой модели усовершенствованной теплоутилизационной установки автономного энергетического комплекса установки разведочного бурения.

### **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 автономных энергетических комплексов при бурении геолого-разведочных скважин;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований по теплообеспечению буровых установок разведочного бурения за счет утилизации теплоты дизельных электростанций;
- определение оптимальных режимов работы установок утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций для повышения эффективности энергетических комплексов установок разведочного бурения;
- разработка модели теплоутилизационной системы и прогнозирование параметров теплоэнергетических установок для различных режимов работы при комплексном энергообеспечении установок разведочного бурения;
- исследование технико-экономических моделей систем комплексного автономного энергообеспечения геолого-разведочных работ и выбор на этой основе оптимального варианта энергоснабжения;
- исследование влияния технико-экономических параметров на выбор оптимального варианта энергоснабжения.

### **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 дизельных электростанций;

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

- исследования на основе моделирования параметров теплоутилизационных систем и оптимизация режимов работы теплоэнергетических установок;

- технико-экономическое моделирование систем автономного энергоснабжения буровых работ и исследования их эффективности.

Экспериментальные исследования проводились на действующей экспериментальной теплоутилизационной установке, изготовленной для комплексного энергоснабжения буровой установки колонкового бурения 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 буровой установки разведочного бурения;

- выявлены основные зависимости утилизованного теплового потока, поступающего в обогреваемое помещение буровой установки, от конструктивных параметров дизель-агрегата энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения;

- выявлены основные причины и общие закономерности изменения

величин тепловых потоков в системе утилизации теплоты в зависимости от технологических режимов работы буровой установки разведочного бурения, 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 теплоутилизационной установки, позволяющая прогнозировать оптимальные теплотехнические параметры энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения;

– 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 автономного энергетического комплекса буровой установки разведочного бурения;

– на основе зависимостей величины приведенных затрат от технико-экономических факторов, влияющих на выбор оптимального варианта энергоснабжения геолого-разведочных объектов, определены размеры текущих затрат для сравниваемых вариантов энергоснабжения, с целью обоснования экономической эффективности применения установок утилизации теплоты в составе энергетического комплекса буровых установок разведочного бурения.

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

1. Разработана модернизированная система утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций для комплексного

энергообеспечения установок колонкового бурения, исключая определяющее влияние режимов работы буровой установки и нагрузок ДЭС на температурный режим помещения буровой.

2. Разработана и практически проверена математическая модель теплоутилизационной установки, позволяющая проводить расчет её параметров для использования в составе оптимизированного комплексного энергоисточника передвижных буровых установок на стадии проектирования, а также проверку используемых теплоутилизационных систем с целью оптимизации их теплотехнических параметров.

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

4. Разработана методика экономической оценки и выбора оптимального варианта энергоснабжения.

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

Теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований в области утилизации теплоты используются при чтении лекций и курсовом проектировании по дисциплине «Теплоснабжение геолого-разведочных работ».

**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» Десятой 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 университета по дисциплине «Теплоснабжение геолого-разведочных работ».

### **Публикации**

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 5 работах, в том числе в 4 работах в перечне научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

# ГЛАВА I. АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

## 1.1 Обзор литературных источников

Во второй половине XX века под руководством профессора Е.А. Козловского исследования в области оптимизации разведочного бурения сформировались в новое научное направление, целью проводившихся исследований стало повышение экономической эффективности геолого-разведочных работ [65-67]. Проводившиеся научно-исследовательские работы в области разведочного бурения, строившиеся на основе математического моделирования, а также системного и проблемного анализа, требовали качественного математического обоснования, свой весомый вклад в которое внёс профессор Башкатова Д.Н., разработавший и адаптировавший математические методы оптимизации применительно к условиям разведочного бурения [22].

Следует отметить, что оптимизация разведочного бурения неразрывно связана с автоматизацией этого процесса и внедрением автоматизированных систем управления и регулирования [68, 148], что невозможно без электрификации геолого-разведочных работ. В этих условиях сформировалась задача разработки современных эффективных систем электроснабжения, тем более, что буровые установки, с учетом специфики разведочного бурения, представляют из себя децентрализованные автономные объекты с собственной системой комплексного энергообеспечения.

Исследования в области электроснабжения геолого-разведочных работ проводились Алексеевым В.В, Лимитовским А.М. и многими другими [2, 6, 7, 20, 33, 72, 85, 88, 146, 147, 169]. В их работах впервые вводится понятие электроснабжения, включающее не только электроснабжение, но и

теплоснабжение, тем самым проявляющее предпосылки системного подхода к вопросам эффективности электроснабжения. Система энергоснабжения в её взаимной связи с технологией бурения рассматривается как единое целое, учитывающее специфические особенности ведения геолого-разведочных работ, предъявляющие свои требования к вопросам электро- и теплоснабжения геолого-разведочных объектов. Проводится ряд экспериментальных и опытно-производственных исследований в области определения нагрузок и оптимальных параметров систем электроснабжения геолого-разведочных объектов для создания предпосылок повышения эффективности комплексных энергоисточников. В этих исследованиях разрабатываются методики выбора оптимального варианта нормирования расходов топливно-энергетических ресурсов, рассматриваются вопросы использования возобновляемых и нетрадиционных энергоисточников на объектах геолого-разведочных работ [2, 33-35, 64, 69, 79, 83, 132, 156].

Так, исследования тепловых нагрузок буровых установок напрямую связаны, в основном, с обеспечением нормативно заданного теплового режима зданий буровых [26, 27]. Для установок колонкового бурения исследования теплового режима проводились Денисовым В.Н., Богинским П.Я., Муравейником В.И., Курасом Д.М., Тимофеевым В.Н. и другими авторами [48, 49, 107, 109]. В их работах детально рассматривается температурный режим здания в динамике его зависимости от целого ряда влияющих факторов, возможность обеспечения санитарно-гигиенических требований [59, 62] на стадии проектирования зданий буровых установок с использованием традиционных энергоисточников, исследуются вопросы теплопотерь через ограждающие конструкции и при инфильтрации холодного воздуха через технологические проёмы.

Повышение эффективности геолого-разведочного бурения возможно по нескольким, наиболее перспективным на сегодняшний день, направлениям [84, 87, 99, 121]. Одними из направлений являются использование возобновляемых и нетрадиционных энергоисточников. В этой области

известны работы Брюховецкого О.С., Лимитовского А.М., Косьянова В.А. и других авторов [34, 35, 132]. Однако, возможность использования такого рода энергоисточников на геолого-разведочных работах требует дополнительных исследований и практических испытаний.

Пожалуй, основным и актуальным направлением является использование вторичных энергоресурсов. Еще в 30-х годах XX века поднимался вопрос полезного использования – утилизации – теплоты дизель-агрегатов в составе дизельных электростанций [39]. Теплоутилизационные установки нашли широкое применение в промышленности [37, 52, 167] и особенно в судовых энергетических установках [3, 11, 18]. Исследованиями в этом направлении занимались Агафонов А.Н., Исаков Ю.Н., Кочинев Ю.Ю., Ливенцев Ф.Л., Сайданов В.О., Селиверстов В.М., Харитонов Б.А. и другие [155]. Была предпринята попытка разработки системы утилизации теплоты двигателей внутреннего сгорания для буровых установок разведочного бурения на нефть и газ [111], исследования в этой области проводились вплоть до 90-х годов XX века в Ворошиловградском отделении СПКТБ НПО «Геотехника».

Современные направления научных исследований в энергетике связаны с вопросами оптимизации элементов систем электро- и теплоснабжения [23, 131], управления и режимов работы крупных энергосистем и применением нетрадиционных энергоисточников [69]. В последние годы наметилась тенденция оптимизация параметров электро- и теплогенераторов в автономных энергосистемах и системах небольших населенных пунктов [2, 167]. Опубликован ряд работ в различных отраслях промышленности, в которых проблемы электро- и теплоснабжения рассматриваются комплексно [6, 70, 119].

Анализ литературных источников показал, что вопросам совершенствования автономных энергосистем геолого-разведочных работ уделяется незаслуженно мало внимания. Источником информации в этом вопросе может служить анализ результатов работы энергетического

оборудования, полученных на основе обследования производственных геолого-разведочных предприятий, работающих в условиях Крайнего Севера и Заполярья.

## **1.2 Анализ энергопотребления децентрализованных технологических объектов геолого-разведочных работ**

Тенденция экономического роста и укрепления геополитических позиций Российской Федерации в значительной степени связаны с развитием минерально-сырьевой базы. Увеличиваются потоки инвестиций, направляемых на геолого-разведочные работы. В этих условиях повышаются требования к эффективности проведению работ, критериями которой рассматриваются качество, стоимость и сроки выполнения работ. При этом, следует отметить, что значительная доля затрат приходится на энергообеспечение разведочного бурения. Исследования, проводимые с 1980 года по настоящее время, позволили обобщить опыт работы в этой области, наметить тенденции и перспективные направления развития [90, 108, 109].

Аналізу предшествовал сбор данных по следующим направлениям:

- характеристика источников теплоты;
- системы теплоснабжения;
- особенности потребителей теплоты на геолого-разведочных работах.

Основными направлениями использования теплоты при проведении децентрализованных геологоразведочных работ являются отопление и горячее водоснабжение передвижных буровых установок, а также технологическое использование теплоты – подогрев бурового раствора.

Источники теплоты в системе теплоснабжения отличаются разнообразием и мощностью – при теплоснабжении передвижных буровых установок на твердые полезные ископаемые широко применяются печи и теплоэлектронагреватели (ТЭН) различного типа. Расход теплоты на технологические нужды связан с приготовлением и подогревом промывочных

растворов.

Динамика теплового баланса свидетельствует об увеличении как выработки, так и потребления теплоты при ведении разведочного бурения. Это, в основном, связано с проведением работ в низкотемпературных климатических условиях. Доля производственного потребления составляет около  $1/3$  от общего количества вырабатываемой теплоты, что составляет значительную часть теплового баланса.

Кроме этого, в тепловом балансе не учитывалась электроэнергия, потребляемая теплоэлектронагревателями, которые широко применяются при теплоснабжении передвижных объектов. Так, мощность ТЭН на передвижных установках колонкового бурения, определенная непосредственными замерами, составила 10-15 кВт [109, 125].

Несмотря на отмеченные недостатки, тепловой баланс позволяет с высокой степенью точности определить соотношение расхода теплоты по различным направлениям. Это может служить основой для разработки инженерных и организационных мероприятий в области экономии топливно-энергетических ресурсов и обоснования научных рекомендаций по повышению эффективности геолого-разведочных работ за счет совершенствования систем энергоснабжения.

При ведении геолого-разведочных работ потребляется электроэнергия, теплота, энергия сжатого воздуха и т.д., для производства которых используются различные виды топлива. Специфика геолого-разведочных работ – передвижной характер, удаленность и труднодоступность – объясняет тот факт, что в их топливном балансе, наряду с традиционными видами топлива – твердым и газообразным – широко применяется дорогостоящее жидкое топливо. Причем, его расход, главным образом, связан с выработкой электроэнергии и получением сжатого воздуха. При выработке теплоты собственными теплогенераторами на геолого-разведочных работах используются твердые, жидкие и газообразные виды топлива. Общий расход топлива в период наибольшего развития геолого-разведочных работ

составлял около 990 тысяч тонн условного топлива [119, 121, 127].

Основная доля топливного баланса связана с потреблением твердого топлива, из которого 89,2% приходится на местные сорта углей и 10,8% на дрова. Для геолого-разведочных работ характерно, что значительная часть потребления топлива связана с использованием дешевых местных сортов топлива, причем не всегда высокого качества. Это отражается на КПД теплогенераторов и себестоимости вырабатываемой теплоты.

Несколько меньше (36,8%) составляет доля жидкого топлива, причем удельный вес высококачественных сортов (дизельное топливо и мазуты) остается небольшим – 15% от расхода жидкого топлива.

На буровых участках колонкового бурения для отопления зданий буровых и подогрева буровых растворов чаще всего используются дрова, заготавливаемые, как правило, на месте производства работ (11,7%), реже уголь (4,1%) [146, 147, 161].

Таким образом, анализ потребления топлива показывает, что в топливном балансе преобладают местные виды топлива. Характерно использование местных видов углей, которые отличаются низкой теплотой сгорания, высокой зольностью и влажностью.

По опубликованным данным [105, 163], при сжигании сортового угля потери теплоты составляют от 5,5 до 13,5%, а с применением местных углей потери от механической неполноты сгорания будут существенно выше. Использование низкокалорийного топлива приводит к снижению КПД котлов. Обследование, проведенное сотрудниками кафедры механизации, автоматизации и энергетики горных и геолого-разведочных работ факультета техники разведки и разработки МГРИ, установило, что фактический КПД котлов, работающих на низкокалорийных углях, составлял  $0,45 \div 0,6$  при их паспортных значениях  $0,7 \div 0,8$  [136]. Это напрямую приводит к увеличению расхода топлива.

### **1.3 Системы теплоснабжения децентрализованных геолого-разведочных работ и их особенности**

Система теплоснабжения – совокупность оборудования, предназначенного для получения теплоты без её преобразования в работу, транспортировки, распределения и потребления.

Основным элементом системы теплоснабжения, определяющим её эффективность, является теплогенератор. Теплогенераторы, применяемые на геолого-разведочных работах, можно подразделить на централизованные и индивидуальные.

Буровые установки колонкового бурения имеют не самые большие тепловые нагрузки. Для их теплоснабжения применяют индивидуальные теплогенераторы (электронагреватели, печи на твердом и жидком топливе), используемые как основные и как резервные источники теплоты.

Индивидуальные источники теплоты подразделяются [115, 131]:

- по назначению: отопительные, водонагревательные, вентиляционные;
- по виду энергоносителя: на твердом, жидком, газообразном топливе и электрические;
- по виду теплоносителя: водяные, паровые, воздушные;
- по способу переноса теплоты: радиационные, конвективные, кондуктивные и смешанные;
- по конструктивному исполнению: печи, электронагреватели, отопительные панели;
- по способу движения теплоносителей: с естественным и принудительным движением.

Индивидуальные теплогенераторы являются основными источниками теплоты в системах индивидуального теплоснабжения передвижных объектов. Они широко используются на участках и базах полевых партий, при ведении буровых работ на твердые полезные ископаемые. В централизованных системах теплоснабжения такие теплогенераторы обычно

используются как резервные или пиковые.

Особенности работ по разведке твердых полезных ископаемых – низкая концентрация потребителей, разобщенность, мобильный характер работ – не позволяют применять для их теплоснабжения котлы и котельные установки, как при разведке на нефть и газ. В таких условиях геолого-разведочных работ на основе индивидуальных теплогенераторов создаются местные системы теплоснабжения, предназначенные для теплоснабжения одного или нескольких смежных помещений.

Проведенные исследования показали, что для обеспечения необходимого микроклимата помещений буровых установок в холодный период, используются металлические печи и электронагреватели. Металлические печи применяются как для отопления здания буровых, так и для подогрева промывочной жидкости в зимний период. В качестве топлива используются дрова, уголь или жидкое топливо. Мощность таких печей обычно составляет 10–40 кВт. Средний расход топлива около 5 кг/ч для дров и 3,6 кг/ч для угля [131, 164, 165].

Электронагревательные приборы используются для отопления здания буровых. Применяются приборы двух типов: спиральные радиаторы и трубчатые калориферы. Проведенные случайным образом выборочные замеры мощности электронагревателей на буровых показали, что их номинальная мощность составляет от 5 до 17 кВт [131].

Буровые установки колонкового бурения типа УКБ-4, УКБ-5 имеют мачту высотой около 15 метров, которая в северных регионах полностью обшивается фанерой или брезентом. Значительная высота верхнего уровня помещения, наличие технологических проемов и отверстия устья скважины приводят к тому, что микроклимат внутри здания буровой отличается высоким перепадом температур при использовании традиционных систем теплоснабжения. Замеры, проведенные в условиях Крайнего Севера, показали, что при печном отоплении температура в рабочей зоне здания буровой не только не соответствовала нормативам, но и изменялась по высоте

здания в несколько раз [47-49, 110].

Это объясняется рядом причин:

- практически никто не занимался проектированием местных систем отопления применительно к условиям геолого-разведочных работ;
- отсутствие единых типовых проектов зданий для буровых установок колонкового бурения, удовлетворяющих санитарно-гигиеническим требованиям и требованиям противопожарной безопасности;
- отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по параметрам микроклимата помещения передвижных буровых установок, на основе которых можно было бы разработать требования к теплогенераторам индивидуальных систем теплоснабжения;
- конструктивные особенности зданий буровых установок колонкового бурения (мачта, технологические проемы и отверстия, ограждающие конструкции) требуют специального подхода к проектированию систем теплоснабжения передвижных буровых установок.

Потоки теплоты, вырабатываемой собственными теплогенераторами передвижных установок разведочного бурения, распределяются по нескольким основным направлениям для решения задач отопления, горячего водоснабжения и технологического потребления. Суммарная величина теплоты, потребляемой по этим направлениям, составляет тепловую нагрузку потребителя.

Тепловые нагрузки на отопление должны обеспечивать заданные нормативными документами параметры микроклимата помещения буровой установки [107, 139]. Они носят сезонный характер, и их величина зависит от температуры окружающей среды и погодных условий. В районах с суровым климатом эти нагрузки могут быть и круглогодичными. Например, в районах Крайнего Севера выделяют три зоны по продолжительности отопительного периода: I зона – с отопительным периодом менее 270 дней, II зона – от 270 до 300 дней и III зона – от 300 до 365 дней в году.

Таким образом, система теплоснабжения геолого-разведочных работ

должны обеспечивать выполнение следующих условий:

- 1) комфортные параметры микроклимата в жилых и производственных помещениях;
- 2) требования технологического процесса и возможность проведения работ в районах с суровым климатом;
- 3) система теплоснабжения должна отвечать требованиям эффективности.

Теплоснабжение децентрализованных объектов геолого-разведочных работ имеет ряд особенностей, отличающих его от систем теплоснабжения предприятий других отраслей:

- 1) изменение объемов теплопотребления в связи со стадийностью проводимых поисковых и разведочных работ;
- 2) разобщенность потребителей и их удаленность от баз и промышленных источников теплоснабжения;
- 3) разнообразие по типу, мощности и характеру работ потребителей;
- 4) мобильный характер работ;
- 5) низкая эффективность применяемого теплового оборудования, не отвечающего требованиям ведения геолого-разведочных работ.

#### **1.4 Особенности энергоснабжения производственных потребителей децентрализованных геолого-разведочных работ**

Проведенные обследования систем энергоснабжения позволили провести анализ их эффективности на основе комплексного решения проблем энергоснабжения. Это позволило установить основные направления совершенствования энергоснабжения и повышения на этой основе эффективности геолого-разведочных работ.

В условиях Заполярья и Крайнего Севера выделяют два перспективных типа месторождений: коренные и россыпные, методика и техника разведки которых принципиально отличаются друг от друга.

Разведка россыпных месторождений ведется станками ударно-канатного бурения. Установленная мощность электропотребителей участка работ составляет 40-45 кВт. Источником электроэнергии является дизельная электростанция ДЭС-60р. При этом утилизация теплоты востребована в меньшей степени, чем для установок колонкового бурения.

Это связано с тем, что тепловые нагрузки установок ударно-канатного бурения существенно ниже, чем нагрузки установок колонкового бурения, так как практически отсутствует необходимость обогрева рабочих мест.

Основным потребителем теплоты при разведке на россыпи является промывочный прибор, используемый для опробования. Кроме того, для предотвращения прихватывания снаряда при бурении в многолетнемерзлых породах используется нагретая вода. Источником теплоты являются печи, встроенные в передвижные емкости с промывочной жидкостью. Расход угля в зимний период составляет около 4 тонн, в летний – 2 тонны в месяц.

Средняя электрическая мощность  $P_C = 10,78$  кВт, тепловая мощность составляет 30,6 кВт в зимний и 15 кВт в летний период.

Технические и технологические условия ударно-канатного бурения определяют выбор системы энергоснабжения. Применение самоходных установок небольшой установленной мощностью ( $P_M = 22$  кВт), подвижный характер работ, небольшая глубина скважин (15-25 м) делают практически невозможным использование централизованных систем энергоснабжения.

Удаленность участков на значительные расстояния друг от друга и сжатые сроки работ не всегда позволяют использовать центральную дизельную электростанцию. Исключается возможность получения теплоты от централизованных котельных установок. В этом случае применяется энергообеспечение от индивидуальных автономных энергоисточников небольшой мощности.

Для разведки коренных месторождений используются буровые установки колонкового бурения типа УКБ-4, УКБ-5, ЗИФ-650м. Установленная мощность электрооборудования составляет 35-60 кВт.

Энергоемкость процесса бурения детально рассмотрена в работах ряда авторов [61, 88, 131, 157-159, 161] и других.

При разведке коренных месторождений глубина скважин может достигать 500 метров, из них до 300 метров бурение осуществляется в зоне многолетнемерзлых пород. Производительность бурения в таких условиях составляет 350-450 м/ст·месяц.

Потребителями теплоты являются здание буровой установки и ёмкость с промывочной жидкостью (зумпф). Для получения теплоты применяются теплоэлектронагреватели (ТЭН) и индивидуальные воздухогрейные печи длительного горения.

В качестве топлива для отопительных печей используют уголь и дрова. Расход дров на обогрев здания буровой и зумпфа достигает в зимний период 20-25 м<sup>3</sup> в месяц на одну установку, что соответствует средней тепловой мощности  $Q_{\text{ср}} = 50-60$  кВт. Это почти в два раза превышает потребляемую электрическую мощность технологического оборудования буровой [109, 110].

При проведении разведки на флангах месторождения, а также на удаленных от базы участках производства работ, в качестве источников электроэнергии используются передвижные дизельные электростанции, теплота потребляется от индивидуальных теплогенераторов.

Принимая во внимание вышесказанное, следует отметить, что система энергоснабжения оказывает существенное влияние не только на энергетические показатели работ, но и на эффективность геолого-разведочных работ в целом.

Большую часть расходов на выработку энергии составляют стоимость приобретения топлива и стоимость его доставки к месту проведения работ.

Учитывая условия транспортировки, главным образом осуществляющейся с помощью вездеходной техники, плавсредств и воздушного транспорта, стоимость доставки 1 тонны дизельного топлива может достигать до двухсот процентов от закупочной цены [106, 117, 119]. Расходы, связанные с доставкой печного топлива, угля и дров, незначительно

меньше.

По данным предприятий [90, 134], производящих работы в заполярных регионах России, для передвижных электростанций доля издержек на топливо в общих затратах на выработку 1 кВт·ч электроэнергии достигает 80%. Таким образом, можно сделать вывод, что в указанных регионах рост себестоимости вырабатываемой электроэнергии главным образом связан с ростом затрат на топливо за счёт его транспортировки.

Важным фактором, влияющим на эффективность энергоснабжения, является низкий КПД энергоисточников. КПД дизельных электростанций в реальных условиях не превышает 30-40% и зависит от типа и условий эксплуатации [9, 14, 75, 170]. Для котельных установок в условиях геолого-разведочных работ КПД не превышает 50-70%. Это говорит о том, что значительная часть топлива расходуется не продуктивно еще на стадии выработки энергии. Следовательно, проблема рационального использования топлива и повышения КПД энергоисточников остается актуальной.

Сопоставив доли электроэнергии и теплоты в энергобалансе буровой установки разведочного бурения, становится очевидным преобладание доли теплоты. Так, для установок колонкового бурения, расход электроэнергии составил 90-125 МДж/м, а расход теплоты – 220-280 МДж на метр скважины. Очевидно, что расход теплоты, потребляемой буровой установкой, практически в 2 раза выше её электропотребления. Таким образом, можно утверждать, что выбор системы энергоснабжения оказывает непосредственное влияние на эффективность геолого-разведочных работ. Причём, оптимизация этой системы должна проводиться на основе комплексного подхода к вопросам электро- и теплоснабжения. Наряду с такими источниками теплоты, как электроэнергия и твердое топливо, при бурении скважин может быть и должно использоваться избыточное тепло дизель-агрегата. В этом случае передвижная дизельная электростанция будет выполнять функции единого автономного энергетического комплекса.

Для решения этих задач необходимо рассмотреть энергетический баланс

буровой установки, зависимость электрических и тепловых нагрузок, влияние на них технологических параметров, разработать модель универсальной установки утилизации теплоты передвижной дизельной электростанции, что позволит прогнозировать параметры теплоутилизационной системы и осуществлять проверку используемых теплоутилизационных систем на их соответствие требуемым параметрам.

Следует принимать во внимание, что процесс создания и поддержания требуемого теплового режима в помещении буровой установки требует постоянного присутствия оператора, корректирующего положение органов регулировки параметров отопительной системы. Этот трудоёмкий процесс возлагается на буровую бригаду, существенно снижая тем самым эффективность основных работ – разведочного бурения. В этой связи необходимо разработать основные направления автоматической регулировки системы утилизации теплоты передвижных ДЭС, определить главные параметры и пределы регулировки, их связь с теплотехническими параметрами дизель-агрегата.

### **1.5 Постановка задач исследований при комплексном подходе к решению вопросов энергоснабжения с применением систем утилизации теплоты дизель-агрегатов автономных энергетических комплексов установок разведочного бурения**

Специфические особенности ведения геолого-разведочных работ, обусловленные удаленностью от промышленных центров и их энергосистем, подвижный характер и низкая концентрация производственных потребителей, не всегда позволяет применить опыт энергообеспечения других отраслей промышленности. В этих условиях возникает необходимость в разработке научно-обоснованного подхода к созданию оптимальных систем энергоснабжения, обеспечивающих эффективное ведение геолого-разведочных работ на основе комплексного решения вопросов

энергоснабжения.

Поставленная цель может быть достигнута решением следующих задач.

1. Анализ состояния теплоснабжения геолого-разведочных работ и оценка факторов, влияющих на его эффективность.

2. Обоснование энергетических параметров технологических потребителей применительно к условиям децентрализованных геолого-разведочных работ с учетом их особенностей.

3. Разработка модели установки утилизации теплоты передвижной дизельной электростанции, позволяющей прогнозировать параметры теплоутилизационной системы на стадии проектирования, а также проводить проверку используемых теплоутилизационных систем на их соответствие требуемым параметрам с выдачей рекомендаций по оптимизации систем утилизации теплоты.

4. Проведение исследований по совершенствованию систем утилизации теплоты передвижных ДЭС и повышение их эффективности за счет совершенствования конструкции и оптимизации рабочих параметров.

5. Оптимизация режимов работы энергоисточников при переменных нагрузках дизель-агрегата и различных климатических факторах, обеспечивающих заданный температурный режим помещения буровой установки, и определение их параметров, обеспечивающих максимальную эффективность энергоисточника в целом.

6. Разработка усовершенствованной конструкции автономного теплоэнергетического комплекса для буровых установок колонкового бурения.

7. Опытное-экспериментальное исследование систем утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций.

8. Исследование полученных моделей и оптимизация систем утилизации теплоты на основе комплексного подхода к вопросам электро- и теплоснабжения.

9. Разработка основных направлений автоматической регулировки системы утилизации теплоты передвижных ДЭС, определение главных параметров и пределов регулировки, их связи с теплотехническими параметрами дизель-агрегата.

Анализ систем теплоснабжения позволит выявить основные направления их совершенствования, в большей степени влияющие на эффективность работ. Совершенствование энергоисточников и оптимизация режимов их работы в составе единых энергетических комплексов позволит наметить пути экономии топливно-энергетических ресурсов, улучшить условия труда, повысив тем самым эффективность геолого-разведочного бурения.

### **Основные выводы по Главе I**

1. Проведенное обследование систем теплоснабжения позволило составить энергетический баланс геолого-разведочных работ, оценить величину выработки теплоты и основных направлений ее использования. Полученные результаты могут являться основой для инженерных решений и организационных мероприятий в области экономии топливно-энергетических ресурсов и обоснованием научных рекомендаций по повышению эффективности геолого-разведочных работ.

2. Анализ тепловых нагрузок позволил выявить основные особенности теплоснабжения передвижных объектов на геолого-разведочных работах, что дает возможность учитывать их при проектировании и эксплуатации систем теплоснабжения.

3. Несмотря на значительные мощности индивидуальных систем теплоснабжения, они не обеспечивают требуемого теплового режима буровых зданий, что требует разработки математической модели системы утилизации теплоты передвижных ДЭС, определяющей оптимальные параметры теплоутилизационной системы.

4. Учитывая трудоёмкость процесса создания и поддержания требуемого теплового режима в помещении буровой установки, необходимо разработать основные направления автоматической регулировки системы утилизации теплоты передвижных ДЭС и освободить буровую бригаду от дополнительной работы, тем самым повысить производительность труда буровиков.

5. Проведенный анализ позволил утверждать, что в энергетическом балансе геолого-разведочных работ преобладает теплота, причем затраты на теплоснабжение зависят от технологических (нагрузка бурового станка, число оборотов и т.п.) и внешних климатических (температура воздуха, ветер, осадки и т.п.) факторов, которые необходимо прогнозировать и учитывать при формировании оптимального микроклимата буровой установки.

6. Выявленные проблемы могут быть решены за счет совершенствования систем утилизации теплоты при комплексном решении вопросов электро- и теплоснабжения посредством полезного использования вторичных энергоресурсов – утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций.

7. При прогнозировании оптимальных параметров теплоутилизационной установки необходимо предварительно оценить экономическую эффективность предлагаемых научно-технических решений.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

### **2.1. Особенности теплоэнергетических комплексов установок колонкового бурения**

Специфика проведения части геолого-разведочных работ, таких как разведочное бурение, заключается в их мобильном характере производства, что влечёт за собой децентрализацию геолого-разведочных объектов, их «отстыковку» от стационарных комплексов энергообеспечения и высокую территориальную разобщённость отдельных передвижных буровых установок, осложнённую отсутствием за пределами освоенных территорий какой-либо инфраструктуры [88].

Эти факторы, безусловно, создают сложности в комплексном энергообеспечении энергопотребителей, удалённых от централизованных сетей электро- и теплоснабжения, и предполагают использование передвижных дизельных электростанций (ДЭС) в качестве источников электроэнергии и автономных систем отопления, как правило, электрических, питающихся от этих же ДЭС, или печей на угле, торфе, мазуте или дровах [6].

При этом, использование электрических печей (как правило – теплоэлектронагревателей, ТЭН) для отопления не рационально, поскольку они создают нежелательную дополнительную нагрузку на ДЭС, поэтому в качестве источников тепла в подавляющем ряде случаев используются металлические печи.

Расчёт буровой установки колонкового бурения УКБ-4 [48] показал, что для поддержания комфортного температурного режима в здании буровой установки необходимо до 250 кг условного топлива в сутки. На рисунке 2.1 приведена зависимость расхода разного вида топлива в интересах теплообеспечения буровой от температуры наружного воздуха.

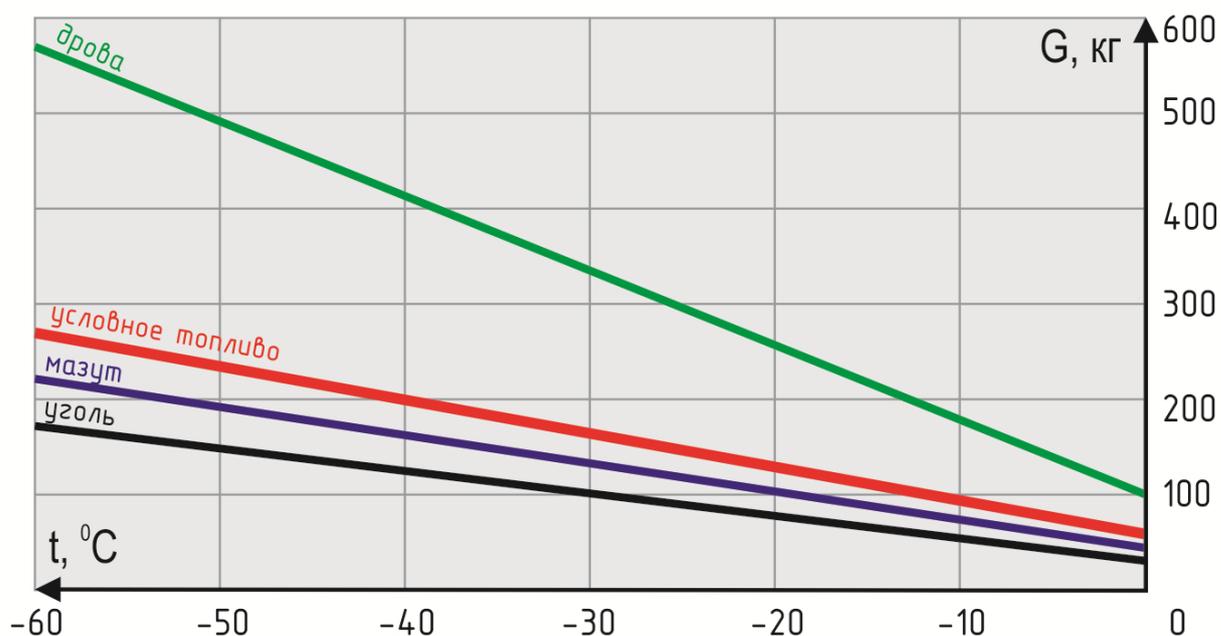


Рисунок 2.1 – Зависимость расхода печного топлива для теплообеспечения бурового здания УКБ-4 при номинальной нагрузке бурового станка от температуры наружного воздуха.

Однако, использование мазута, угля, торфа или дров для получения тепла в труднодоступных районах с учетом доставки топлива до места производства работ, увеличивающей стоимость энергоносителей в среднем в два раза [6], и долю затрат, связанных с энергообеспечением геологоразведочных работ, до 50% от общего финансирования [78], обходится очень дорого, что влечёт за собой значительное удорожание такого автономного энергоснабжения по сравнению с централизованным [127]. Кроме стоимостных, печное отопление имеет ещё ряд существенных недостатков - трудоёмкость процесса отопления, загрязнение помещений и окружающей среды топливом, отходами и продуктами горения, уменьшение полезного объёма помещений, высокая пожароопасность и повышенный риск отравления персонала угарным газом при нарушении правил эксплуатации или аварийных ситуациях.

Таким образом, отрыв от инфраструктуры накладывает на автономную систему энергоснабжения в целом повышенные требования к надёжности,

безопасности и ремонтпригодности.

По данным РАО «ЕЭС России» [150] энергетически изолированные от единой энергосистемы районы Крайнего Севера, Восточной Сибири, Дальнего Востока, Сахалина, Камчатки занимают почти 70% территории России. При этом, основная перспектива открытия и освоения новых месторождений полезных ископаемых связана именно с этими регионами.

В этих зонах перспективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых, таких как Якутия (алмазы, золото, уран, железные руды, олово, редкоземельные элементы, серебро, свинец, цинк, вольфрам), Магаданская область (медь, молибден, свинец, олово, вольфрам, железо, тантал, ниобий) и Чукотка (золото, олово, серебро, медь, вольфрам, ртуть, платина), а также районах Томской (золото, сурьма, цинк, бокситы) и Тюменской (кварцевые пески, кирпичные и керамзитовые глины, известняки, строительный камень) областей, расположенных севернее 60° Северной широты, где на флангах месторождений разведочное бурение на обширной территории производится передвижными буровыми установками, питающимися от собственных источников электроэнергии, отрицательные среднегодовые температуры предполагают значительные расходы тепловой энергии не только на обеспечение технологического цикла (подогрев промывочной жидкости), но и дополнительно на обогрев производственных помещений для обеспечения нормальных условий труда персонала.

Учитывая, что разработка системы эффективного теплоснабжения установок колонкового бурения направлена как на обеспечение жизнеобеспечения персонала, так и на поддержание температурного режима промывочной жидкости, необходимо в качестве достижимых значений принимать:

- температуру окружающего воздуха в рабочей зоне буровиков;
- температуру промывочной жидкости зумпфа.

Определение теплотерь технологических растворов приводится в [6, 61] и сводится к расчету величины теплового потока, требуемого для

поддержания заданного температурного режима промывочной жидкости, а попутно – получения технической воды (из снега и льда). При этом необходимо учитывать, что для каждого вида промывочной жидкости – техническая вода, техническая вода с добавками хлористого натрия, глинистые растворы с добавлением хлористого натрия и других реагентов, задаётся своя температура.

Температура воздуха в рабочей зоне буровиков определяет величину тепловых потерь в здании буровой установки для сохранности тепла при выполнении технологических операций и компенсации потерь теплоты, связанных с инфильтрацией холодного воздуха [107]. При расчетах принимаются во внимание такие факторы, как тип и размеры кузова-контейнера, наличие и размеры дверей, окон, технологических отверстий и проёмов для замены инструмента, тип обшивки буровой мачты, среднюю температуру окружающего воздуха, скорость холодного воздуха, поступающего через технологические отверстия и т.п. [110]

Температура в рабочей зоне здания буровой установки является одним из основных факторов, влияющих на условия труда буровой бригады, и должна соответствовать регламенту [162]: при категории работ по уровню энергозатрат Пб-III (работы с интенсивностью энергозатрат свыше 201-250 ккал/ч, связанные с постоянными передвижениями, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и выше и требующие физических усилий от умеренных до больших) температурный режим в рабочей зоне необходимо поддерживать в пределах от +16<sup>0</sup>С до +19<sup>0</sup>С в холодный период года и от +18<sup>0</sup>С до +22<sup>0</sup>С – в теплый период [28, 59, 62].

Анализ ежегодных технико-экономических показателей геолого-разведочного бурения на протяжении последних 25 лет, проведенный д.т.н. проф. Денисовым В.Н. (СПб) [49], свидетельствует о том, что экономические потери от травматизма и заболеваемости в отрасли вызваны преимущественно природно-климатическими условиями регионов производства работ. Помимо повышения уровня травматизма, роста общих и

появления случаев профессиональных заболеваний на буровых работах, также происходит значительное снижение производительности труда обслуживающего персонала. Так, производительность труда буровой бригады при двукратном отклонении температур от пограничных норм (свыше  $+45^{\circ}\text{C}$  и ниже  $+8^{\circ}\text{C}$ ) составляет 30% от производительности в нормальных условиях, при этом изменение температуры воздуха относительно допустимых значений всего на несколько градусов вызывает увеличение частоты травмирования на 40% [49].

В этой связи возникает настоятельная необходимость совершенствования существующих и разработки принципиально новых методов и технических решений, позволяющих улучшить производственный микроклимат для буровых бригад, работающих, прежде всего, в регионах с экстремальными климатическими условиями

Совершенствованию способов нормализации температурного режима зданий буровых установок колонкового бурения посвящены работы П.Я. Богинского, В.И. Деньгуба, Ю.Ю. Кочинева, Д.М. Кураса, А.М. Лимитовского, В.И. Лузганова, М.В. Меркулова, А.А. Немченко и др. Большой вклад в изучение как технических, так и санитарно-гигиенических аспектов теплового режима зданий буровых установок внесли Л.Г. Бошнякович, О.Е. Гаврилова, И.А. Казанцев, А.А. Немченко и др. Анализ публикаций показал, что по настоящее время рациональные пути и эффективные способы нормализации теплового режима помещений буровых установок не разработаны.

Микроклимат буровых зданий отличается высокой динамичностью всех его параметров, а термодинамические процессы, влияющие на микроклимат, характеризуются нестабильностью во времени и в пространстве, что в напрямую связано с особенностью технологических операций при ведении буровых работ. Эти неоднократно подтверждено многочисленными замерами в зданиях буровых установок, полученными в зимний период [116, 139].

В условиях Севера применяются сборно-щитовые и каркасные здания

лёгкого типа. В ограждающих конструкциях таких зданий имеются технологические проёмы площадью до 0,1 м, через которые проникает холодный воздух со скоростью 1,5-2,5 м/с. Низкая тепловая инерционность таких зданий обуславливает жёсткую зависимость микроклимата буровой от условий окружающей среды – температуры, ветра, осадков и т.п.

Ещё одной особенностью теплоснабжения буровых является неравномерное распределение температур внутри здания. Замеры температурного поля здания буровой [116], показали, что температура пола в рабочей зоне помощника бурильщика не превышает 5°C при температуре окружающей среды  $-5^{\circ}\text{C} \div -7^{\circ}\text{C}$ , в то время как у потолка достигает значения +14°C. Такой перепад температур вызывает неблагоприятные конвективные потоки воздуха внутри помещения буровой, что оказывает влияние на теплопередачу ограждающих конструкций.

Таким образом, теплообмен системы «здание буровой установки ↔ окружающая среда» определяется процессом теплоотдачи. Конвективные потоки воздуха внутри здания увеличивают влияние теплопередачи в процессе теплообмена. Малая массивность сооружений обуславливает их низкую тепловую инерционность, что усиливает влияние факторов окружающей среды на величину теплопотерь. Анализ теплопотерь здания буровой [107] показал, что в теплопотери за счёт инфильтрации холодного воздуха составляют 16%, и до 84% – теплопотери через ограждающие конструкции. При неблагоприятных климатических условиях (низкая температура окружающей среды и сильный ветер) теплопотери бурового здания УКБ-4 достигают 70 кВт.

При этом, тепловой расчёт бурового здания УКБ-4 [47] показал, что при температуре окружающей среды  $-60^{\circ}\text{C}$  для поддержания внутри здания комфортной рабочей температуры необходимо около 60 кВт тепла.

При этом, как показывает практика, потребление тепловой энергии может почти в два раза превышать потребление электроэнергии для нужд всего цикла производства работ [110].

С учётом вышесказанного, чрезвычайно важна задача оптимизации системы комплексного энергоснабжения децентрализованных геолого-разведочных объектов в части минимизации потерь энергии за счёт максимальной утилизации тепла ДЭС.

Это позволит зарезервировать и частично исключить из состава потребителей электрическую систему отопления, тем самым обеспечить существенную экономию топлива без ущерба для обеспечения буровой установки тепловой энергией в необходимом количестве. Установка утилизации теплоты (УУТ) дизельных электростанций (ДЭС) должна обеспечивать эффективную передачу теплоты от систем охлаждения и газовыхлопа обогреваемому помещению буровой установки.

С точки зрения эффективности утилизации теплоты наиболее приемлемым теплоносителем (ТН) является вода. Однако, при использовании передвижных ДЭС, применение воды в качестве вторичного теплоносителя связано с трудностями: сложность в монтаже системы отопления, возможность замерзания в зимние время года, сложности обустройства водоснабжения и т.д.

Исследования, проводимые в этой области [92, 100, 101], показали, что в условиях ведения геолого-разведочных работ, с точки зрения особенностей технологического процесса, наиболее приемлемой является схема с применением в качестве ТН воздуха.

Передвижные электростанции с УУТ впервые стала выпускать фирма «Валмет» (Valmet), разработавшая малые теплоцентрали, которые обеспечивали потребителей электроэнергией и теплотой. В качестве вторичного ТН в таких установках использовалась вода. Технические характеристики теплоцентралей приводятся в таблице 2.1. [160]

Таблица 2.1. Технические характеристики теплоцентралей

№ п/п	Модель ТЭЦ	Мощность		Расход топлива,	Общий КПД,	Масса, кг
		Электрическая,	Тепловая,			

		кВт	кВт	кг/ч	%	
1	310 В	25	32,9	5,4	83	5100
2	311 С	32	42,7	6,9	83	51
3	411 С	44	57,1	9,2	84	5200
4	411 СS	57	67,9	11,4	83	5600
5	611 С	65	80,1	13,2	84	5800
6	611 СSB	95	107	18,4	84	5900

Использование таких установок при бурении геолого-разведочных скважин затруднительно в связи с подвижным характером работ, так как при переездах на новые точки необходимо каждый раз сливать воду из системы отопления или использовать дорогостоящие антифризы. В полевых условиях в отрыве от ремонтной базы такие установки мало ремонтпригодны, кроме того, их использование не решает задач отопления зумпфа и поддержание заданных температур бурового раствора.

Использование в теплоутилизационных установках воды в качестве ТН оправдано в том случае, если ДЭС размещается в одном передвижном блоке с буровой установкой. Такая схема была разработана на кафедре механизации, автоматизации и энергетики ГиГРР МГРИ-РГГРУ под руководством профессора Лимитовского А.М. и прошло успешные испытания в условиях Дукатской ГРЭ (рисунок 2.2.)

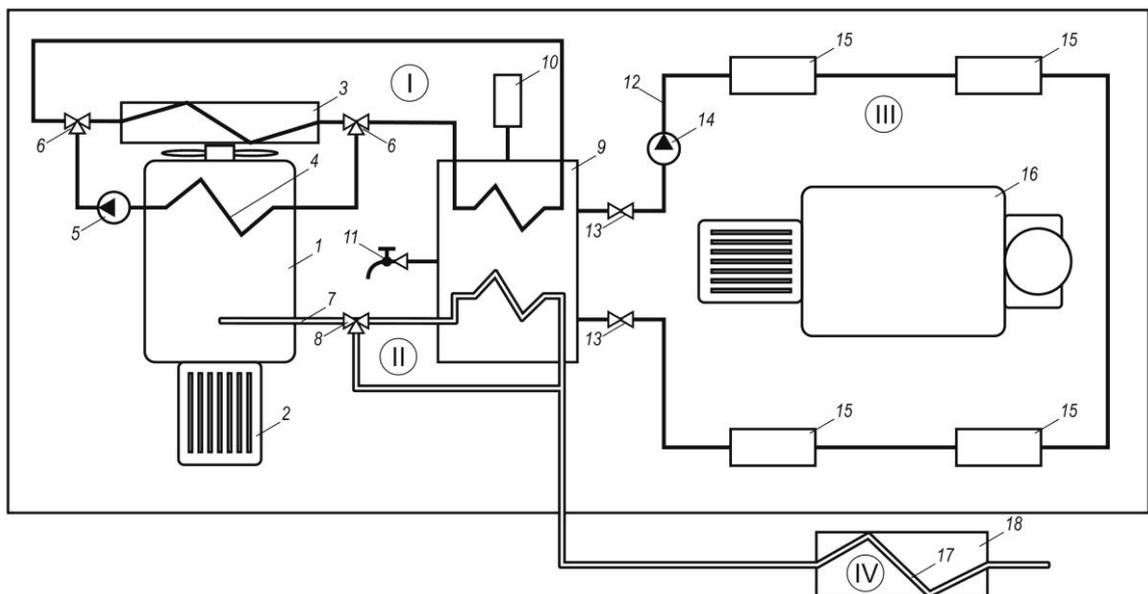


Рисунок 2.2 – Система радиаторного отопления помещения буровой при размещении ДЭС в одном блоке с буровой установкой.

1 – дизель-агрегат, 2 – электрогенератор, 3 – радиатор системы охлаждения дизель-агрегата, 4 – система охлаждения дизель-агрегата; 5 – насос системы охлаждения дизель-агрегата; 6 – трехходовой кран системы охлаждения дизель-агрегата; 7 – газовый коллектор дизель-агрегата; 8 – трехходовой кран газового коллектора; 9 – аккумулирующая ёмкость; 10 – компенсатор расширения; 11 – сливной вентиль; 12 – система отопления помещения буровой установки; 13 – вентили системы отопления; 14 – насос системы отопления; 15 – радиаторы системы отопления; 16 – буровой станок; 17 – теплообменник зумпфа; 18 – зумпф.

В системе выделяют четыре контура, работа которых взаимосвязана:

I контур – контур системы охлаждения дизель-агрегата;

II контур – контур отбора тепла выхлопных газов;

III контур – контур системы отопления буровой;

IV контур – контур подогрева зумпфа с промывочной жидкостью.

Принцип работы системы заключается в следующем.

После прогрева дизель-агрегата 1, в I контуре вода из системы охлаждения 4 через трехходовые краны 6 насосом 5 подается в водо-водяной теплообменник, установленный в аккумуляционной ёмкости 9. В водо-водяном теплообменнике нагретая вода отдает свое тепло и остывшая возвращается в систему охлаждения 4 дизель-агрегата 1.

Во II контуре от газового коллектора 7 выхлопные газы через трёхходовой кран 8 отдают теплоту воде системы отопления через газ-водяной теплообменник, расположенный в ёмкости 9. Охлажденные выхлопные газы поступают в IV контур в теплообменник 17 зумпфа 18, где подогревают остаточным теплом промывочную жидкость.

Таким образом, все излишки теплоты, отводимые водой системы охлаждения и выхлопными газами дизель-агрегата, аккумулируются в

ёмкости 9.

Из аккумулирующей ёмкости 9 горячая вода через вентили системы отопления 13 насосом 14 подается в радиаторы 15 системы отопления помещения буровой установки 12 III контура. Температура в системе отопления регулируется вентилями 9, пополнение объема воды и удаление воздуха из системы осуществляется через компенсатор расширения 10. Также, нагретая вода из аккумуляционной ёмкости 9 может быть использована для технических нужд, отбор воды осуществляется через сливной вентиль 11.

В том случае, если теплота для отопления помещения буровой установки не требуется, трехходовые краны 5 подают воду системы охлаждения 4 в штатный радиатор 3. Трехходовой кран 8 направляет поток выхлопных газов непосредственно в теплообменник 17 зумпфа 18, минуя газо-водяной теплообменник аккумулирующей ёмкости 9.

Преимущества такого рода системы заключается в том, что теплоснабжение помещения буровой осуществляется по независимой схеме посредством циркуляции нагретой воды в отдельном III контуре, вода системы охлаждения дизель-агрегата не поступает в штатный радиатор дизель-агрегата, а отдает теплоту через водо-водяной теплообменник аккумулирующей ёмкости, одновременно осуществляется подогрев промывочной жидкости зумпфа, а также система позволяет использовать нагретую воду системы отопления для хозяйственных нужд.

С учётом особенностей ведения геологоразведочных работ более приемлемой является схема с воздушным теплоносителем (рисунок 2.3).

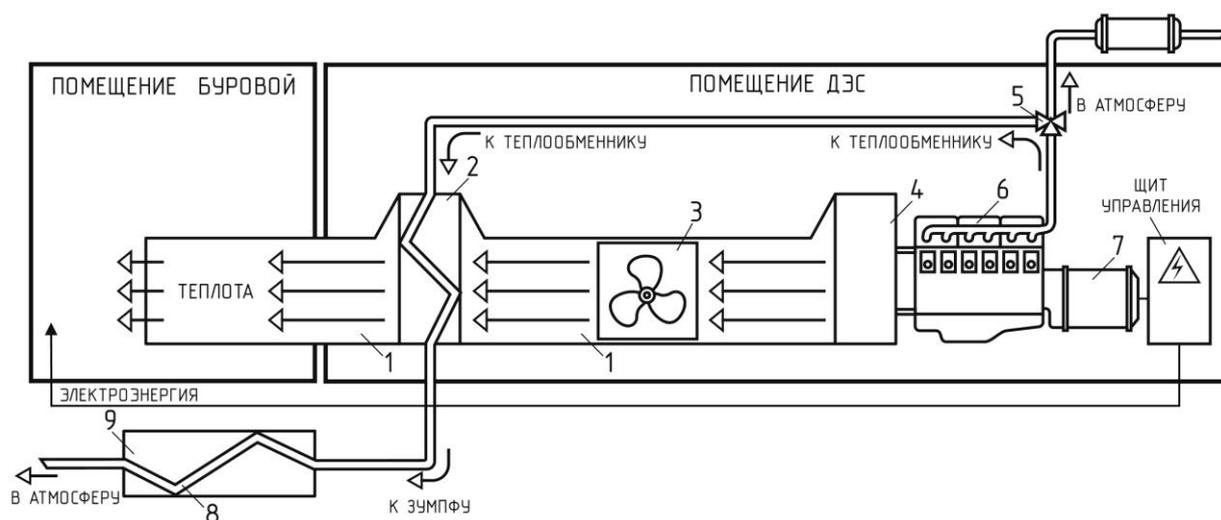


Рисунок 2.3 – Схема установки утилизации теплоты с использованием воздуха в качестве теплоносителя.

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 установки.

Осевой вентилятор 3 располагается перед радиатором 4 дизель-агрегата 6. Вентилятор 3 забирает воздух с радиатора 4, тем самым охлаждая его, и подаёт нагретый воздух в газо-воздушный теплообменник 2. В теплообменнике 2 воздух дополнительно подогревается теплом выхлопных газов, поступающих через трехходовой кран 5 из газового коллектора дизель-агрегата 6, и подаётся по рукаву 1 в обогреваемое помещение буровой, где по воздуховодам системы отопления распределяется к рабочим местам буровой бригады.

Отдав тепло в газо-воздушном теплообменнике 2, выхлопные газы поступают в теплообменник 8 зумпфа 9, где остаточным теплом подогревают промывочную жидкость.

Применение воздушной системы отопления помещения буровой установки на основе воздушной схемы утилизации теплоты позволило создать необходимые температурные условия в рабочей зоне буровой,

добиться более равномерного распределения температур и обеспечить комфортные условия труда.

Кроме очевидных преимуществ следует также отметить, что использование глубокой утилизации тепла выхлопных газов при охлаждении их ниже точки росы (100-120°C) значительно снижает выбросы вредных веществ (сажи, окиси углерода и т.п.) с выхлопными газами в окружающую среду, что способствует улучшению экологической обстановки в целом и не может не приниматься во внимание при взятом по инициативе государства курсе на рациональное природопользование [171].

Воздушная схема наиболее удобна при перемещениях буровой, не требует специального теплоносителя, мобильна, менее инерционна, проста в монтаже и обслуживании – при перевозках буровой установки быстроразъёмные соединения воздушного и газового трубопроводов позволяют быстро отключить ДЭС от буровой и транспортировать их отдельно, а также ремонтпригодна в полевых условиях. Всё это позволит обеспечить необходимую мобильность энергетического комплекса в условиях ведения геолого-разведочных работ.

Обе установки, как с водяным, так и с воздушным теплоносителем, показали свою работоспособность и эффективность в условиях Крайнего Севера.

Кроме этих установок, специально разработанных применительно к условиям ведения геолого-разведочных работ, в ряде отраслей использовались различные типы утилизаторов теплоты ДЭС, приспособленных к особенностям того или иного производства. При этом, сходные в общих чертах конструкции утилизаторов теплоты ДЭС буровых установок глубокого бурения на нефть и газ из-за больших габаритов и массы не могут использоваться на передвижных ДЭС значительно меньшей мощности.

Судовые УУТ [24] рассчитаны для работы с дизелями большой мощности для обеспечения сравнительно небольших тепловых нагрузок. В

условиях геолого-разведочных работ тепловые нагрузки буровой соизмеримы с тепловой мощностью ДЭС, поэтому судовые утилизаторы не обеспечивают необходимую тепловую мощность.

В этой связи дальнейшие исследования следует проводить применительно к специализированным теплоутилизационным установкам с водяным и воздушным ТН, конструкция которых разрабатывалась для совместимой работы с установками колонкового бурения (УКБ). При этом схема с воздушным теплоносителем в наибольшей степени соответствует передвижному характеру работ и особенностям теплоснабжения буровой установки. Она легко и быстро монтируется, позволяет создать более эффективную систему отопления за счет применения воздушных завес. В этой связи разработку эффективного теплообменника и определение оптимальных режимов его работы следует вести применительно к воздушной схеме.

Использование утилизированного теплового потока передвижных ДЭС посредством разработанной системы воздушного отопления способно:

- создать оптимальный уровень температур в рабочей зоне буровой установки;
- снизить перепад температур в помещении буровой по высоте;
- обеспечить выполнение санитарно-гигиенических требований к микроклимату производственных зданий.

Кроме этого, при использовании системы воздушного отопления в здании буровой создается избыточное давление, что снижает возможность инфильтрации холодного воздуха через технологические отверстия и проемы.

Установка также может быть использована для разогрева масла в гидросистеме станка, ледяных пробок в циркуляционной системе и т.п., в тех случаях, когда применение открытого огня запрещено или невозможно.

При всех вышеперечисленных достоинствах воздушной схемы утилизации теплоты были выявлены следующие проблемы, требующие грамотного технического решения для дальнейшего развития этого

направления.

Вентилятор, установленный перед радиатором дизель-агрегата, должен обеспечивать его эффективное охлаждение при варьируемых значениях электрической нагрузки.

Количество воздуха, подаваемого вентилятором для подогрева в газо-воздушном теплообменнике и поступающего затем в здание буровой установки, должно увеличиваться с понижением температуры в обогреваемом помещении или уменьшаться при превышении установленных верхних температурных границ.

При этом, если это единый воздушный поток, формируемый вентилятором от радиатора охлаждения дизель-агрегата к обогреваемому помещению через ТО, то при такой жесткой связи тепловую нагрузку помещения буровой будет определять электрическая нагрузка дизель-агрегата.

Следовательно, следует разобщить поток воздуха, поступающий с радиатора дизель-агрегата и поток воздуха, поступающий в обогреваемое помещение, тем самым обеспечить раздельную работу системы охлаждения дизель-агрегата и системы газо-воздушного отопления помещения буровой установки.

В этом случае расчет газо-воздушного ТО следует проводить применительно к тепловым нагрузкам помещения буровой установки. Режим работы такого ТО должен определяться критерием поддержания температурного режима обогреваемого помещения.

Для этих условий требуется разработка специализированной конструкции теплообменника, обладающего высокой площадью теплообмена, небольшими габаритами и обеспечивающего высокий коэффициент теплоотдачи.

Режим работы газо-воздушного теплообменника определяется как параметрами воздуха (температура, скорость движения, теплоёмкость и т.д.), так и параметрами первичного теплоносителя - выхлопных газов. Для

оценки, обоснования и выбора последних следует провести теплотехнический расчет дизель-генератора при различных режимах его работы.

## **2.2. Обоснование теплотехнических параметров дизель-генератора передвижных ДЭС**

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

$$Q = \frac{N_e \cdot g \cdot Q_0}{3600}, \text{ кВт} \quad (2.1)$$

где  $N_e$  – номинальная мощность дизеля, кВт;  $g$  – удельный расход топлива, г/кВт·ч;  $Q_0$  – низшая теплота сгорания топлива кДж/кг.

Следует отметить, что в рассматриваемом цикле энергообеспечения при высокой стоимости топлива и двукратном преобладании доли тепловой энергии в энергетическом балансе энергоустановки наблюдается парадоксальная ситуация: для получения тепловой энергии сжигается дорогостоящее дизельное топливо, а до 70% от производимой при этом теплоты безвозвратно, а главное – бесполезно, выбрасывается в воздух от радиатора охлаждения ДВС и через систему газовыхлопа [5].

При сгорании топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в механическую работу полезно преобразуется только 30-40% выделяемого тепла [5]. Остальное тепло теряется, причем в основном уносится охлаждающей жидкостью и выхлопными газами, и незначительно утрачивается из-за неполноты сгорания топлива, а также в виде тепловыделений от трения.

Распределение затраченной теплоты на полезную работу и различные потери называют тепловым балансом двигателя (рисунок 2.4) [102].

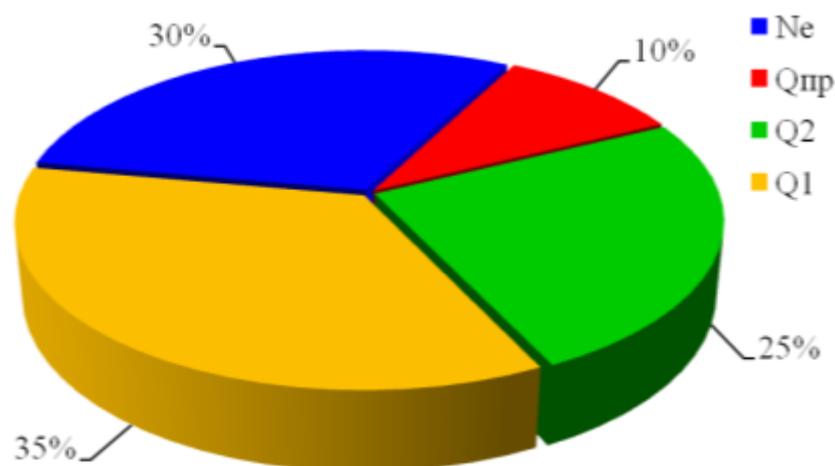


Рисунок 2.4 – Тепловой баланс дизель-агрегата.

Значения отдельных составляющих теплового баланса позволяют судить о теплонапряжённости двигателя, рассчитать систему охлаждения, выяснить возможность использования теплоты отработавших газов. Величину каждой составляющей баланса определяют также в процентах по отношению ко всему количеству затраченной теплоты.

Тепловой баланс дизель-агрегата может быть представлен следующим образом:

$$Q = Ne + Q_1 + Q_2 + Q_{\text{пр}} \quad (2.2)$$

где  $Ne$  – тепловой поток, преобразованный в полезную мощность, кВт;  $Q_1$  – тепловой поток, отводимый водой системы охлаждения, кВт;  $Q_2$  – тепловой поток, отводимый выхлопными газами, кВт;  $Q_{\text{пр}}$  – прочие потери теплоты (в т.ч. потери, вызванные химической неполнотой сгорания топлива, потери теплоты в масло, а также остаточные потери теплоты, не учтённые остальными составляющими теплового баланса), кВт;

По данным ряда исследователей [5, 143], основные доли теплоты приходятся на преобразование в полезную работу, и теплоту, отводимую системой охлаждения и выхлопными газами. Тепловой поток от системы смазки и нагретого корпуса дизель-агрегата не превышают 10-15% от общего теплового потока (рисунок 2.4).

Доля теплоты, отводимой системой охлаждения и выхлопными газами, в

тепловом балансе дизель-генератора, наибольшая, составляет 55-60% и представляет наибольший интерес с точки зрения её утилизации.

Поэтому разработку системы утилизации теплоты следует вести по двум направлениям – утилизация теплоты, отводимой системой охлаждения дизель-агрегата, и теплоты, отводимой выхлопными газами.

Тепловой поток, отводимый от дизель-агрегата охлаждающей жидкостью (ОЖ – водой) и рассеиваемый радиатором, определяется по формуле [125]:

$$Q_1 = Ne g Q_0 10^{-4}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

где  $Ne$  – мощность дизель-генератора, кВт,  $g$  – удельный расход топлива, кг/кВ\*ч,  $Q_0$  – низшая теплота сгорания топлива; её величину можно принять 42000 кДж/кг.

Для того, чтобы отобрать это количество теплоты, радиатор следует охлаждать потоком воздуха. Расход воздуха, необходимый для утилизации теплового потока  $Q_1$ , определяется следующим образом:

$$V_1 = \frac{Q_1}{\rho_B c_B \Delta t_B}, \text{ м}^3 / \text{с} \quad (2.4)$$

где  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c_B$  – теплоёмкость воздуха, кДж/кг град;  $\Delta t_B$  – перепад температуры воздуха на радиаторе, °С.

Перепад температуры воздуха на радиаторе  $\Delta t_1$  зависит от температуры ОЖ системы охлаждения на входе и выходе из радиатора и её расхода. Количество теплоты, подводимое ОЖ системы охлаждения к радиатору

$$Q_{1ОЖ} = M_{ОЖ} \cdot C_{ОЖ} \cdot \Delta t_{ОЖ}, \text{ кВт} \quad (2.5)$$

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 на входе и выходе из радиатора, °С.

Воздух, охлаждая радиатор, отводит тепловой поток  $Q_1$

$$Q_{1В} = M_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B, \text{ кВт} \quad (2.6)$$

где  $M_B$  – расход воздуха через радиатор, кг/с;  $C_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/кг град;  $\Delta t_B$  – перепад температуры воздуха на радиаторе °С.

Решая совместно уравнения (2.5) и (2.6) получим

$$\begin{aligned} Q_{10Ж} &= Q_{1В} \\ M_{ОЖ} \cdot C_{ОЖ} \cdot \Delta t_{ОЖ} &= M_{В} \cdot C_{В} \cdot \Delta t_{В} \\ \Delta t_{В} &= \frac{M_{ОЖ} C_{ОЖ} \Delta t_{ОЖ}}{M_{В} \cdot C_{В}} \quad (2.7) \end{aligned}$$

Из уравнения (2.7) можно непосредственно получить расход воздуха, необходимый для нормального охлаждения радиатора, выраженный через характеристики дизель-генератора

$$M_{В} = \frac{M_{ОЖ} C_{ОЖ} \Delta t_{В}}{C_{В} \cdot \Delta t_{В}} \quad (2.8)$$

По рекомендациям производителей дизель-генераторов удельный расход ОЖ в радиаторной системе охлаждения составляет 150-250 кг/кВтч при перепаде температур  $\Delta t_1$  около  $10^{\circ}\text{C}$  [1].

Тепловой поток, утилизированный от выхлопных газов дизель-генератора в теплообменном аппарате, определяется по формуле

$$Q_2 = V_2 \cdot C_{вг} \cdot \rho_2 \cdot \Delta T, \text{ кВт} \quad (2.9)$$

где  $V_2$  – объемный расход выхлопных газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $C_{вг}$  – теплоемкость выхлопных газов,  $\text{кДж}/\text{кг град}$ ,  $\rho_2$  – плотность выхлопных газов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Delta T$  – перепад температур газов в теплообменнике,  $^{\circ}\text{C}$ .

Объемный расход газов определяется расходом топлива и количеством воздуха, поступающего в цилиндры дизель-генератора.

По одной из методик [25] объемный расход газов может быть определен

$$V_2 = \frac{\alpha \cdot g_{В} \cdot g \cdot N_e}{3600 \rho_2}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (для быстроходных дизелей он составляет 1,3-1,7 и показывает, во сколько раз реальное количество воздуха превышает теоретически необходимое);  $g_{В}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива,  $\text{кг}/\text{кг}$ , в приближенных расчетах принимается равным 15  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $g$  – удельный расход топлива,  $\text{кг}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ ;  $N_e$  – мощность дизель-агрегата,  $\text{кВт}$ .

Более точно можно определить расход газов из уравнения горения по содержанию горючих компонентов в топливе [25]. Однако, эти методы не

позволяют получить достаточно точных результатов, т.к. в них учитывается коэффициент избытка воздуха  $L$ , изменяющийся в широких пределах и зависящий от многих факторов.

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

$$V_{\text{ц}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2 \cdot H \cdot n \cdot K}{480}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.11)$$

где  $D_{\text{ц}}$  – диаметр цилиндра дизель-агрегата;  $H$  – ход поршня, м;  $n$  – число оборотов, об/мин,  $K$  – число цилиндров;

Уравнение состояния может быть записано в следующей форме

$$\frac{P_{\text{ц}} \cdot V_{\text{ц}}}{T_{\text{ц}}} = \frac{P_{\text{вг}} \cdot V_2}{T_{\text{вг}}}$$

откуда можно найти

$$V_2 = \frac{P_{\text{ц}} \cdot V_{\text{ц}} \cdot T_{\text{вг}}}{T_{\text{ц}} \cdot P_{\text{вг}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.12)$$

где  $P_{\text{ц}}$  – давление в цилиндре перед выпуском, Па,  $V_{\text{ц}}$  – объем газа в цилиндрах, м<sup>3</sup>/с;  $T_{\text{вг}}$  – температура газов в конце такта выпуска, °К,  $T_{\text{ц}}$  – температура газов в цилиндре перед выпуском, °К,  $P_{\text{вг}}$  – давление газов в цилиндре в конце такта выпуска, Па.

Подставив в формулу (2.12) значение  $V_{\text{ц}}$  из формулы (2.11) получим зависимость для объемного расхода выхлопных газов

$$V_2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2 \cdot H \cdot P_{\text{ц}} \cdot T_{\text{вг}} \cdot n \cdot K}{480 \cdot P_{\text{вг}} \cdot T_{\text{ц}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.13)$$

Расход воздуха, необходимый для отбора теплоты выхлопных газов в газо-воздушном теплообменнике

$$V_3 = \frac{Q}{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{т0}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.14)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха, кДж/кг град;  $\Delta t_{\text{т0}}$  – перепад температур воздуха на газо-воздушном теплообменнике, °С.

Сравнивая значения расхода воздуха необходимого для отбора теплоты от радиатора системы охлаждения ( $V_1$ ) и теплоты, выделяемой выхлопными газами в газо-воздушном теплообменнике ( $V_3$ ) выбирают большее из этих

значений. Выбранная величина расхода воздуха будет определять производительность вентилятора.

Общий тепловой поток, отводимый от дизель-генератора системой охлаждения и выхлопными газами

$$Q_{\text{общ}} = Q_{10\text{Ж}} + Q_2, \text{ кВт} \quad (2.15)$$

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

$$Q_{\text{общ}} = M_{\text{ОЖ}} \cdot C_{\text{ОЖ}} \cdot \Delta t_{\text{ОЖ}} + \frac{\pi \cdot D_{\text{Ц}}^2 \cdot P_{\text{Ц}} \cdot T_{\text{ВГ}} \cdot n \cdot K}{480 P_{\text{ВГ}} T_{\text{Ц}}} \cdot \rho_2 \cdot C_{\text{ВГ}} \cdot \Delta T, \text{ кВт} \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) позволяет определить максимальный тепловой поток в зависимости от параметров дизель-генератора, что дает возможность рассчитать основные характеристики системы утилизации теплоты для различных типов дизель-генераторов, используемых в дизельных электростанциях и применяемых на геологоразведочных работах.

Оценив величину теплового потока, который можно отобрать от дизель-агрегата, получив его исходные тепловые параметры, следует перейти к расчету конструктивных параметров теплоутилизационной установки.

### **2.3. Расчет и обоснование конструктивных параметров теплоэнергетического комплекса**

Исходными данными для расчета теплообменника являются термодинамические параметры дизель-агрегата.

Перед расчетом необходимо определиться с типом конструкции теплообменника.

Схема с воздухом в качестве теплоносителя в наибольшей степени соответствует передвижному характеру работ и особенностям теплоснабжения буровой установки. Она легко монтируется, исключает постоянное применение штатных электрических отопительных приборов, тем

самым снимая дополнительную нагрузку с дизель-генератора и обеспечивая экономию топлива до 14 кг у.т. в сутки [97], а также позволяет создать более эффективную систему отопления – воздушная завеса, отсекающая инфильтрационный поток воздуха через технологическое отверстие. Поэтому разработку рекуперативного теплообменника следует вести применительно к воздушной схеме.

Одним из основных требований, предъявляемых к конструкции теплообменника для утилизации теплоты выхлопных газов дизель-агрегатов, являются следующие:

- канал первичного теплоносителя, по которому двигаются выхлопные газы, не должен засмоляться несгоревшими остатками топлива и масла;
- должны обеспечиваться высокие скорости теплоносителей;
- должны обеспечиваться допустимые гидравлические сопротивления при движении выхлопных газов.

Наиболее приемлемыми в условиях подвижного характера ведения геолого-разведочных работ являются теплообменники кожухо-трубчатой конструкции [11, 12, 112. 144]. Они просты в изготовлении, ремонтпригодны в условиях механических мастерских, не требуют специального обслуживания. Теплообмен в этом случае происходит с разделением первичного и вторичного теплоносителей, устройство представляет собой набор трубок в трубных решетках в кожухе и закрыта крышками (рисунок 2.5).

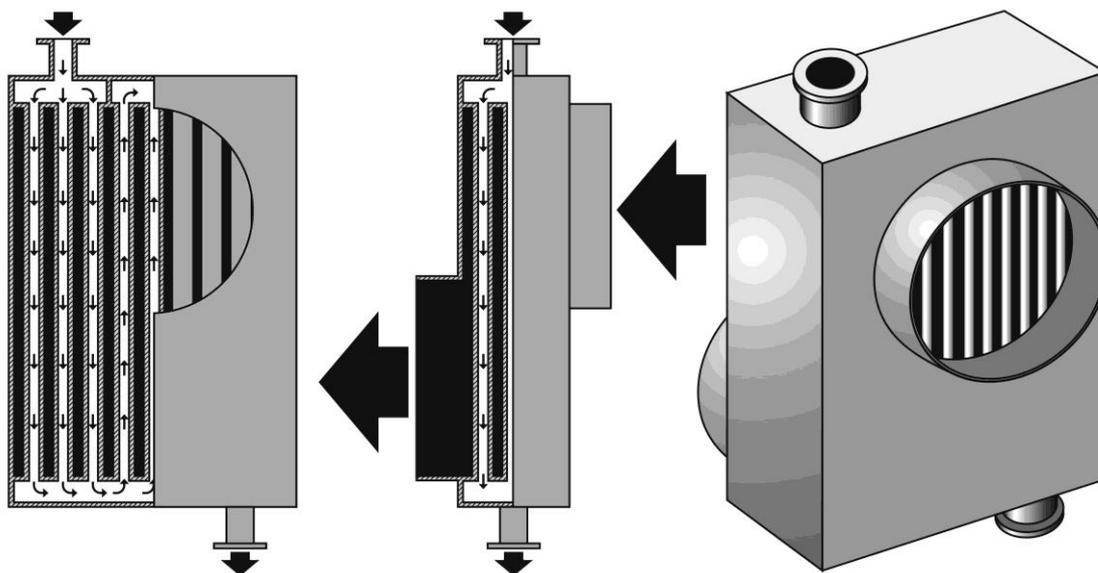


Рисунок 2.5 – Теплообменник кожухо-трубчатой конструкции.

В кожухо-трубчатых теплообменниках первичный теплоноситель – выхлопные газы (ВГ) – подаются внутри труб, что облегчает их чистку от нагара в случае такой необходимости. Вторичный теплоноситель – воздух – подается в межтрубчатое пространство, где подогревается теплотой, отдаваемой первичным теплоносителем (рисунок 2.6).

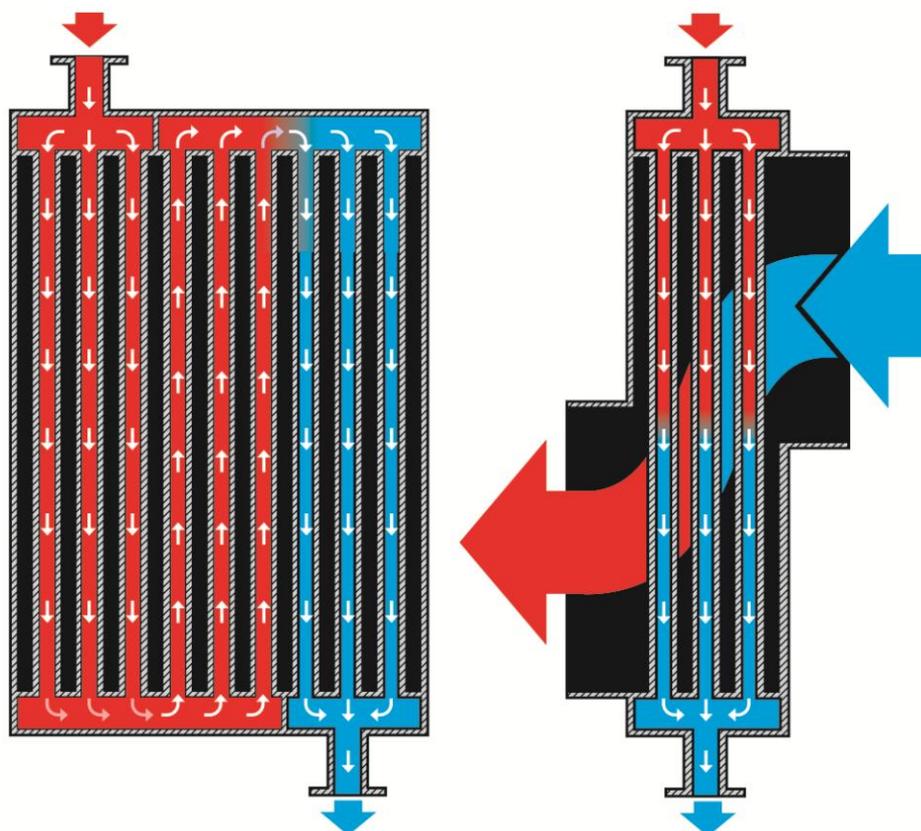


Рисунок 2.6 – Схема теплообмена в кожухо-трубчатом теплообменнике.

Красный цвет – нагретый воздух, синий цвет – охлажденный воздух.

Для обеспечения высоких скоростей движения воздуха в теплообменнике возможна установка различного рода переборок и турболизаторов, интенсифицирующих теплообмен [143, 144].

Методика расчета следующая [112].

1. Определяют число трубок теплообменника

$$n = \frac{4f}{\pi d^2}, \text{ шт.} \quad (2.17)$$

где  $f$  – площадь сечения трубок газотока,  $\text{м}^2$ ,  $d$  – внутренний диаметр труб,  $\text{м}$ .

Площадь сечения газотока рассчитывают, задавшись скоростью движения газов по трубкам  $\omega$ ,  $\text{м/с}$ :

$$f = \frac{V_2}{\omega}, \text{ м}^2 \quad (2.18)$$

где  $V_2$  – объемный расход выхлопных газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Затем проводят эскизную компоновку, размещая трубы в шахматном порядке или коридорным пучком. Из эскиза определяют площадь сечения кожуха ( $F$ ), межтрубного пространства ( $F_B$ ) и смачиваемый периметр ( $P_{\text{см}}$ ).

2. Определяют гидравлический диаметр межтрубного пространства

$$d_2 = \frac{4F_B}{P_{\text{см}}}, \text{ м} \quad (2.19)$$

3. Скорость движения вторичного теплоносителя (воздуха) в межтрубном пространстве

$$\omega_3 = \frac{V_3}{F_B}, \text{ м/с} \quad (2.20)$$

4. Вычисляют критерий Рейнольдса для первичного и вторичного теплоносителей.

$$Re = \frac{\omega d_2}{\nu} \quad (2.21)$$

где  $\omega$  – скорость движения теплоносителя в теплообменнике,  $\text{м/с}$ ,  $d_2$  – гидравлический диаметр канала по которому движется теплоноситель,  $\text{м}$ ,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Гидравлический диаметр газового канала образованного трубками принимается равным внутреннему диаметру трубок.

5. Коэффициент теплоотдачи первичного и вторичного теплоносителей зависит от большого количества факторов и для турбулентного режима движения может быть определен по формуле [56]:

$$\alpha = B \frac{(\omega\rho)^{0,8}}{d^{0,2}}, \text{ Вт/м}^2\text{град} \quad (2.22)$$

где  $B$  – коэффициент зависящий от температуры и свойств теплоносителя;  $\omega$  – скорость движения теплоносителя, м/с,  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>,  $d$  – диаметр сечения по которому движется теплоноситель, м. Условия применения этой зависимости находятся в пределах  $10^4 < Re < 10^6$  [19]. В случае, когда режим течения теплоносителя носит другой характер, коэффициент теплоотдачи определяется по эмпирическим зависимостям.

6. Площадь теплообменника рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ТО}} = \frac{Q_2 \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t}, \text{ м}^2 \quad (2.23)$$

где  $Q$  – тепловой поток, поступающий в теплообменник с выхлопными газами, кВт;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> град.

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda_M}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.24)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи первичного теплоносителя, Вт/м<sup>2</sup> град;  $\delta$  – толщина стенки трубы, м;  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности материала труб, Вт/м<sup>2</sup> град;  $\Delta t$  – логарифмический перепад температур, °С.

В самом общем виде логарифмический перепад температур определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}, \text{ } ^\circ\text{С} \quad (2.25)$$

где  $\Delta t_6$  – разность температур теплоносителей на том конце теплообменника, где он больше, °С (при противотоке  $\Delta t_6 = T_1 - t_2$ , где  $T_1$  – температура выхлопных газов на входе в теплообменник, °С,  $t_2$  – температура воздуха на

выходе из теплообменника, °C),  $\Delta t_m$  – меньший перепад температур ( $\Delta t_m = T_2 - t_1$ , °C, где  $T_2$  – температура выхлопных газов на выходе из теплообменника, °C,  $t_1$  – температура воздуха на входе в теплообменник, °C). Температуры  $T_2 - t_2$  принимаются в расчетах произвольно и затем корректируются по результатам расчетов

Для противотока зависимость логарифмического перепада температур примет вид:

$$\Delta t = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.26)$$

7. Длина труб теплообменника

$$l = \frac{F_{\text{ТО}}}{n \pi d_H}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

8. После определения длины труб проводят проверочный расчет теплообменника. Суть его сводится к определению значения температур, принятых ранее произвольно:

$$T_2 = T_1 - (T_1 - t_1)Z, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.28)$$

$$t_2 = t_1 + (T_1 - t_1)Z \frac{w_1}{w_2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.29)$$

где  $Z$  – коэффициент, определенный из справочных таблиц в зависимости от коэффициента теплопередачи  $K$ , площади теплообмена  $F_{\text{ТО}}$  и водяных эквивалентов первичного ТН (ВГ)  $w_1$  и вторичного ТН (воздух)  $w_2$ .

В самом общем виде величина водяного эквивалента определяется по формуле:

$$w = M C = V \rho C, \text{ } \text{Вт/град} \quad (2.30)$$

где  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $C$  – теплоёмкость теплоносителя, кДж/кг·град;  $V$  – объемный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с,  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>.

В случае, если конечные температуры теплоносителей, определенные по формулам (2.26) и (2.27), не совпадают с ранее принятыми в п.6 более, чем на 10%, их величину изменяют. Затем проводят расчет для вновь выбранных значений температур.

## **2.4. Разработка конструкции теплоэнергетического комплекса для буровых установок колонкового бурения**

Проведенные производственные испытания и накопленный опыт эксплуатации установок утилизации теплоты с воздушным теплоносителем доказали возможность эффективного практического применения теплоутилизационных установок при колонковом бурении скважин в суровых климатических условиях, позволили сформулировать рекомендации по совершенствованию систем теплоснабжения технологических потребителей на геолого-разведочных работах. При этом, выявлены характерные недостатки подобных установок – жесткая связь системы отопления буровой установки и системы охлаждения дизель-агрегата и прямая зависимость мощности утилизированного теплового потока от величины нагрузки дизель-агрегата. Возникает необходимость обеспечить поддержание тепловых режимов работы ДЭС и здания буровой с одновременным обеспечением независимости работы системы охлаждения дизель-агрегата и СУТ. Проблема усугубляется тем, что нагрузка на генераторе дизель-агрегата постоянно изменяется в широком диапазоне и качественное управление работой системы утилизации теплоты возможно только на основе автоматического регулирования.

Таким образом, выявленные вышеперечисленные задачи позволяют сформулировать следующие основные направления совершенствования конструкции теплоутилизационных установок.

Первым направлением является обеспечение независимости работы системы охлаждения дизель-агрегата от системы утилизации теплоты при их тесной взаимной связи. Система охлаждения должна обеспечивать:

1. Быстрый прогрев дизель-агрегата до температуры  $75-80^{\circ}\text{C}$  и ввод его под нагрузку без отбора теплоты с радиатора.
2. Рабочий режим работы дизель-агрегата при температуре охлаждающей жидкости  $75-95^{\circ}\text{C}$ ;

3. Эффективное охлаждение радиатора дизель-агрегата в условия высоких температур с максимальным отбором теплоты от радиатора системы охлаждения.

Конструктивно, эти требования могут быть выполнены двумя принципиально различными решениями.

Первое решение – поддержание рабочего температурного режима дизель-агрегата посредством изменения расхода ОЖ в системе охлаждения. Это технически сложное решение, требующее внесения конструктивных изменений в систему охлаждения дизель-агрегата.

В соответствии с зависимостью тепловой режим системы охлаждения

$$Q_{10Ж} = M_{ОЖ} C_{ОЖ} \Delta t$$

можно представить как температуру теплоносителя в функции расхода охлаждающей жидкости

$$\Delta t = \frac{Q_{10Ж}}{M_{ОЖ} C_{ОЖ}} \quad (2.31)$$

Тогда конечная температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения на входе в радиатор определится из формулы:

$$t_K = \Delta t + t_H, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $t_H$  – температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора,  $^\circ\text{C}$ , тогда, заданная температура на выходе из дизель-агрегата и на входе в радиатор будет равна

$$t_K = \frac{Q_{10Ж}}{M_{ОЖ} C_{ОЖ}} + t_H \quad (2.32)$$

Изменяя расход охлаждающей жидкости в системе охлаждения можно обеспечить постоянную заданную температуру системы охлаждения.

Расход ОЖ в системе охлаждения должен обеспечивать рассеивание теплоты на радиаторе, величина которой зависит от величины нагрузки  $Q$  ( $P$ )  $\sim f(P)$  дизель-генератора.

Изменение величины расхода ОЖ в зависимости от нагрузки можно выразить следующим образом

$$M_{OЖ} = \frac{Q(P)}{C_{OЖ}(t_K - t_H)} \quad (2.33)$$

при заданном значении  $t_2 = \text{const}$ .

Эта зависимость отражает режим регулирования теплового потока радиатора от величины нагрузки при заданном постоянном значении температуры охлаждающей жидкости.

Вторым решением этой проблемы является измерение расхода воздуха, охлаждающего радиатор дизель-агрегата при постоянном расходе охлаждающей жидкости в системе охлаждения. Это является более приемлемым, т.к. сводит к минимуму конструктивные изменения дизель-агрегата, поскольку насос системы охлаждения является его неотъемлемой частью, при этом:

- упрощает процесс регулирования;
- позволяет автоматизировать охлаждение радиатора для обеспечения стабильного рабочего температурного режима системы охлаждения.

При таком решении режим регулирования будет определяться расходом воздуха в зависимости от температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения

$$V_1 = \frac{M_{OЖ} C_{OЖ} (t_K - t_H)}{\rho_B C_B \Delta t_B} \quad (2.34)$$

где  $M_{OЖ}$  – массовый расход ОЖ в системе охлаждения дизель-агрегата, кг/с;  $C_{OЖ}$   $C_B$  – теплоемкость, соответственно, ОЖ и воздуха, кДж/кг °С;  $t_K$ ,  $t_H$  – температура ОЖ на входе и выходе из радиатора, °С;  $\Delta t_B$  – перепад температуры воздуха на радиаторе, °С;

Учитывая то, что массовый расход ОЖ величина постоянная, т.к. обороты дизель-агрегата являются постоянными, и зависит от мощности и конструктивных особенностей агрегата, выражение  $\frac{M_{OЖ} C_{OЖ}}{\rho_B C_B}$  можно заменить константой

$$\Psi = \frac{M_{OЖ} C_{OЖ}}{\rho_B C_B} \quad (2.35)$$

где  $\Psi$  – константа, характеризующая систему охлаждения дизель-агрегата.

Получим зависимость

$$V_1 = \Psi \frac{(t_K - t_H)}{\Delta t_1}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.36),$$

которая отражает режим регулирования теплового потока радиатора в зависимости от температуры охлаждающей жидкости дизель-генератора.

Конструктивно независимое регулирование расхода воздуха, охлаждающего радиатор дизель-агрегата, может быть решено путем установки заслонки-регулятора в воздуховоде, где проточный вентилятор формирует поток воздуха от радиатора охлаждения (рисунок 2.7).

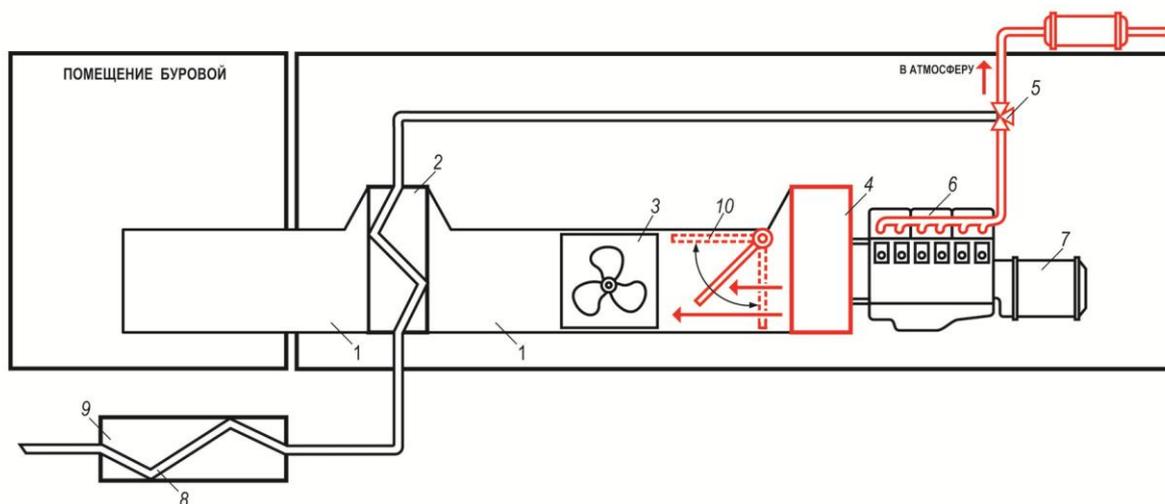


Рисунок 2.7 – Конструктивное решение – использование заслонки-регулятора расхода воздуха радиатора охлаждения дизель-агрегата.

1 – воздуховод; 2 – газо-воздушный теплообменник; 3 – вентилятор; 4 – радиатор дизель-агрегата; 5 – трехходовой атмосферный кран; 6 – дизель-агрегат; 7 – генератор; 8 – теплообменник зумпфа; 9 – зумпф; 10 – заслонка-регулятор расхода воздуха радиатора дизель-агрегата.

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

Так, например, после завершения рейса, а также при смене инструмента, электрическая нагрузка падает практически до нуля. В этих условиях дизель-агрегат работает на холостом ходу и утилизируемый тепловой поток будет

минимальным, что может быть недостаточным для обеспечения и поддержания заданного теплового режима буровой установки. Такая ситуация потребует дополнительного теплового потока в здание буровой. Решением может стать дозагрузка дизель-агрегата электронагревательными приборами (как вариант – блоком ТЭН в канале воздуховодов для дополнительного прогрева воздуха, поступающего в обогреваемое помещение), играющими роль доводочной подсистемы теплоснабжения (рисунок 2.8).

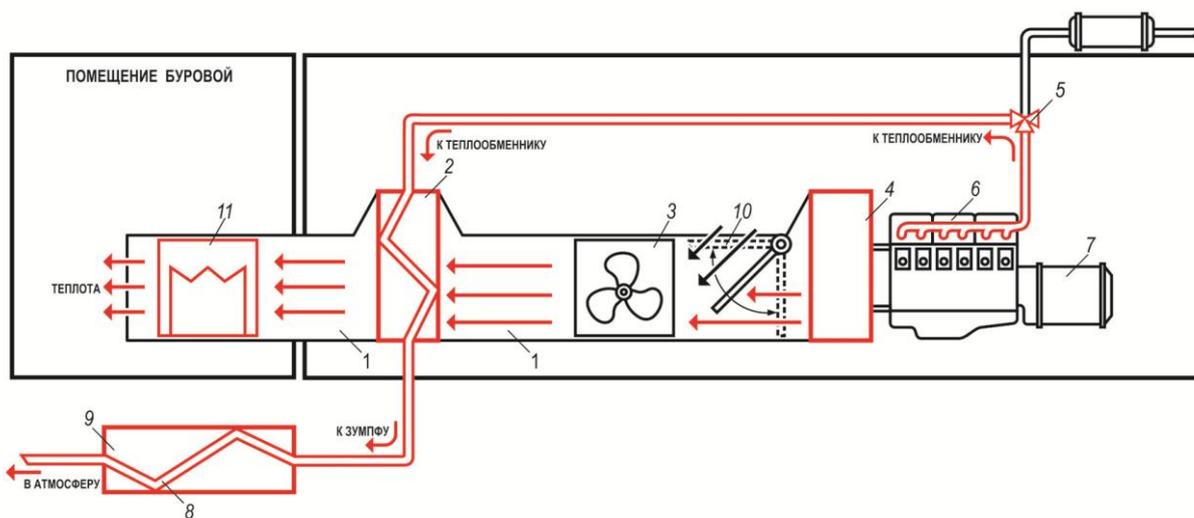


Рисунок 2.8 – Конструктивное решение – использование блока ТЭН в канале отопительного воздуховода.

1 – воздуховод; 2 – газо-воздушный теплообменник; 3 – вентилятор; 4 – радиатор дизель-агрегата; 5 – трехходовой атмосферный кран; 6 – дизель-агрегат; 7 – генератор; 8 – теплообменник зумпфа; 9 – зумпф; 10 – заслонка-регулятор расхода воздуха радиатора дизель-агрегата; 11 – блок ТЭН.

В случае полной загрузки ДЭС, утилизируемый поток может поднять температуру в обогреваемом помещении буровой выше допустимых пределов. В этом случае потребуется уменьшить количество утилизируемой теплоты без ущерба для эффективного охлаждения радиатора дизель-агрегата. Решением может стать уменьшение потока нагретого воздуха через ТО путём неполного перекрытия потока воздуха через теплообменник

заслонкой-регулятором расхода воздуха ТО, а также направление потока ВГ напрямую в ТО зумпфа минуя газо-воздушный ТО (рисунок 2.9).

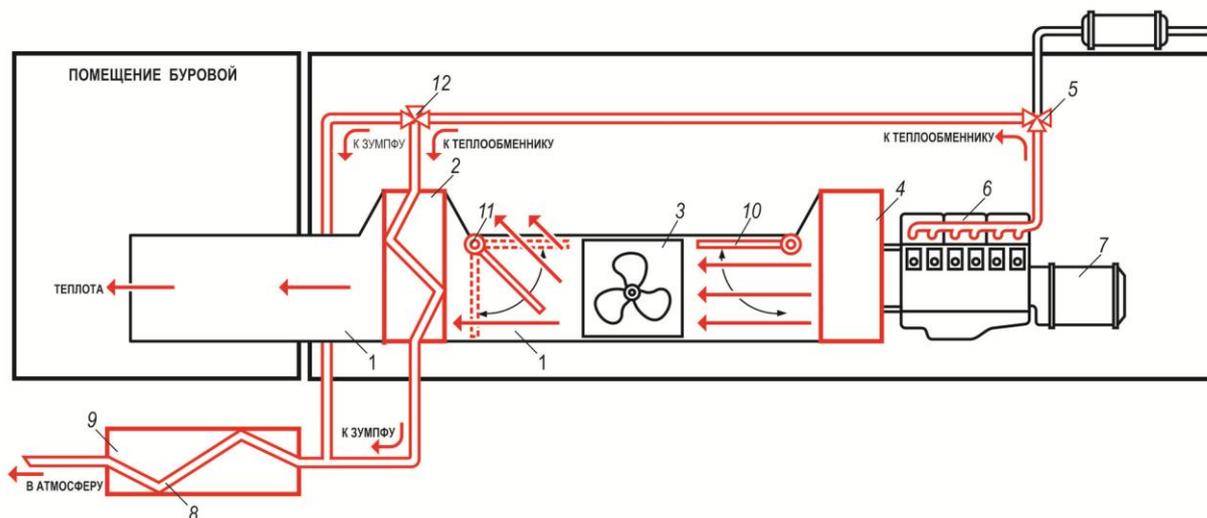


Рисунок 2.9 – Конструктивное решение – использование заслонки-регулятора расхода воздуха ТО и трёхходового крана ТО.

1 – воздуховод; 2 – газо-воздушный ТО; 3 – вентилятор; 4 – радиатор дизель-агрегата; 5 – трехходовой атмосферный кран; 6 – дизель-агрегат; 7 – генератор; 8 – ТО зумпфа; 9 – зумпф; 10 – заслонка-регулятор расхода воздуха радиатора дизель-агрегата; 11 – заслонка-регулятор расхода воздуха газо-воздушного ТО; 12 – трехходовой кран газо-воздушного ТО.

Когда в утилизации теплоты нет необходимости, система должна продолжать эффективное охлаждение радиатора дизель-агрегата, при этом свести к нулю тепловую нагрузку здания буровой. Эта задача может быть решена посредством полного перекрытия потока воздуха через теплообменник заслонкой-регулятором расхода воздуха ТО, а также перенаправлением потока выхлопных газов в атмосферу, минуя трубопроводы УУТ (рисунок 2.10).

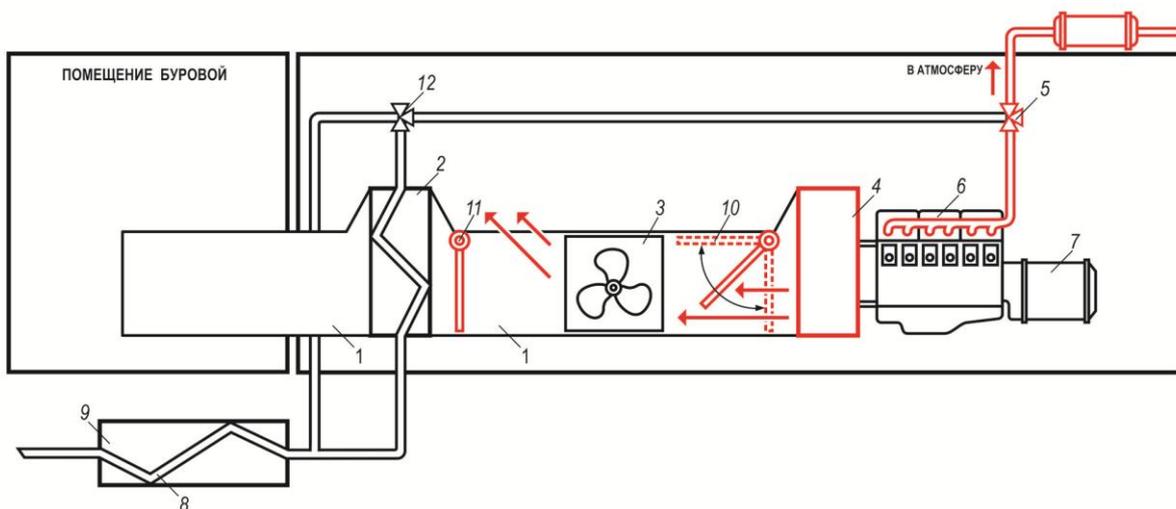


Рисунок 2.10 – Конструктивное решение – использование заслонки-регулятора расхода воздуха ТО и атмосферного 3-ходового крана.

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 – заслонка-регулятор расхода воздуха радиатора дизель-агрегата; 11 – заслонка-регулятор расхода воздуха газо-воздушного ТО; 12 – 3-ходовой кран газо-воздушного ТО.

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 комплексного энергоисточника без вмешательства со стороны оператора.

Совместное решение задач по основным направлениям совершенствования системы утилизации теплоты позволило предложить усовершенствованный вариант теплоутилизационной установки, обеспечивающий работу энергоисточника буровой установки в оптимальном режиме (рисунок 2.11).

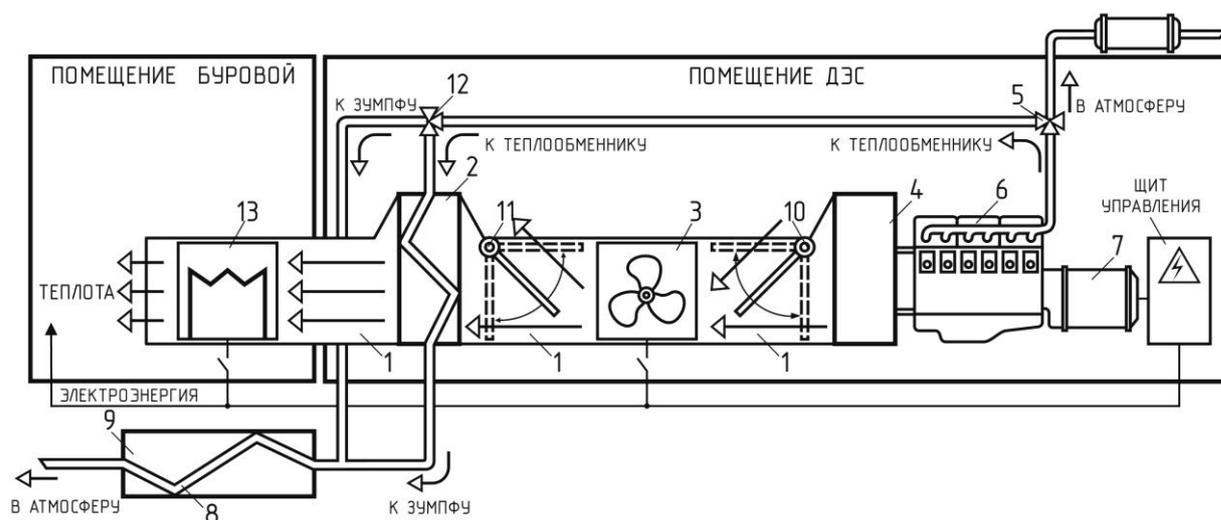


Рисунок 2.11 – Усовершенствованный вариант теплоутилизационной установки.

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 – заслонка-регулятор расхода воздуха радиатора дизель-агрегата; 11 – заслонка-регулятор расхода воздуха газо-воздушного ТО; 12 – 3-ходовой кран газо-воздушного ТО; 13 – блок ТЭН.

Таким образом, предложенная конструкция усовершенствованной теплоутилизационной установки обеспечивает устойчивую работу системы во всех штатных режимах: прогрев двигателя, при максимальных электрических нагрузках и на холостом ходу, как с утилизацией теплоты ДЭС, так и без задействования СУТ.

На следующем этапе для получения необходимых данных следует провести экспериментальные исследования, что позволит определить качественные факторы и количественные зависимости регулирования.

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 комплексного энергоисточника без вмешательства со

стороны оператора.

Автоматизация процесса теплообеспечения буровой установки составляет важную часть научно-технического прогресса в проведении геолого-разведочных работ. Теоретические исследования в области совершенствования управления процессом теплообеспечения бурения и его оптимизации получили новые возможности практической реализации с появлением управляющей микропроцессорной техники и созданием на ее основе систем автоматического регулирования (САР), реализующих методы и средства универсального, многофункционального управления, способного осуществлять гибкую технологию теплообеспечения.

В качестве предложения архитектура САР УУТ может быть реализована в виде контура регулирования по отклонению с обратной связью [10] (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Контур регулирования по отклонению с обратной связью

В таком контуре регулирования по измеренному изменению регулируемой переменной процесса регулятор вырабатывает корректирующий сигнал, управляющий регулирующим органом через исполнительный элемент, и полученное после этого воздействия значение регулируемой переменной вновь сравнивается с установкой регулятора (заданием). В случае наличия рассогласования процесс регулирования продолжается.

В нашем случае (рисунок 2.13), САР предназначена для управления комплексным процессом (утилизацией теплоты ДЭС, теплоснабжением помещения буровой и охлаждением дизель-агрегата), через исполнительные элементы (приводы регуляторов расхода воздуха, трёхходовых кранов, управляемые выключатели вентилятора и блока ТЭН) путём изменения положения (состояния) регулирующих органов (регуляторов расхода воздуха, трёхходовых кранов, вентилятора и блока ТЭН) по сигналам с измерительных преобразователей, которые измерили контролируемые параметры, считываемые первичными элементами (термодатчиками системы охлаждения дизель-агрегата и воздушной среды в помещении буровой), поступающим на регулятор (блок управления), реализующий алгоритмы управления и коррекции процессов.

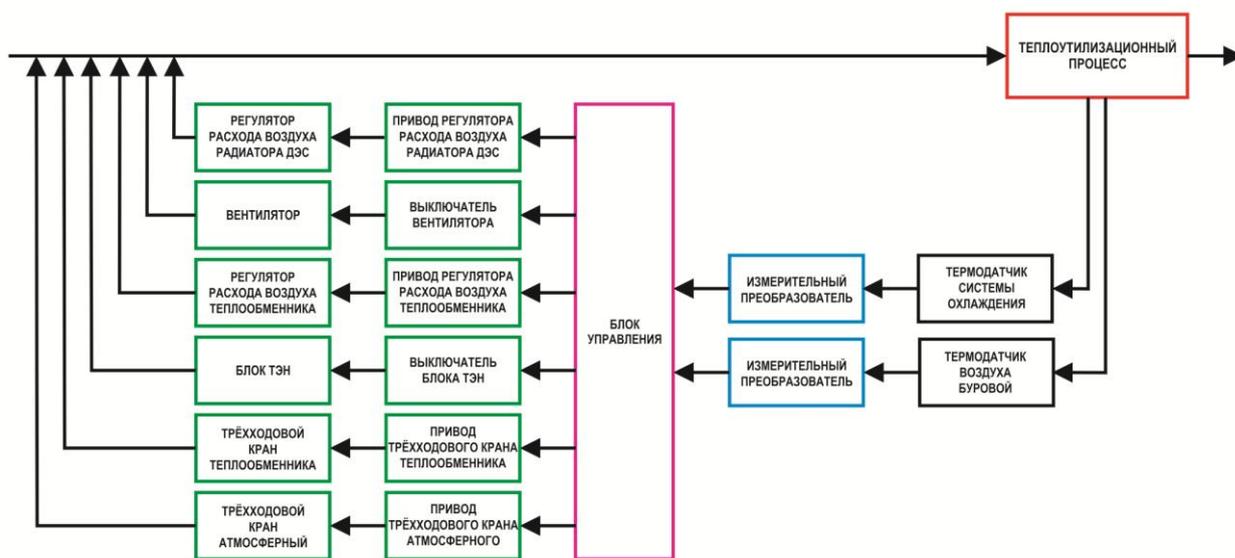


Рисунок 2.13 – Архитектура САР УУТ.

САР УУТ способна не только управлять процессом теплообеспечения в реальном масштабе времени по любому из заданных алгоритмов, но и собирать, накапливать и обрабатывать о нём информацию, а также диагностировать работоспособность отдельных узлов и механизмов и постоянно контролировать подсистемой газоанализации воздушную обстановку в обогреваемом помещении на предмет обнаружения утечки

выхлопных газов из контура системы газовыхлопа в систему воздушного отопления.

САР УУТ должна решать следующие виды задач:

- автоматическое регулирование и управление процессом теплоснабжения (расход воздушного потока, прогрев воздуха в газо-воздушном теплообменнике, передача и распределение теплоты в обогреваемом помещении и т.д.);
- дистанционный контроль работы оборудования УУТ;
- автоматическое регулирование работы оборудования;
- автоматизированный учет параметров и расхода материальных ресурсов;
- организация управления оборудованием с дисплейных щитов управления;
- реализация с технологическим оборудованием ПДЭС единого технического комплекса;
- повышение надежности работы оборудования посредством применения технических средств с повышенными показателями надежности;
- повышение экономичности регулируемого теплоутилизационного процесса путём применения методов регулирования технологических параметров, предотвращающих непроизводительные потери энергии и современных методов комплексного учета расхода энергоносителей;
- повышение качества и надежности передачи и приема информации о параметрах процесса;
- возможность интеграции САР УУТ в единую автоматизированную систему управления (АСУ) процессом бурения.

Ниже приведены наиболее характерные задачи, стоящие перед САР, и возможные пути их решения.

Задача 1: Анализ и планирование тепловой нагрузки.

Решение: Автоматическое прогнозирование потребления тепловой энергии с учетом температуры окружающей среды, силы ветра, уровня

влажности, статических данных и других факторов с выдачей рекомендаций по предпочтительному режиму тепловой нагрузки.

Задача 2: Обеспечение экономичности процесса.

Решение:

1. Применение автоматизированных средств комплексного учёта расхода электрической и тепловой энергии.
2. Автоматическое задание режимов работы оборудования.
3. Применение регулируемых приводов для заслонок регуляторов расхода воздуха и трёхходовых кранов.
4. Управление выработкой и передачей тепловой энергии.

Задача 3: Обеспечение информационности системы.

Решение:

1. Индикация всех технологических параметров.
2. Непрерывный мониторинг параметров режима работы системы и состояния работающего оборудования.
3. Быстродействующая сигнализация о нештатных ситуациях.

Задача 4: Обеспечение надёжность оборудования и системы в целом.

Решение:

1. Автоматическое отслеживание выработки ресурса оборудования и автоматический контроль сроков плановых ремонтов и замен.
2. Применение технических средств с повышенным показателем надёжности и методов автоматического ввода резервных средств при отказах.
3. Защита с высоким классом точности и быстрым временем срабатывания.
4. Система автоматических подсказок персоналу при возникновении нештатных ситуаций.

Такая система регулирования должна достаточно обеспечивать электроэнергией и теплотой потребности буровой установки при выполнении следующих условий:

1. Обеспечение быстрого прогрева дизель-агрегата и ввод его под нагрузку.

2. Поддержание нормальной работы дизель-агрегата при повышенных температурах окружающей среды в летний период без теплообеспечения буровой.

3. Обеспечение максимальной тепловой нагрузки буровой при минимальной электрической мощности, т.е. в отсутствие технологической нагрузки.

4. Выработка электроэнергии без задействования УУТ в период, когда обогрев буровой не требуется.

5. Поддержание заданной температуры в обогреваемой рабочей зоне независимо от технологической нагрузки буровой установки в холодный период года с обеспечением контроля воздушной обстановки для обнаружения утечек выхлопных газов с целью предупреждения отравления персоналом.

Принципиально работа автоматизированной системы утилизации теплоты заключается в следующем.

1. Температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения дизель-агрегата определяет расход воздуха через радиатор, поддерживающий заданный диапазон температур охлаждающей жидкости.

2. Температура в обогреваемом помещении определяет расход воздуха и выхлопных газов через газо-воздушный теплообменник, после которого в теплообменнике зумпфа буровой раствор подогревается остаточным теплом выхлопных газов.

3. Температура окружающей среды определяет допустимые температурные пределы в обогреваемом помещении.

При температуре воздуха меньше заданной САР увеличивает поток воздуха через газо-воздушный теплообменник, а при недостижении требуемого значения дополнительно включается блок ТЭН, использующийся в СУТ как доводочная подсистема теплоснабжения.

При чрезмерном повышении температуры воздуха в обогреваемом помещении САР уменьшает поток воздуха через газо-воздушный ТО, а при недостижении требуемого значения полностью его перекрывает, направляя выхлопные газы в обход газо-воздушного теплообменника, напрямую в теплообменник зумпфа.

3. При отсутствии необходимости утилизации теплоты, в том числе и для подогрева промывочной жидкости, поток выхлопных газов направляется напрямую из коллектора дизель-агрегата в атмосферу. При этом не прекращается поддержание температуры ОЖ в системе охлаждения дизель-агрегата в рабочих пределах.

Для каждого элемента установки утилизации теплоты в каждый момент времени есть конечное число состояний, в совокупности которых отражается состояние всей теплоутилизационной системы, призванной при отклонении температурного режима помещения буровой и/или ДЭС от заданного, возвращать СУТ в равновесное состояние в заданных температурных границах. Эти состояния можно описать и свести в формализованную матрицу состояний.

В общем виде работу теплоутилизационной установки можно представить в виде алгоритма – формализованной последовательности операций, отражающей все возможные состояния системы, а также положения регулируемого оборудования и запорной арматуры.

Блок-схема работы САР УУТ, совмещённая с матрицей состояний регулируемого оборудования в зависимости от возможных тепловых состояний регулируемой системы, приводится на рисунке 2.14.

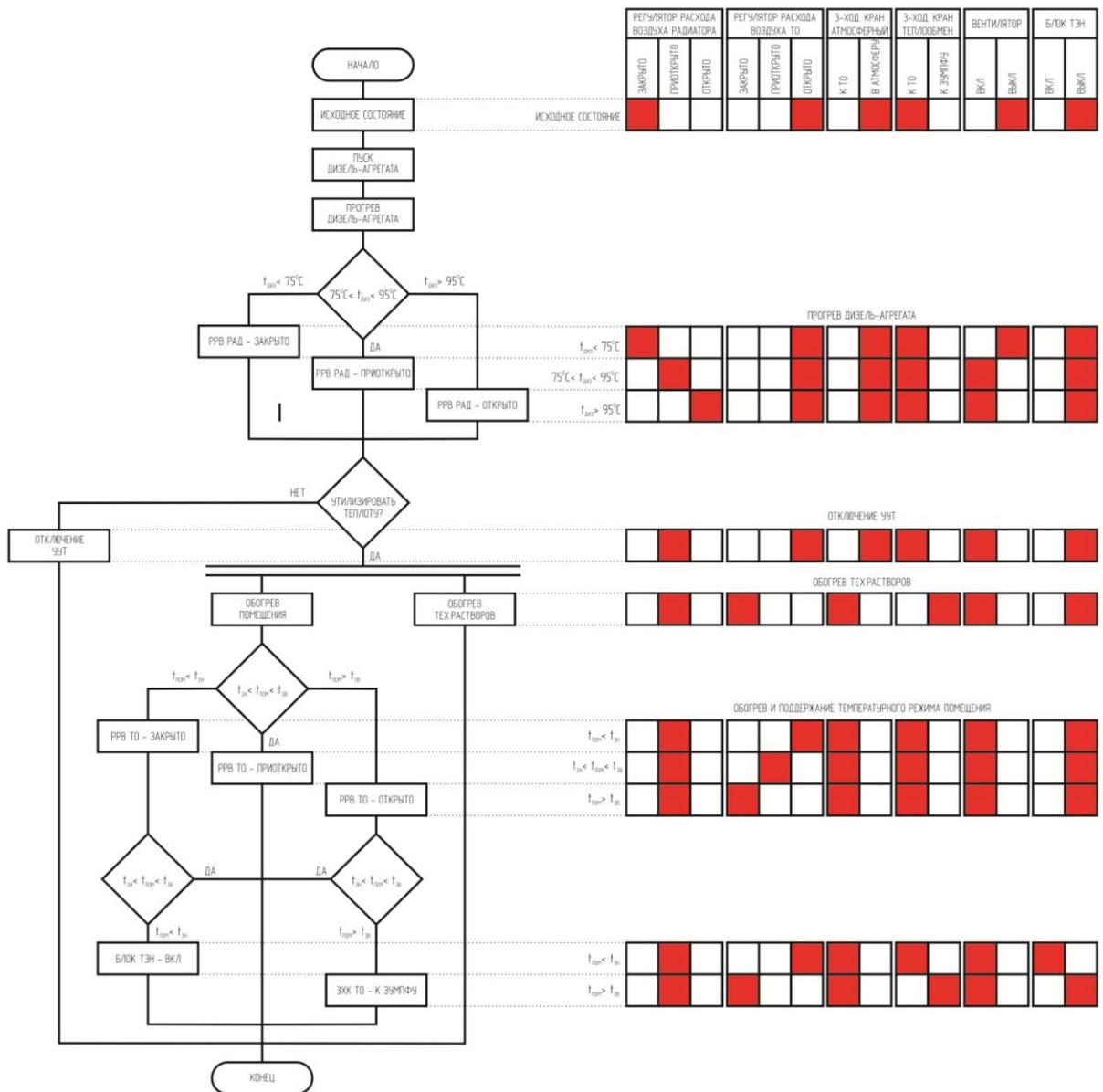


Рисунок 2.14 – Блок-схема работы АСУ УУТ и матрица состояний регулируемого оборудования и запорной арматуры.

При этом, основные состояния регулируемого оборудования, которые можно принять как штатные для обеспечения поддержания заданных температур в обогреваемом помещении буровой и системе охлаждения дизель-агрегата, целесообразно свести в единую таблицу (таблица 2.1) и принять за основу для программирования базового алгоритма работы САУ УУТ.

Таблица 2.1 – Положение заслонки-регулятора расхода воздуха радиатора (PPB P), заслонки-регулятора расхода воздуха ТО (PPB ТО), трёхходового

крана ТО (3хК ТО) и выключателя блока ТЭН (ВЫКЛ ТЭН) при различных тепловых режимах дизель-агрегата и помещения буровой.

	Дизель-агрегат не прогреет $t < 75$			Дизель-агрегат прогреет $t = 75-95$			Дизель-агрегат перегреет $t > 95$			
В помещении буровой холодно $t < 16$	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ Р
	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ ТО
	к ТО		к зумпфу	к теплообменнику		к зумпфу	к ТО		к зумпфу	3хКТО
	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВЫКЛ ТЭН
В помещении буровой комфортно $t = 16-22$	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ Р
	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ ТО
	к ТО		к зумпфу	к ТО		к зумпфу	к ТО		к зумпфу	3хКТО
	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВЫКЛ ТЭН
В помещении буровой жарко $t > 22$	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ Р
	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	Поз.1 - закрыто	Поз.2 - приоткрыто	Поз.3 - открыто	РРВ ТО
	к ТО		к зумпфу	к ТО		к зумпфу	к ТО		к зумпфу	3хКТО
	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВКЛ		ВЫКЛ	ВЫКЛ ТЭН

На основе предложенной блок-схемы, отражающей основные технологические процессы по обеспечению работы УУТ в оптимальном режиме, была разработана конструкция автоматизированной теплоутилизационной установки. Схема такой УУТ с САР приводится на рисунке 2.15.

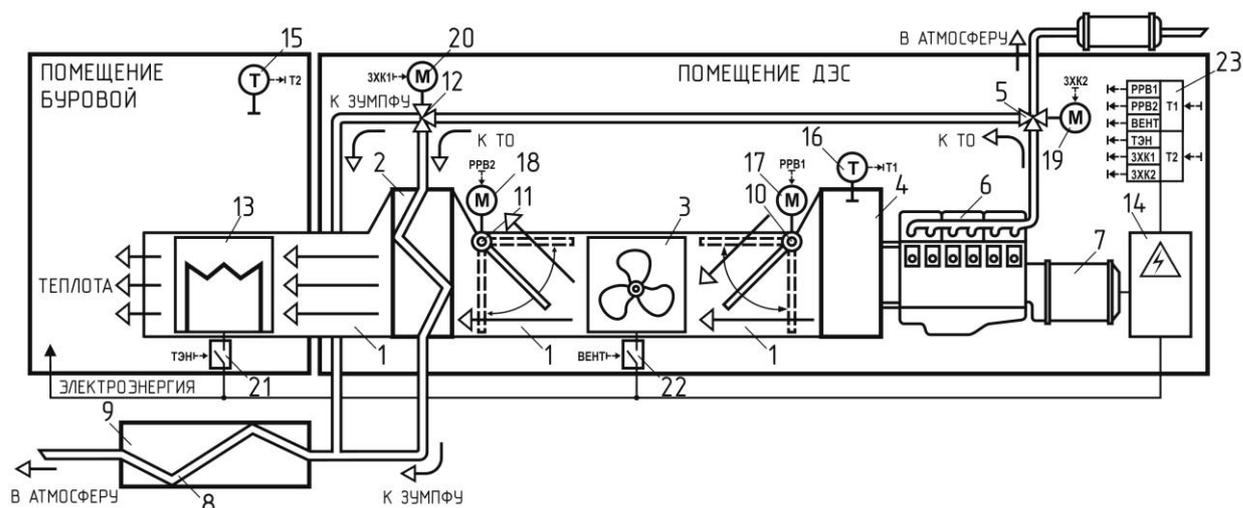


Рисунок 2.15 – Схема установки утилизации теплоты с системой автоматического регулирования.

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 предложенном варианте автоматизированной теплоутилизационной установки в качестве датчиков контроля выступают термодатчик воздуха 15 в помещении буровой и термодатчик 16 системы охлаждения дизель-агрегата, исполнительными органами являются привод регулятора расхода воздуха 18 газо-воздушного теплообменника, привод регулятора расхода воздуха 17 радиатора охлаждения дизель-агрегата, привод 3-ходового крана 19 атмосферного, привод трехходового крана 20 газо-воздушного

теплообменника, а также выключатели 21 вентилятора и 22 блока ТЭН, управляемые командами с блока управления УУТ 23.

Принцип функционирования и режимы работы теплоутилизационной установки с САР.

#### 1. Исходное состояние.

В исходном состоянии до запуска дизель-агрегата 6 регулятора расхода воздуха 10 радиатора охлаждения 4 дизель-агрегата находится в положении 1 (вертикальное, «закрыто»), перекрывая поток воздуха радиатору охлаждения, вентилятор 3 выключен, регулятор расхода воздуха 11 газо-воздушного теплообменника 2 находится в положении 3 (горизонтальное, «открыто») в готовности обеспечить максимальный расход воздуха через теплообменник, трехходовой кран атмосферный 5 находится в положении «в атмосферу», трехходовой кран газо-воздушного теплообменника 12 находится в положении «к теплообменнику», блок теплоэлектронагревателей 13 выключен.

Контур утилизации теплоты системы охлаждения дизель-агрегата управляется сигналами от термодатчика 16 системы охлаждения.

Контур утилизации теплоты выхлопных газов управляется сигналами от термодатчика воздуха 15, установленного в рабочей зоне обогреваемого помещения буровой.

Буровая жидкость в зумпфе 9 подогревается в теплообменнике зумпфа 8 остаточным теплом выхлопных газов.

#### 2. Пуск и прогрев дизель-агрегата.

При пуске и прогреве дизель-агрегата радиатор 4 вентилятором 3 не охлаждается, дизель-агрегат прогревается до температуры 75-80°C.

При достижении температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) значения 75-80°C, по сигналу с термодатчика системы охлаждения 16 блок управления 23 приводом 17 приводит регулятор расхода воздуха радиатора 10 в положение 2 (наклонное, «приоткрыто»), включает выключателем 21 вентилятор 3 и приоткрывает поток воздуха радиатору охлаждения 4.

С увеличением температуры ОЖ до 90-95<sup>0</sup>С, по сигналу с термодатчика 16 блок управления 23 приводом 17 приводит регулятор расхода воздуха радиатора 10 в положение 3 (горизонтальное, «открыто»), обеспечивая максимальный расход воздуха и наибольшее охлаждение радиатора 4.

### 3. Прогрев помещения буровой.

В том случае, если температура в помещении буровой ниже допустимых пределов ( $t_{\text{Н}} < t_{\text{ПОМ}} < t_{\text{В}}$ ), по сигналу с термодатчика 15 блок управления 23 приводом 18 приводит регулятор расхода воздуха теплообменника 11 в положение 3 (горизонтальное, «открыто»), обеспечивая максимальный расход воздуха через газо-воздушный теплообменник 2 вентилятором 3.

Если после этого температура в обогреваемом помещении не нормализуется, то по сигналу с термодатчика 15 блок управления 23 выключателем 22 включает блок ТЭН 13. За счет работы теплоэлектронагревателей, во-первых, повышается температура воздуха в помещении буровой, во-вторых, увеличивается нагрузка на дизель-генератор, тем самым повышается температура выхлопных газов, поступающих в газо-воздушный теплообменник 2. Все это приводит к быстрому увеличению температуры в обогреваемом помещении.

### 4. Поддержание заданного температурного режима.

При увеличении температуры в помещении буровой выше допустимых значений по сигналу термодатчика 15 блок управления 23 приводом 18 постепенно переводит регулятор расхода воздуха теплообменника 11 в положение 1 (вертикальное, «закрыто»), перекрывая подачу воздуха вентилятором 3 через газо-воздушный теплообменник 2. Такая регулировка вполне способна обеспечить в обогреваемом помещении заданную температуру с отклонением  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

При достижении максимальных значений температуры в обогреваемом помещении, регулятор расхода воздуха теплообменника 11 займет положение 1 (вертикальное, «закрыто») и по сигналу с термодатчика 15 блок управления 23 подаст сигнал на привод 20 трехходового крана газо-воздушного

теплообменника 12, который направит поток выхлопных газов в теплообменник зумпфа 8, минуя газо-воздушный теплообменник 2.

При возврате значения температуры в заданные границы, контролируемые термодатчиком 15, блок управления 23, переключая по необходимости трехходовой кран газо-воздушного теплообменника 12 и сочетая возможные положения регулятора расхода воздуха теплообменника 11, регулирует расход и температуру воздуха, поступающего по воздуховодам в обогреваемое помещение.

#### 5. Отсутствие необходимости в утилизации теплоты.

В этом случае по команде с блока управления 23 атмосферный трехходовой кран 5 направит поток выхлопных газов в атмосферу, вентилятор 3 обеспечивает охлаждение радиатора 4, регулятор расхода воздуха теплообменника 11 приведен в положение 1 (вертикальное, «закрывается»), расход нагретого воздуха через газо-воздушный теплообменник 2 перекрыт, система утилизации теплоты не задействована.

Таким образом, предложенная конструкция автоматизированной теплоутилизационной установки обеспечивает устойчивую работу системы в любых режимах: при прогреве двигателя, при высоких и низких электрических нагрузках, как с использованием утилизированной теплоты для обогрева помещения буровой, так и без него.

На следующем этапе для получения необходимых данных следует провести экспериментальные исследования, что позволит определить количественные и качественные факторы регулирования.

## **Основные выводы по Главе 2**

1. В качестве составляющих энергетических комплексов для теплоснабжения установок колонкового бурения могут быть успешно использованы теплоутилизационные установки с воздушным и водяным теплоносителем.

2. Наилучшие результаты в условиях ведения геолого-разведочных работ показали специализированные системы утилизации теплоты с использованием воздуха в качестве теплоносителя.

3. Основными недостатками систем утилизации теплоты с воздушным теплоносителем являются жесткая связь системы отопления буровой установки и системы охлаждения дизель-агрегата и прямая зависимость мощности утилизированного теплового потока от величины нагрузки дизель-агрегата, как следствие - не всегда эффективная работа теплоутилизационной установки в целом.

4. Выполнен расчет теплотехнических параметров дизель-агрегата и получены зависимости расхода воздуха от параметров, характеризующих работу дизель-агрегата.

5. Получена зависимость, позволяющая определить величину теплового потока в системе утилизации теплоты в связи с теплотехническими параметрами дизель-агрегата.

6. Проведен расчет конструктивных параметров теплоутилизатора, что позволило выявить основные факторы, влияющие на эффективную работу теплоэнергетической установки.

7. Получена зависимость, отражающая режим регулирования теплового потока от системы охлаждения дизель-агрегата, определяющая расход воздуха от значения температуры и учитывающая теплотехнические параметры дизель-агрегата.

8. Сформулированы направления усовершенствования конструкции УУТ, учитывающие разделения процессов охлаждения дизель-агрегата и утилизации теплоты ДЭС, при их тесной взаимной связи для обеспечения эффективной работы каждой из систем.

9. Предложена усовершенствованная конструкция теплоутилизационной установки, позволяющая полностью обеспечить тепло-электроснабжение буровой установки в различных режимах её эксплуатации.

10. Разработаны требования к системе автоматического регулирования

параметров теплоэнергетической установки, обеспечивающей эффективную работу установки в различных режимах без вмешательства оператора.

11. Предложена архитектура САР, обеспечивающая эффективное управление комплексным процессом – утилизацией теплоты ДЭС, поддержанием температурного режима дизель-агрегата и обогревом помещения буровой установки.

12. Предложена конструкция теплоутилизационной установки с САР, позволяющая обеспечить энергоснабжение буровой установки в различных режимах её эксплуатации.

## **ГЛАВА 3. ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПЕРЕДВИЖНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

### **3.1. Цели, задачи и планирование экспериментальных исследований**

На сегодняшний день систематизированный опыт эксплуатации теплоэнергетических установок при проведении геологоразведочных работ отсутствует, что создает предпосылки для серьезной работы в этой области исследований.

Проводимые в 1983-1990 г.г. на кафедре энергетики МГРИ опытно-промышленные исследования ставили своей целью выяснить практическую возможность обеспечения тепловой нагрузки буровой установки, создание и поддержание комфортных температурных условий труда буровой бригады в рабочей зоне буровой установки, а также повышение уровня противопожарной безопасности при проведении буровых работ.

В результате этих исследований был решён ряд задач, среди которых:

- сравнение различных схем утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций, в том числе на предмет их практической применимости в полевых условиях;
- оценка границ повышения КПД теплоэнергетических установок;
- определение величины теплового потока при различных режимах работы энергетической установки, при использовании различных теплоносителей и т.п.

Результаты исследований позволили экспериментально обосновать возможность эффективного применения теплоутилизационных установок при бурении геологоразведочных скважин.

Однако, при всех вышеперечисленных положительных результатах, выполненные экспериментальные исследования не ставили своей целью, и, следовательно, не решали важные задачи практического определения

оптимальных параметров и режимов работы теплоутилизационной установки.

Целью настоящих исследований является экспериментальное подтверждение полученных теоретических зависимостей величины утилизированного теплового потока от параметров дизель-агрегата, а также определение оптимальных режимов работы теплоутилизационной установки:

1. Определение величины теплового потока, поступающего в газо-воздушный теплообменник с выхлопными газами при различной нагрузке дизель-агрегата.

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

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

Решение поставленных задач позволит получить основные зависимости и статистический материал, на основе которых будет разработан вариант математической модели теплоутилизационной установки.

Исследования проводились на экспериментальной теплоутилизационной установке в лаборатории теплотехники на Сергиево-Посадском учебно-научно-производственном полигоне МГРИ-РГГРУ (рисунки 3.1 и 3.2).



Рисунок 3.1 – Фото экспериментальной теплоизоляционной установки.

В составе установки – дизельная электростанция ДЭС-60р, экспериментальная установка утилизации теплоты и комплект контрольно-измерительных приборов.

В составе ДЭС – шестицилиндровый четырехтактный дизель-агрегат А-01МЕ с трехфазным синхронным генератором ЕСС5-92-4У2, щит управления и нагрузка – электрический водонагреватель ЭВН-100 с системой принудительной циркуляции и охладителем.

Экспериментальная теплоизоляционная установка представляет собой универсальный газо-воздушный теплообменник, 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 теплообменнику.

Теплообменник кожухо-трубчатой конструкции. Выхлопные газы, проходя по трубам теплообменника, отдают теплоту нагретому воздуху, проходящему по межтрубному пространству теплообменника, отводимому, в свою очередь, по воздуховоду вентилятором от радиатора охлаждения дизель-



мощность, кВт,  $V$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с,  $T$  – температура, °С.

Нагрузка на генератор задаётся с помощью электроводонагревателя *9*, вода через который прокачивается насосом *11*, охлаждаясь в охладителе *10*. Такое нагрузочное устройство даст возможность дискретно изменять активную нагрузку на дизель-агрегате в пределах от 0 до 50 кВт шагом 10 кВт.

Охлаждение радиатора *2* дизель-агрегата *1* обеспечивается осевым вентилятором *3*, расход воздуха которого изменялся путем изменения числа его оборотов регулятором.

Перераспределение потока воздуха в воздуховоде между радиатором *2* и газо-воздушным теплообменником *б* осуществлялось шиберной задвижкой *5*. Такая схема управления воздушным потоком позволила не только изменять расход воздуха через теплообменник *б*, но и обеспечивать оптимальную рабочую температуру охлаждающей жидкости дизель-агрегата *1*.

В процессе проведения экспериментальных работ проводились замеры следующих параметров:

1. Расход топлива дизель-агрегатом.
2. Мощность на генераторе.
3. Расход воздуха через теплообменник.
4. Температура воздуха до и после газо-воздушного теплообменника.
5. Расход выхлопных газов.
6. Температура выхлопных газов до и после газо-воздушного ТО.

Все замеры указанных параметров проводились при различных нагрузках дизель-агрегата и варьируемом воздушном потоке через газо-воздушный теплообменник.

1. Расход топлива.

Для определения расхода топлива дизель-агрегата использовался объёмно-весовой способ: определение веса топлива, потребляемого дизель-агрегатом за единицу времени при постоянной нагрузке. Вес топлива

определялся с помощью механических весов РН-10Ц13У, диапазон взвешивания весов 100 г – 10 кг, точность показаний  $\pm 5$  г.

## 2. Мощность на генераторе.

Мощность на генераторе замерялась комплектом приборов К-505, включающем в себя амперметр, вольтметр, ваттметр и фазометр. Комплект К-505 позволяет определять указанные параметры в каждой фазе электрической сети с помощью переключателя фаз.

Активная мощность генератора определялась как сумма мощностей в каждой из фаз.

$$P = P_A + P_B + P_C, \text{ кВт} \quad (3.1)$$

где  $P_A, P_B, P_C$  – мощность, измеренная в фазах трехфазной сети, кВт.

Класс точности прибора составляет 0,5, т.е. предельная погрешность прибора составляет 0,5% от конечного значения рабочей части шкалы.

## 3. Расход воздуха через газо-воздушный теплообменник.

Расход воздуха через теплообменник определялся через скорость воздуха, которая замерялась чашечным анемометром МС-13 в выходном окне теплообменника при постоянном сечении.

Площадь сечения воздушного выходного окна ТОО определялась:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^2 \quad (3.2)$$

где  $D$  – диаметр выходного окна, м.

Объемный расход воздуха определялся следующим образом:

$$V_1 = S \cdot U, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.3)$$

где  $U$  – скорость воздушного потока, замеренная анемометром, м/с.

Характеристики чашечного анемометра МС-13:

- диапазон измерения средней скорости воздушного потока: 1 - 20 м/с;
- чувствительность не более: 0,8 м/с;
- предел допускаемой погрешности, не более:  $\pm(0,3+0,05)$  м/с.

Изготовлен по ГОСТ 6376-74.

## 4. Расход выхлопных газов.

Расход выхлопных газов может быть определен различными способами.

Массовый расход газов может быть получен сложением массы топлива и массы воздуха, поступающих в двигатель внутреннего сгорания

$$M_{Г} = M_{Т} + M_{ВД}, \text{ кг/с} \quad (3.4)$$

где  $M_{Т}$  – расход топлива; кг/с;  $M_{ВД}$  – расход воздуха двигателем внутреннего сгорания, кг/с.

Первый параметр замерялся при различных нагрузках дизель-агрегата объёмно-весовым способом. Расход воздуха дизель-агрегатом замерялся чашечным анемометром, по скорости воздуха через калиброванное ( $d=0,3\text{м}$ ) отверстие воздухозаборника.

5. Температура воздуха до и после газо-воздушного теплообменника.

Замеры температуры воздуха (как и температура выхлопных газов) проводились ртутными термометрами и дублировались тепловизором.

При проведении замеров использовались ртутные лабораторные стеклянные термометры типа ТЛ-4 №1-10 с диапазоном шкал  $0-50^{\circ}\text{C}$ ,  $50-100^{\circ}\text{C}$  и т.д. до  $400^{\circ}\text{C}$ . Погрешность термометров составляет  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Изготовлены по ГОСТ 2823-73 ТТ, ТУ 25-2021.003-88.

Кроме точечного замера температуры термометрами, термосъёмка контролируемых участков экспериментальной теплоутилизационной установки также осуществлялась тепловизором FLIR-і3. Это позволило получить статическую картину распределения температур на контролируемых участках, узлах и агрегатах установки. Методом наложения термографического изображения объекта совмещалось с его фотоизображением, что давало полную картину температурного поля на всех контролируемых участках установки в реальном масштабе времени.

Характеристики тепловизора FLIR-і3:

- угол обзора/минимальное фокусное расстояние:  $12,5^{\circ}\times 12,5^{\circ}/ 0,6 \text{ м}$ ;
- температурная чувствительность:  $0,15^{\circ}\text{C}$ ;
- ИК-разрешение:  $60\times 60$  пикселей;
- режимы измерений: Центральная точка;

- диапазон измеряемых температур: от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ ;
- погрешность:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  или  $\pm 2\%$  от показания.

6. Температура выхлопных газов до и после газо-воздушного теплообменника.

Температура выхлопных газов измерялась с помощью пирометрического милливольтметра МПЩПр-54 (или Ш4501), шкала которого отградуирована в  $^{\circ}\text{C}$ , и встроенных в газоотводную трубу системы газовыхлопа хромель-аллюмелиевых термопар – до и после газо-воздушного теплообменника.

При планировании эксперимента задавался объем испытаний. Под объемом испытаний мы будем понимать число замеров параметра  $n$ , которые следует провести для достоверной оценки среднего значения величины с заданной точностью  $E$  и надежностью  $T$ . Эта величина определялась по известной зависимости [21] :

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{E^2} \quad (3.5)$$

где  $t$  – аргумент функции Лапласа;  $\sigma^2$  – дисперсия показаний прибора;  $E$  – заданная точность измерений.

Как отмечает ряд авторов [21, 40], неизвестные значения дисперсии различны, что существенно влияет на объем эксперимента. Поэтому было проведено 20 замеров мощности прибором К-505, поскольку именно этот прибор имеет наименьшую точность. Полученные данные позволили определить величину дисперсии

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3.6)$$

где  $x_i$  – текущее значение замера, кВт;  $\bar{x}$  – среднее значение показаний прибора, кВт;  $n$  – число замеров.

В результате предварительной серии замеров было получено значение дисперсии 1,7.

При определении точности прибора было сделано допущение, что эта величина не превышает погрешности прибора, что для класса точности 0,5 составляет 0,5% от конечного значения рабочей части шкалы. При измерении

прибором мощности до 60 кВт максимальная погрешность прибора равна  $\pm 0,3$  кВт, что при средней мощности 30 кВт составит  $\pm 1\%$ . Полученную величину примем за точность измерения  $E$ .

Зададимся уровнем надежности 0,9 и по таблицам функции распределения [160] определим значение аргумента  $t = 1,645$ .

Минимальное число замеров определится по формуле:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\varepsilon^2} = \frac{1,645^2 \cdot 1,7}{1^2} = 4,6 \quad (3.7)$$

Таким образом, для получения среднего значения с необходимой достоверностью следует выполнить не менее 5 замеров. Получаемые при этом средние значения каждого из замеров могут быть использованы в анализе как текущие показания приборов.

### **3.2. Методика проведения экспериментальных исследований**

Экспериментальная установка утилизации теплоты с комплектом контрольно-измерительных приборов смонтирована на дизельной электростанции ДЭС-60р со ступенчатой электрической нагрузкой.

Вместо демонтированной штатной крыльчатки вентилятора охлаждения для формирования охлаждающего потока воздуха после радиатора дизель-агрегата в канале воздуховода установлен осевой вентилятор ВМ-4. Для регулирования расхода воздуха после вентилятора в канале воздуховода размещена шиберная заслонка, положение которой задавалось вручную (рисунок 3.3).

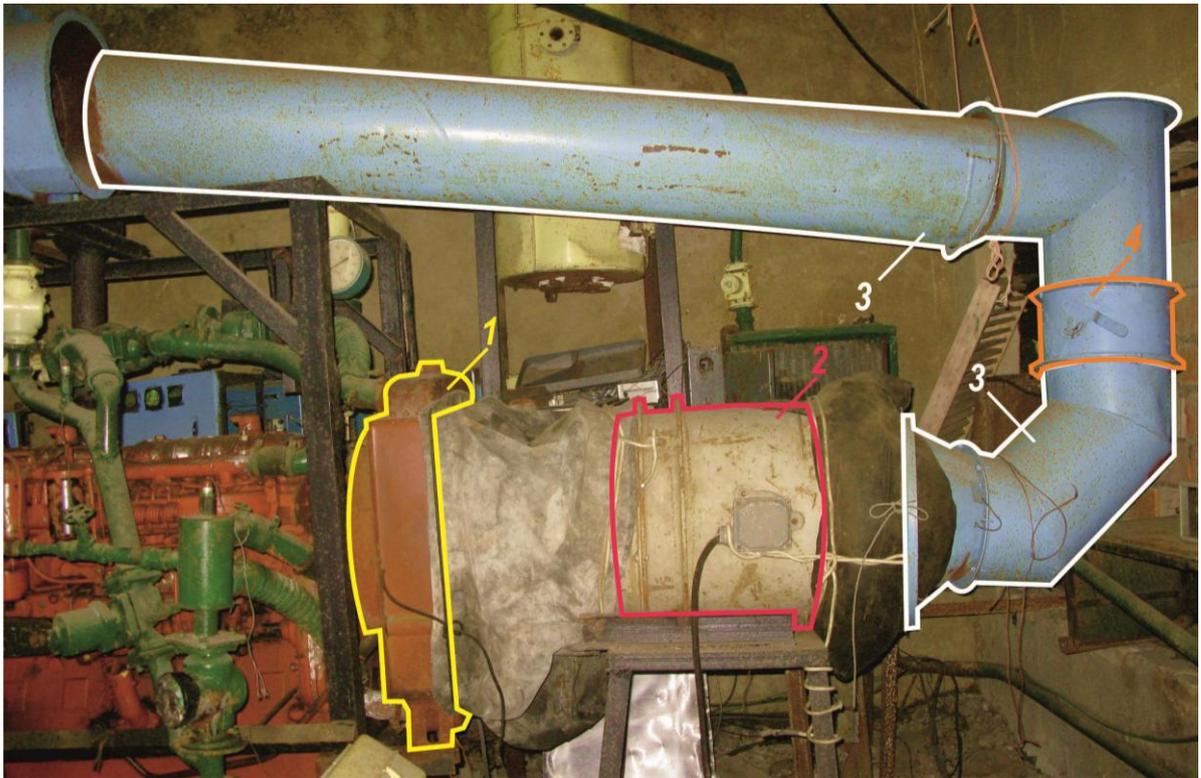


Рисунок 3.3 – Вентилятор VM-4 и шиберная заслонка в канале воздуховода для формирования и регулирования расхода воздуха после радиатора:  
1 – радиатор дизель-агрегата, 2 – вентилятор VM-4, 3 – воздуховод, 4 – шиберная заслонка.

Расход воздуха через ТО задавался изменением сечения воздухотока положением шиберной заслонки в пределах от  $2,8 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Нагрузка на генератор дизель-агрегата задавалась с помощью нагрузочного устройства, представляющего собой электрический водонагреватель ЭВН-100 мощностью 100 кВт (рисунок 3.4) подключенного к генератору ДЭС. Это позволило загружать генератор дискретно, шагом 10 кВт.

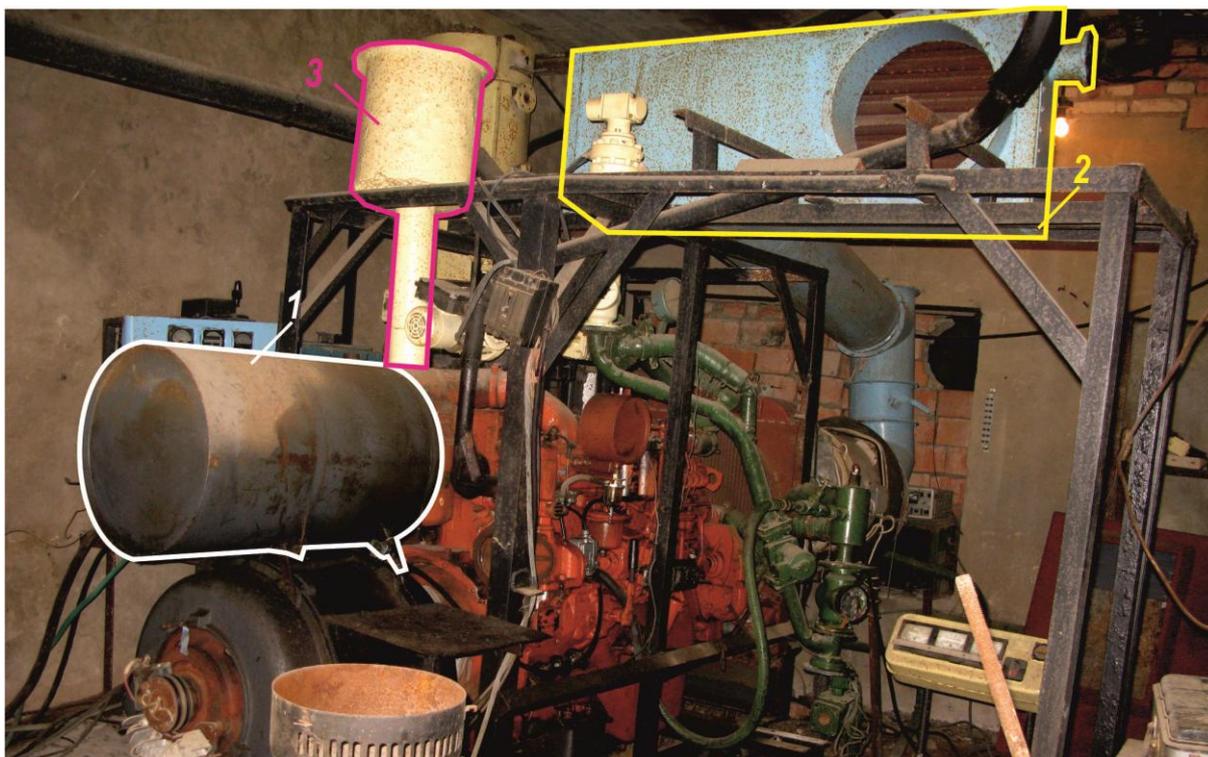


Рисунок 3.4 – Элементы экспериментальной установки:

1 – Электрический водонагреватель ЭВН-100, использовавшийся для регулирования нагрузки дизель-агрегата, 2 – газо-воздушный теплообменник, 3 – воздухозаборное калиброванное отверстие для замера расхода воздуха дизель-агрегатом.

Мощность на генераторе фиксировалась по показаниям приборов измерительного комплекта К-505, подключенного к генератору через автоматический выключатель и комплект трансформаторов тока (рисунок 3.5)

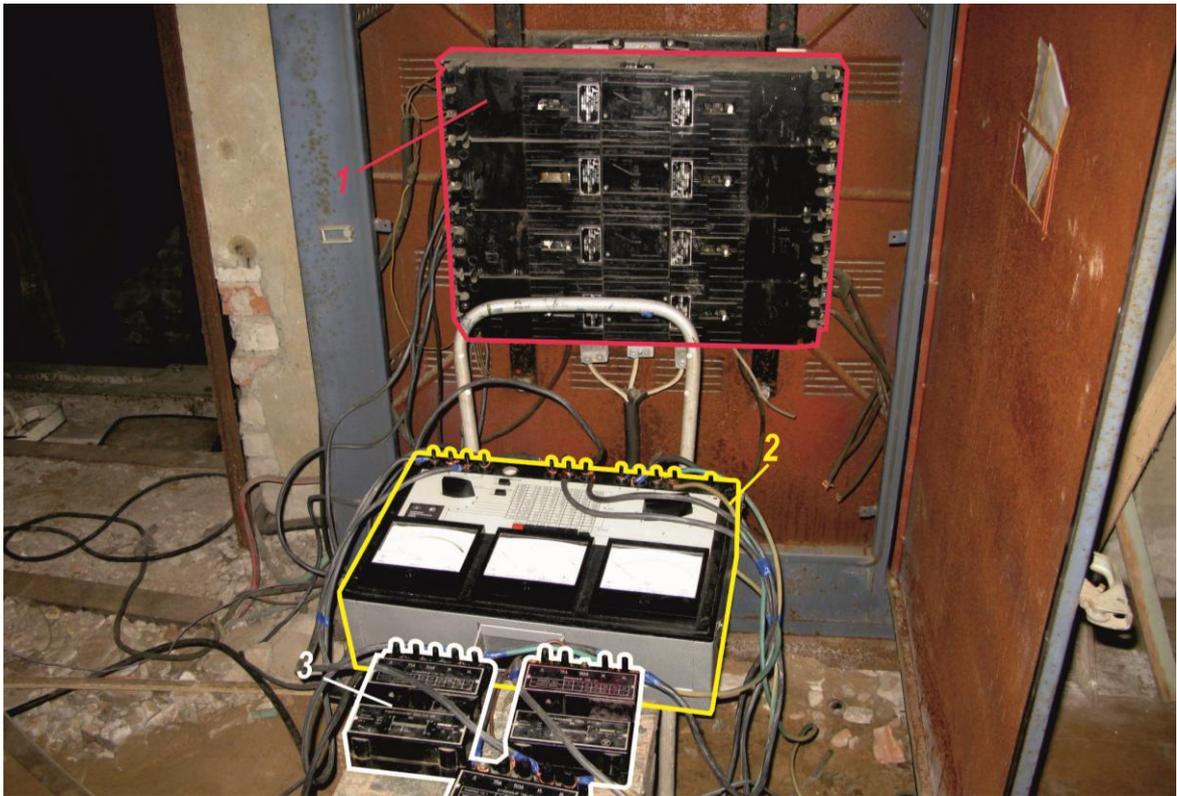
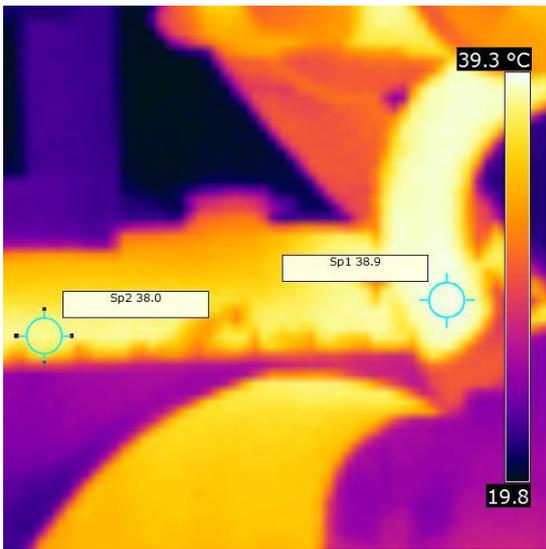


Рисунок 3.5 – Комплект К-505 для измерения нагрузки:

- 1 – распределительный щит, 2 – комплект измерительный К-505,  
3 – трансформаторы тока.

Замеры температуры теплоносителей проводились образцовыми ртутными стеклянными лабораторными термометрами и дублировались термографическими изображениями, полученными с помощью тепловизора FLIR-i3.

Температура воздуха замерялась на входе в радиатор, после радиатора и на выходе из теплообменника (рисунки 3.7, 3.8 и 3.9.)



(a)



(б)

Рисунок 3.7 – Термографическое изображение (а) и фотография (б) участка на входе в радиатор.

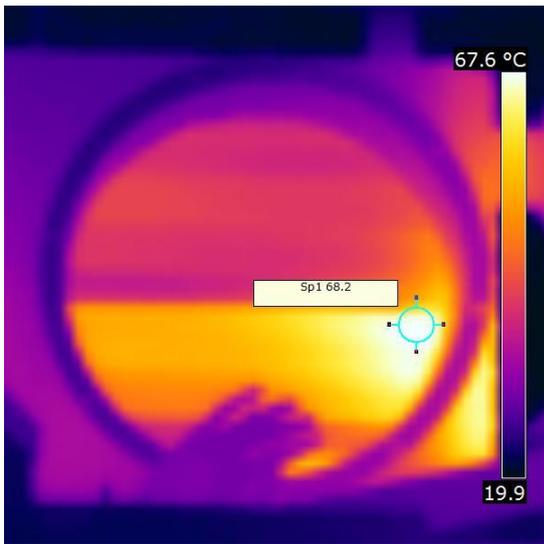


(a)



(б)

Рисунок 3.8 – Термографическое изображение (а) и фотография (б) участка после радиатора.

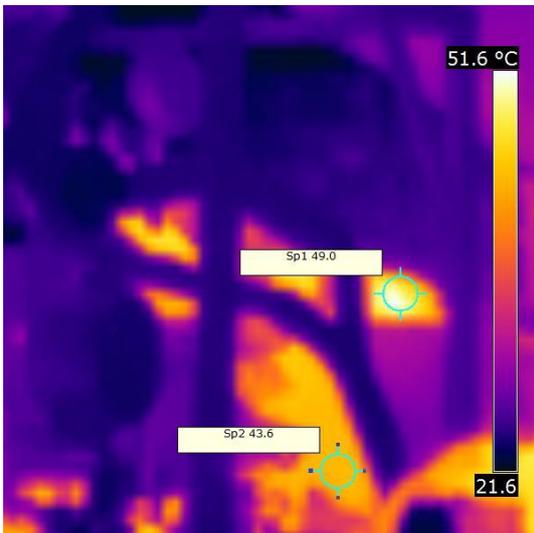


(a)

(б)

Рисунок 3.9 – Термографическое изображение (а) и фотография (б) выходного отверстия теплообменника.

Температура выхлопных газов определялась на выходе из дизель-агрегата и на выходе из теплообменника (рисунки 3.9 и 3.10)



(a)

(б)

Рисунок 3.9 – Термографическое изображение (а) и фотография (б) точки замеров температуры выхлопных газов выхлопного патрубка дизель-агрегата.

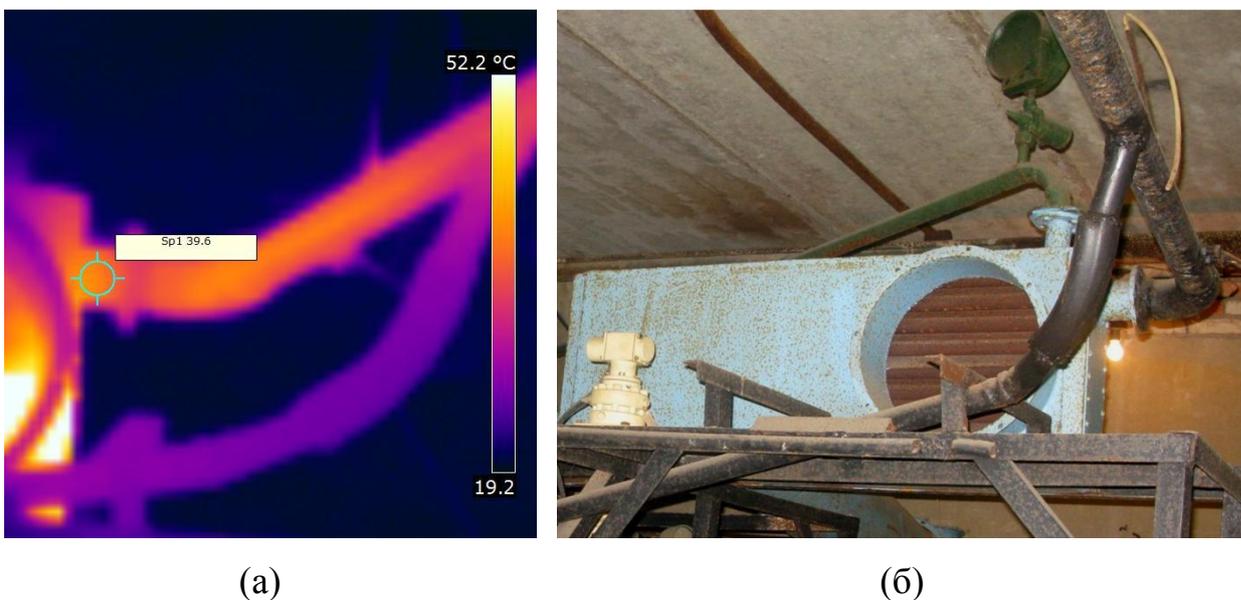


Рисунок 3.10 – Термографическое изображение (а) и фотография (б) точки замеров температуры выхлопных газов после теплообменника.

Таким образом, в процессе экспериментальных исследований:

а) задавались и фиксировались следующие параметры:

- нагрузка на генераторе дизель-агрегата;
- сечение воздухоотока от радиатора;

б) замерялись и фиксировались следующие параметры:

- расход топлива дизель-агрегатом за время цикла при постоянной установленной нагрузке;
- расход воздуха;
- расход выхлопных газов;
- температура воздуха до радиатора, после радиатора и на выходе из теплообменника;
- температура выхлопных газов до и после теплообменника.

Основные операции эксперимента и последовательность их выполнения в соответствии с методикой можно представить в виде блок-схемы (рисунок 3.11).

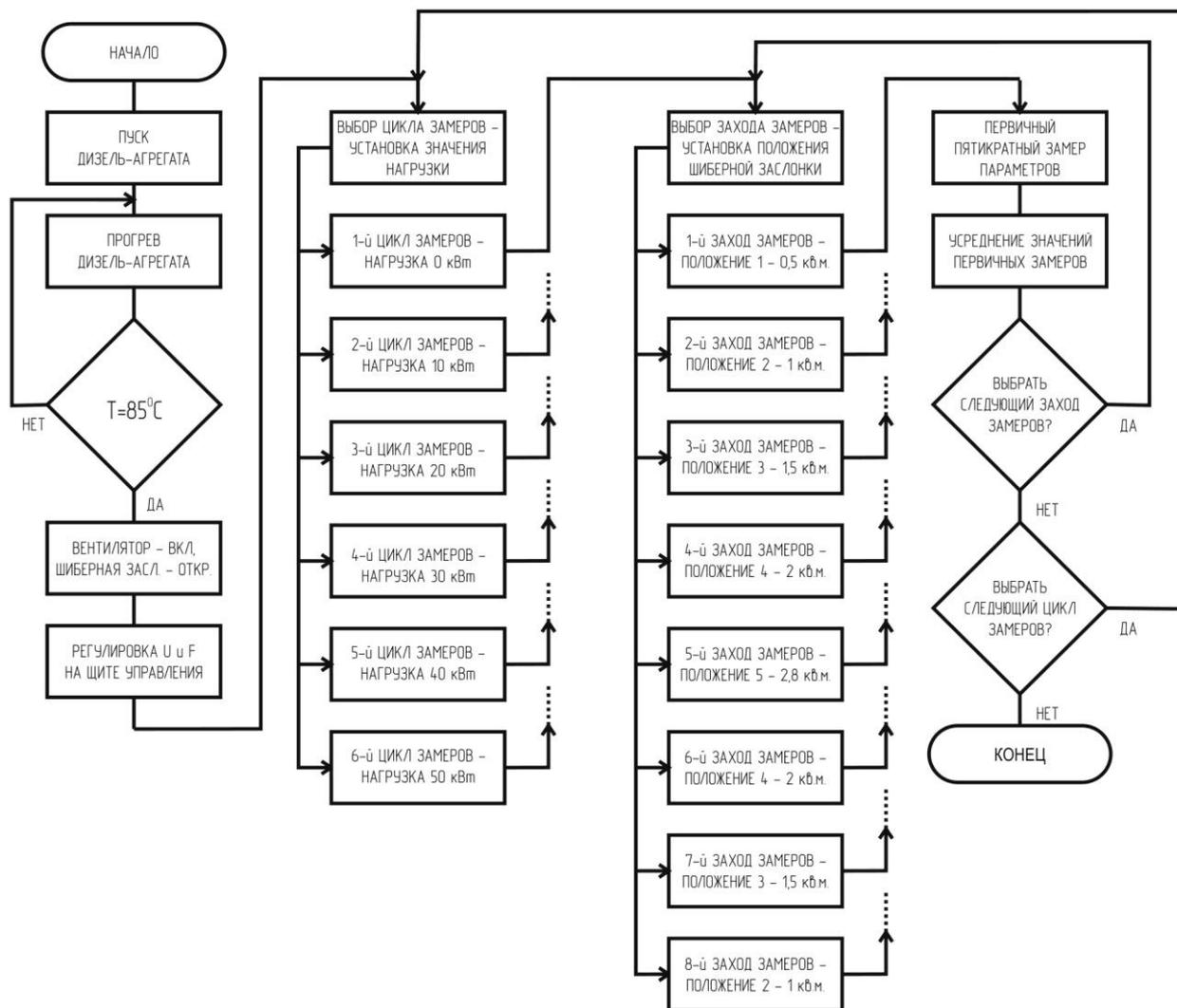


Рисунок 3.11 – Блок схема последовательности выполнения основных операций эксперимента.

Эксперимент проводился следующим образом.

1. После пуска и прогрева дизель-агрегата до  $T=85^{\circ}\text{C}$  включался вентилятор охлаждения радиатора, по приборам щита управления ДЭС выставлялось номинальное напряжение и частота переменного тока.

2. Шиберная задвижка вентилятора открывалась полностью, обеспечивая максимальную ( $2,8 \text{ м}^3$ ) площадь сечения воздухотока из пяти предусмотренных –  $0,5 \text{ м}^3$ ,  $1 \text{ м}^3$ ,  $1,5 \text{ м}^3$ ,  $2 \text{ м}^3$  и  $2,8 \text{ м}^3$ . Эти значения определяют восемь заходов замеров - пять заходов от  $0,5$  до  $2,8 \text{ м}^3$  и три проверочных захода на средних значениях -  $1 \text{ м}^3$ ,  $1,5 \text{ м}^3$  и  $2 \text{ м}^3$ .

3. На нагрузочном устройстве выставлялась необходимая нагрузка –

одно из шести предустановленных значений – 0, 10, 20, 30, 40 и 50 кВт. Эти значения определяют шесть циклов замеров. Через автоматический выключатель нагрузочное устройство подключалось к генератору дизель-агрегата.

4. После подключения нагрузки начинался отсчет времени для контроля расхода топлива дизель-агрегатом и производился один из шести циклов замеров при предустановленной нагрузке, в процессе каждого из которых производилось восемь заходов замеров при различном расходе воздуха, регулируемом изменением положения шиберной заслонки. В каждом из заходов производился пятикратный первичный замер контролируемых параметров.

5. После выполнения всех восьми заходов замеров в цикле изменялось значение нагрузки и выполнялся следующий цикл замеров в восемь заходов при регулировании расхода воздуха с 5-кратным первичным замером контролируемых параметров в каждом заходе.

Такая методика позволила провести 6 циклов по 8 заходов 5-кратных первичных замеров контролируемых параметров, что обеспечило достаточное количество статистического материала для дальнейших исследований.

По результатам пяти первичных замеров при постоянной нагрузке и фиксированном расходе воздуха определялось среднее значение контролируемого параметра. Величины таких средних значений использовались для определения необходимых параметров по следующим зависимостям.

1. Расход теплоносителя (воздуха и выхлопных газов)

$$M = U \cdot f \cdot S, \text{ кг/с} \quad (3.8)$$

где  $U$  – скорость теплоносителя, м/с;  $f$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>,  $S$  – площадь сечения, через которое истекает теплоноситель, в котором производится замер, м<sup>2</sup>.

2. Количество теплоты, образующееся при сгорании топлива в дизель-

агрегате

$$Q = \frac{GQ_H}{3600}, \text{ кВт} \quad (3.9)$$

где  $G$  – расход топлива дизелем, кг/ч;  $Q_H$  – теплота сгорания топлива (для дизельного топлива принимается  $Q_H = 42,48$  МДж/кг).

3. Тепловой поток, отдаваемый в теплообменнике выхлопными газами

$$Q_{\Gamma} = M_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} (T_2 - T_1), \text{ кВт}; \quad (3.10)$$

где  $M_{\Gamma}$  – массовый расход выхлопных газов, кг/с;  $C_{\Gamma}$  – теплоемкость выхлопных газов, кДж/кг °С,  $T_2, T_1$  – температура выхлопных газов на входе и выходе из теплообменника, °С.

1. Тепловой поток, утилизируемый воздухом радиатора дизель-агрегата

$$Q_P = M_1 \cdot C_1 (t_1 - t_0) \quad (3.11)$$

где  $M_1$  – расход воздуха, кг/с;  $C_1$  – теплоемкость воздуха, кДж/кг °С,  $t_1, t_0$  – температура воздуха до и после радиатора, °С.

5. Тепловой поток, утилизируемый от выхлопных газов в теплообменнике

$$Q_{TO} = M_1 \cdot C_1 (t_2 - t_1) \quad (3.12)$$

где  $t_1, t_2$  – температура воздуха на входе в ТО и выходе из него, °С.

6. Тепловой поток, утилизируемый воздухом

$$Q_{УТ} = Q_P + Q_{TO} = M_1 \cdot C_1 (t_1 - t_0) = M_1 \cdot C_1 (t_2 - t_1) = M_1 \cdot C_1 (t_2 - t_0), \text{ кВт} \quad (3.13)$$

7. КПД установки без использования утилизированной теплоты

$$\eta = \frac{P_{\text{э}}}{Q} \quad (3.14)$$

где  $P_{\text{э}}$  – нагрузка генератора, кВт;  $Q$  – тепловой поток, выделенный в дизель-агрегате при горении топлива, кВт;

8. КПД установки с использованием утилизированной теплоты

$$\eta = \frac{P_{\text{э}} + Q_{УТ}}{Q} \quad (3.15)$$

Результаты замеров и расчетные параметры по каждому циклу приводятся в таблице Приложения Д.

### 3.3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования эффективности утилизации теплоты ДЭС проводились в лаборатории теплотехники на Сергиево-Посадском УНПП МГРИ-РГГРУ в соответствии с разработанной методикой.

После обработки результатов исследований получена зависимость утилизированного теплового потока  $Q$  от расхода воздуха  $M$  при различных нагрузках на генераторе  $P$  (рисунок 3.12).

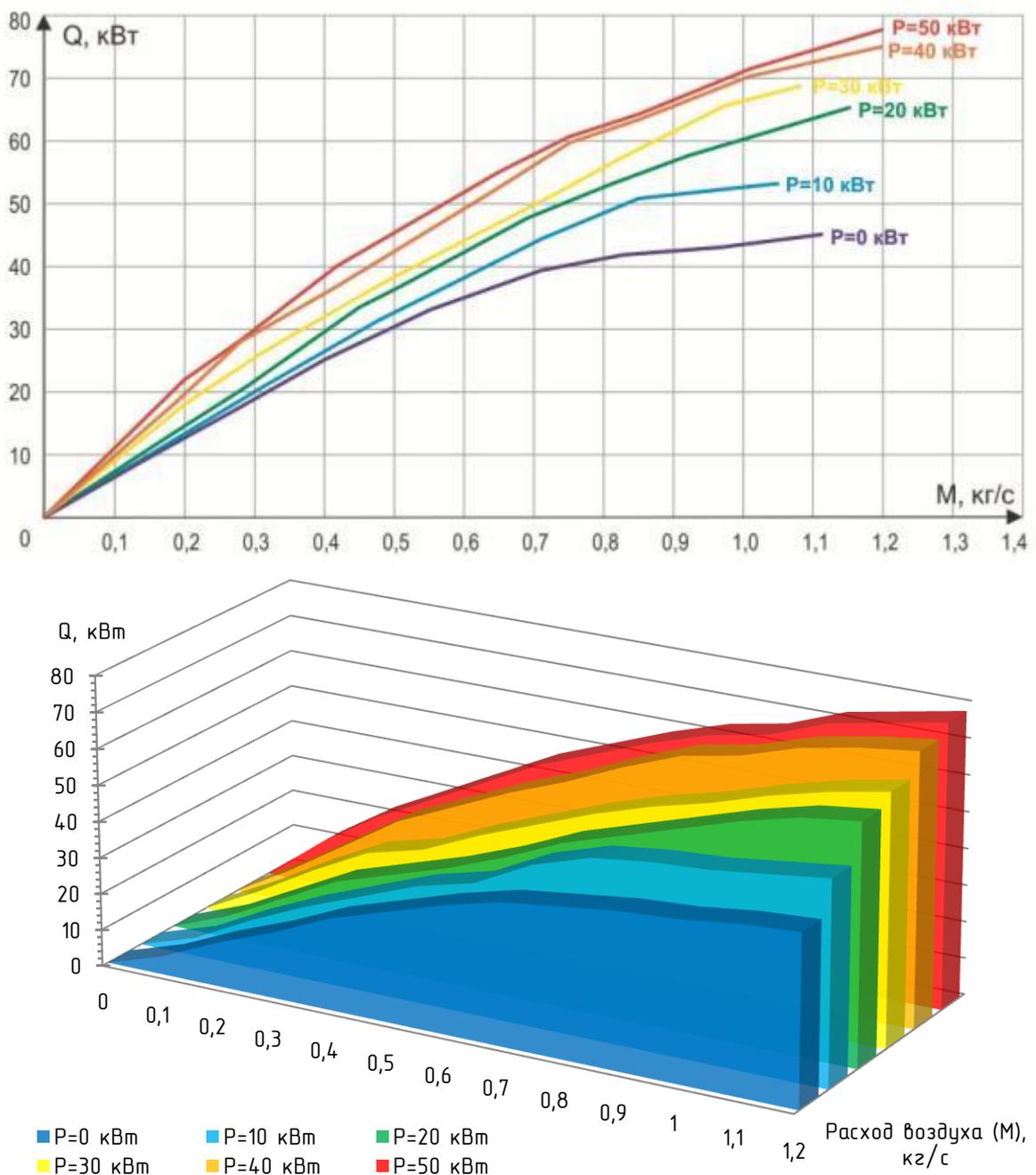


Рисунок 3.12 – Зависимость утилизированного теплового потока ( $Q$ ) от

расхода воздуха ( $M$ ) при различной нагрузке дизель-агрегата ( $P$ ).

С увеличением нагрузки от 0 до 50 кВт утилизированный тепловой поток возрастает, причем тем интенсивнее, чем выше расход воздуха. Так при расходе воздуха  $M=0,2$  кг/с изменение нагрузки на дизель-агрегат приводит к увеличению теплового потока с 12,7 кВт при  $P = 0$  кВт до 23 кВт при нагрузке 50 кВт. Этот прирост составляет около 0,246 кВт утилизированного теплового потока на 1 кВт нагрузки дизель-агрегата. При расходе воздуха 1 кг/с прирост составляет уже 0,57 кВт.

Таким образом, интенсивность изменения утилизированного теплового потока увеличивается с увеличением расхода воздуха.

Наибольшая величина утилизированного теплового потока получена при максимальной нагрузке 50 кВт и расходе воздуха 1,2 кг/с и составила 78 кВт.

При постоянной нагрузке дизель-агрегата утилизированный тепловой поток увеличивается с увеличением расхода воздуха от 0 до 45 кВт на холостом ходу и до 78 кВт при нагрузке  $P = 50$  кВт. При этом расход воздуха изменялся от 0 до 1,2 кг/с.

Следует отметить тот факт, что с увеличением расхода воздуха прирост утилизированного теплового потока снижался с 7 кВт до 1,2 кВт при изменении расхода воздуха на 0,1 кг/с. Эта величина соответствует изменению энергии от 70 до 12 кДж/кг.

На рисунке 3.13 приводится зависимость утилизированного теплового потока от нагрузки дизель-агрегата при различных расходах теплоносителя. Эта зависимость при постоянном расходе близка к линейной.

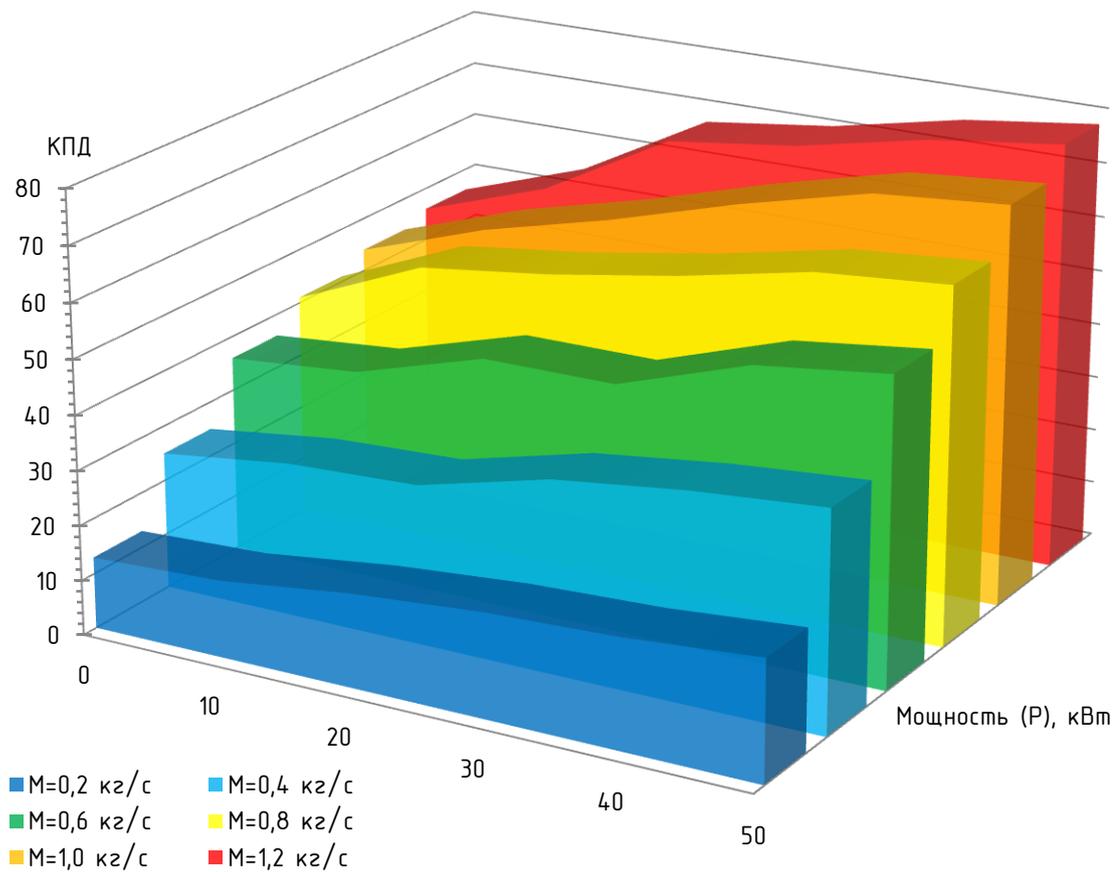
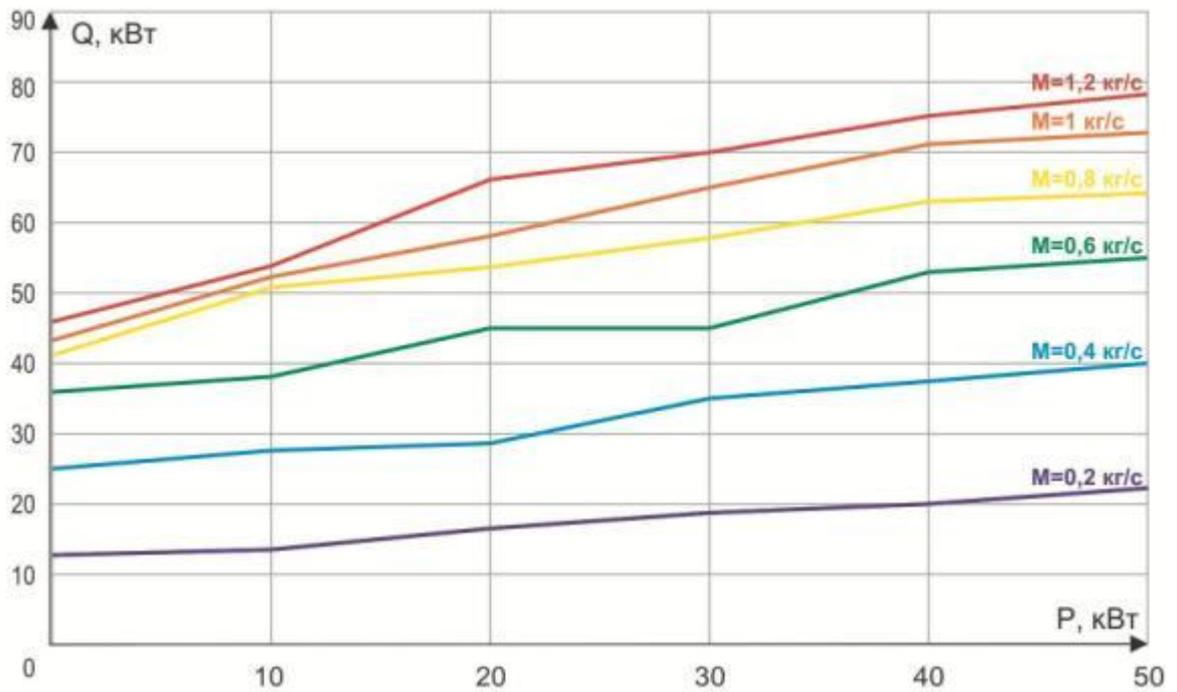


Рисунок 3.13 – Зависимость утилизированного теплового потока  $Q$  от нагрузки дизель-агрегата  $P$  при различных расходах воздуха  $M$ .

С увеличением нагрузки дизель-агрегата тепловой поток,

утилизированный в теплообменнике, возрастает, причем угловой коэффициент увеличивается при увеличении расхода воздуха.

Расход топлива дизель-агрегатом при различной нагрузке представлен на рисунке 3.14.

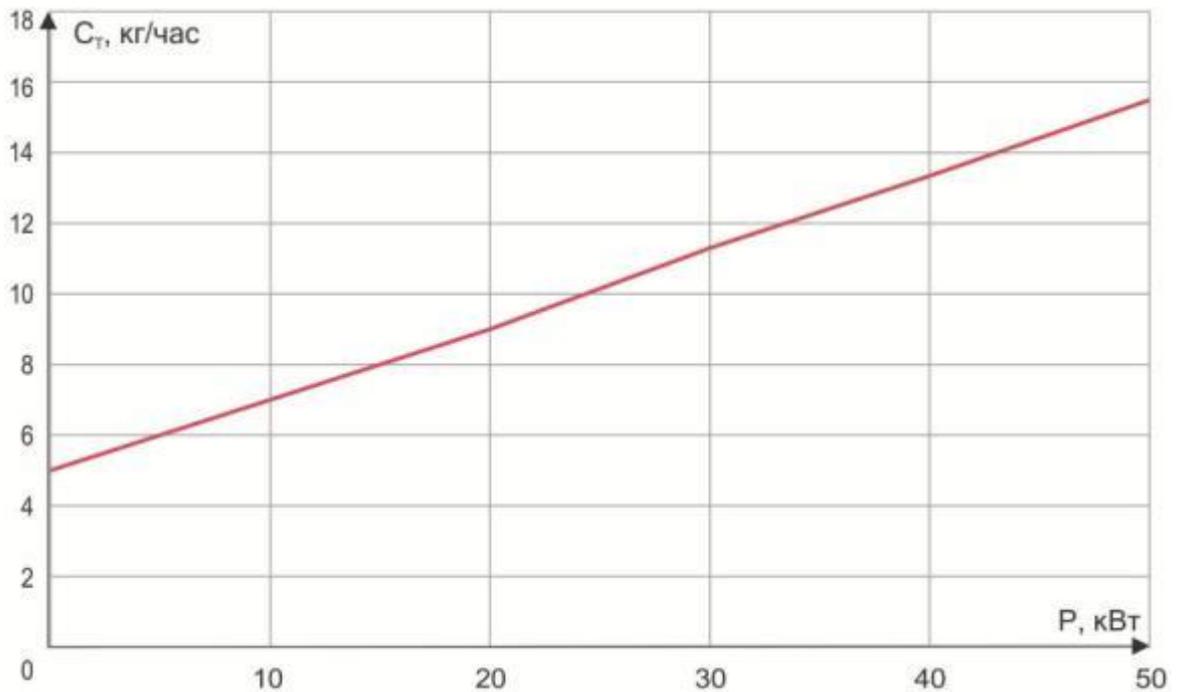


Рисунок 3.14 – Зависимость расхода топлива дизель-агрегатом  $C_T$  от нагрузки  $P$ .

Расходная характеристика дизель-агрегата носит линейный характер и может быть аппроксимирована зависимостью вида

$$C_T = C_{ТХ} + b \cdot P, \text{ кг/с} \quad (3.16)$$

где  $C_T$  – расход топлива дизель-агрегата, кг/с,  $C_{ТХ}$  – расход топлива на холостом ходу,  $b$  – прирост топлива с увеличением нагрузки кг/кВт·ч;  $P$  – нагрузка генератора дизель-агрегата, кВт.

Расход топлива на холостом ходу составляет 4,91 кг/ч и достигает 15,54 кг/ч при нагрузке 50 кВт. Коэффициент прироста топлива  $b$  может быть определен из следующей зависимости

$$b = \frac{C_{Tmax} - C_{ТХ}}{P_{max}}, \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч} \quad (3.17)$$

где  $C_{T \max}$  – расход топлива при максимальной нагрузке, кг/ч ( $C_{T \max} = 15,54$

кг/ч);  $C_{ТХ}$  – расход топлива на холостом ходу ( $C_{ТХ} = 4,91$  кг/ч);  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка дизель-агрегата ( $P_{\max} = 50$  кВт).

Подставляя измеренные значения, получим

$$b = \frac{15,54 - 4,91}{50} = \frac{10,62}{50} = 0,2124 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$$

Зависимость, описывающая расход топлива дизель-агрегата примет вид

$$Q = 4,91 + 0,2124 \cdot P, \text{ кг/ч} \quad (3.18)$$

Тепловой поток, образующийся при сгорании топлива, зависит от расхода топлива и его теплоты сгорания

$$Q = \frac{Q_P^H \cdot C_T}{3600}, \text{ кВт} \quad (3.19)$$

где  $Q_P^H$  – нижняя теплота сгорания дизельного топлива ( $Q_P^H = 42$  кДж/кг).

Максимальный тепловой поток составил 181,3 кВт при мощности 50 кВт и 57,28 кВт на холостом ходу дизель-агрегата.

Это дает возможность определить относительные параметры работы установки. Часть теплоты, которая отбирается за счет утилизации теплоты, от общего максимального теплового потока, образующегося от сгорания топлива, определялась по формуле

$$\eta_{\text{УТ}} = \frac{Q_{\text{УТ}}}{Q} 100\% \quad (3.20)$$

Зависимость доли утилизированной теплоты в зависимости от мощности на генераторе приводится на рисунке 3.15.

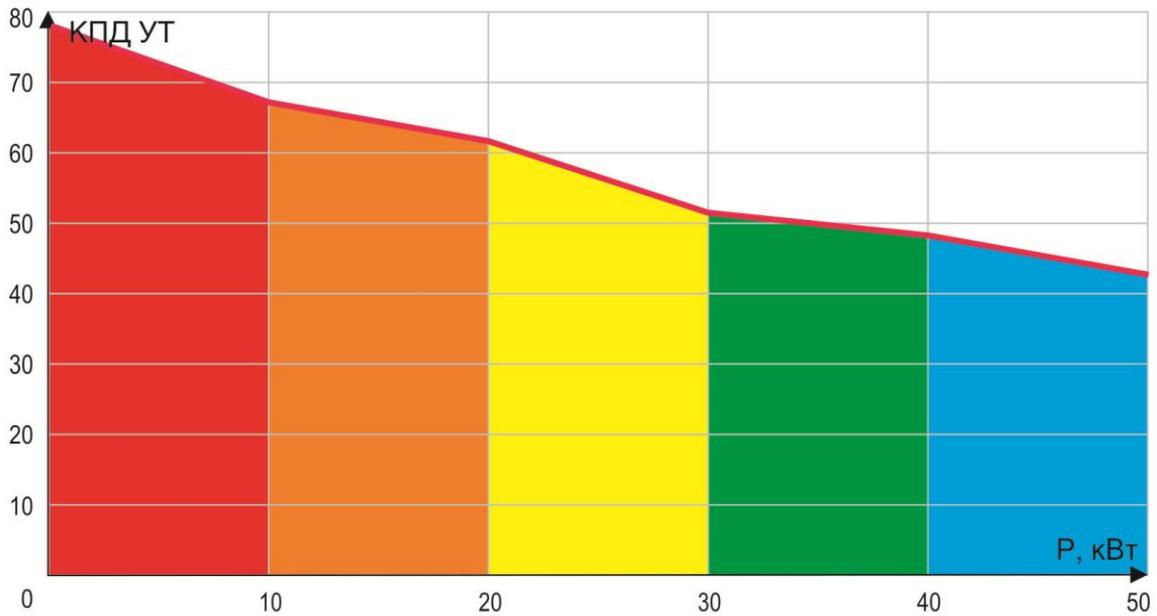


Рисунок 3.15 – Доля утилизированной теплоты в зависимости от мощности на генераторе ДЭС в общем тепловом потоке.

Эта величина изменяется от 78,0% на холостом ходу до 43,0% при нагрузке генератора P=50 кВт. При этом, доля утилизированной теплоты монотонно убывает с возрастанием нагрузки. Это связано с тем, что с увеличением нагрузки увеличивается доля теплоты, преобразующаяся в электроэнергию.

Общий КПД установки складывается из электрического КПД и КПД утилизации

$$\eta_{\text{эл}} = (P/Q) \cdot 100\% \text{ – электрический КПД;}$$

$$\eta_{\text{ут}} = (Q_{\text{ут}}/Q) \cdot 100\% \text{ – КПД утилизации;}$$

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{эл}} + \eta_{\text{ут}} = \frac{P + Q_{\text{ут}}}{Q} \cdot 100\% \text{ – общий КПД}$$

Изменение этих величин представлено (рисунок 3.16) в зависимости от мощности дизель-агрегата.

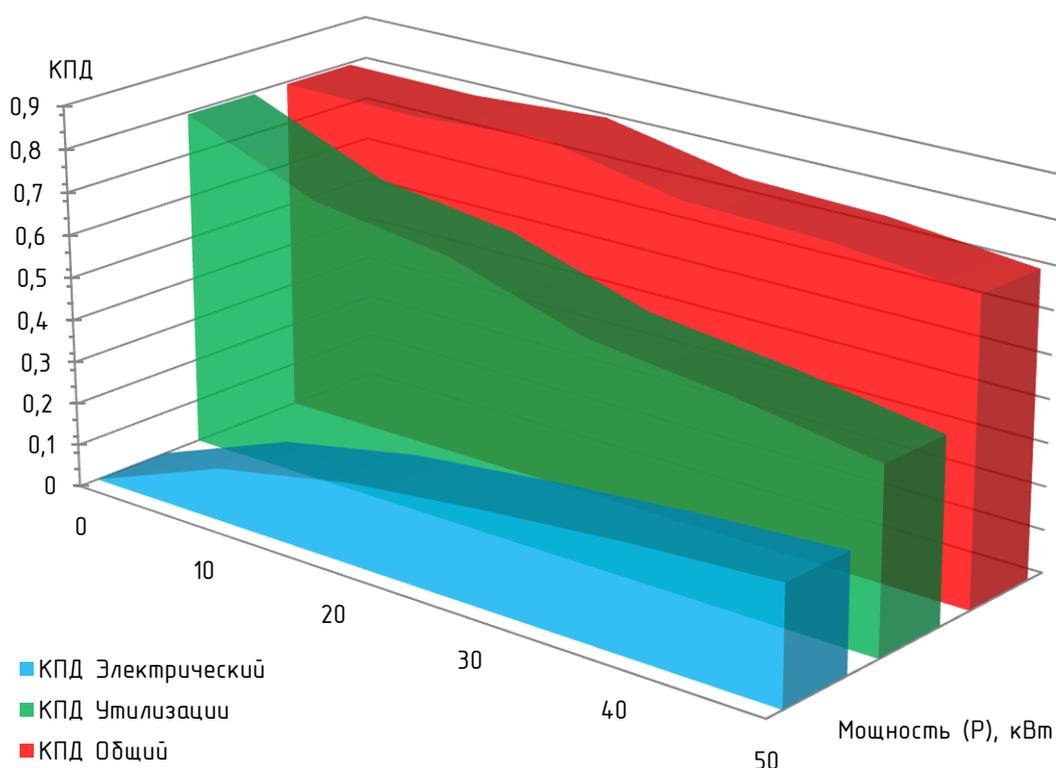
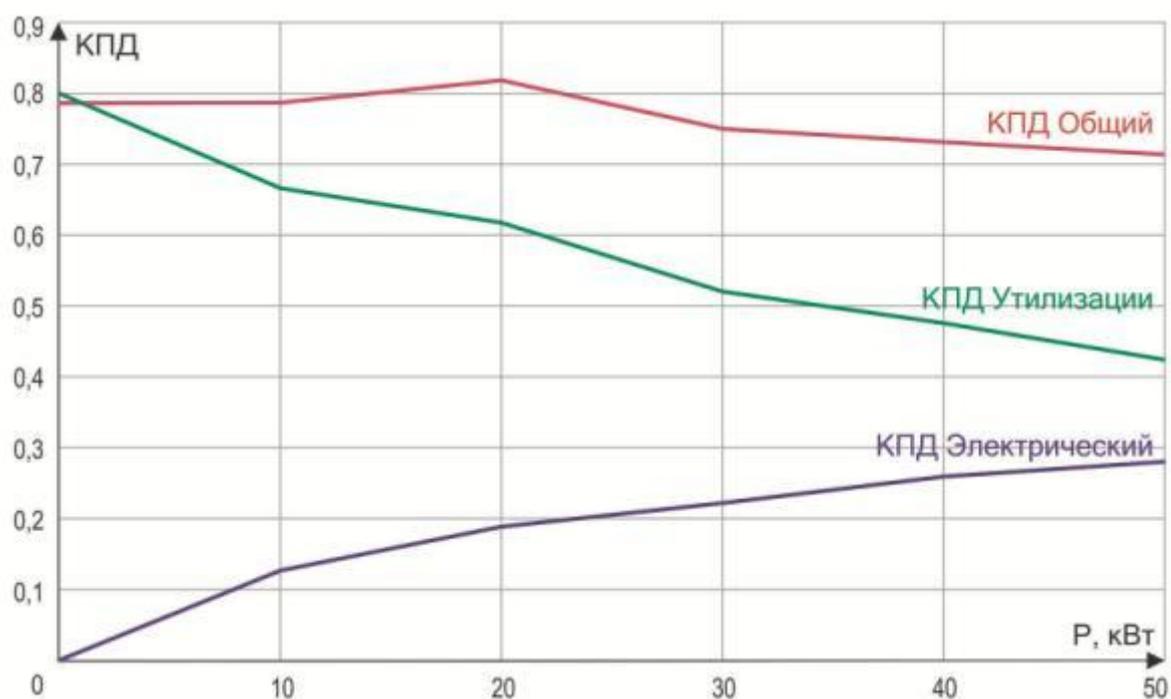


Рисунок 3.16 – Изменение КПД Утилизации, Электрического КПД и Общего КПД с изменением мощности.

Общий КПД увеличивается с 0,78 до 0,81 при достижении мощностью значения 20 кВт. Дальнейшее увеличение мощности приводит к снижению общего КПД до 0,72 при достижении мощностью значения 50 кВт.

Электрический КПД установки увеличивается с 0 на холостом ходу до 0,28 при  $P=50$  кВт.

КПД Утилизации снижается с 0,8 до 0,43 при изменении нагрузки от 0 до 50 кВт.

Снижение Общего КПД свидетельствует о том, что с увеличением нагрузки излишки теплоты утилизируются недостаточно полно. Это, видимо, связано с необходимостью интенсифицировать теплообмен при высоких нагрузках дизель-агрегата.

Доля утилизированной теплоты в общем КПД установки представлена на рисунке 3.17. Эта величина с увеличением нагрузки уменьшается от 1 на холостом ходу до 0,63 при нагрузке 50 кВт.

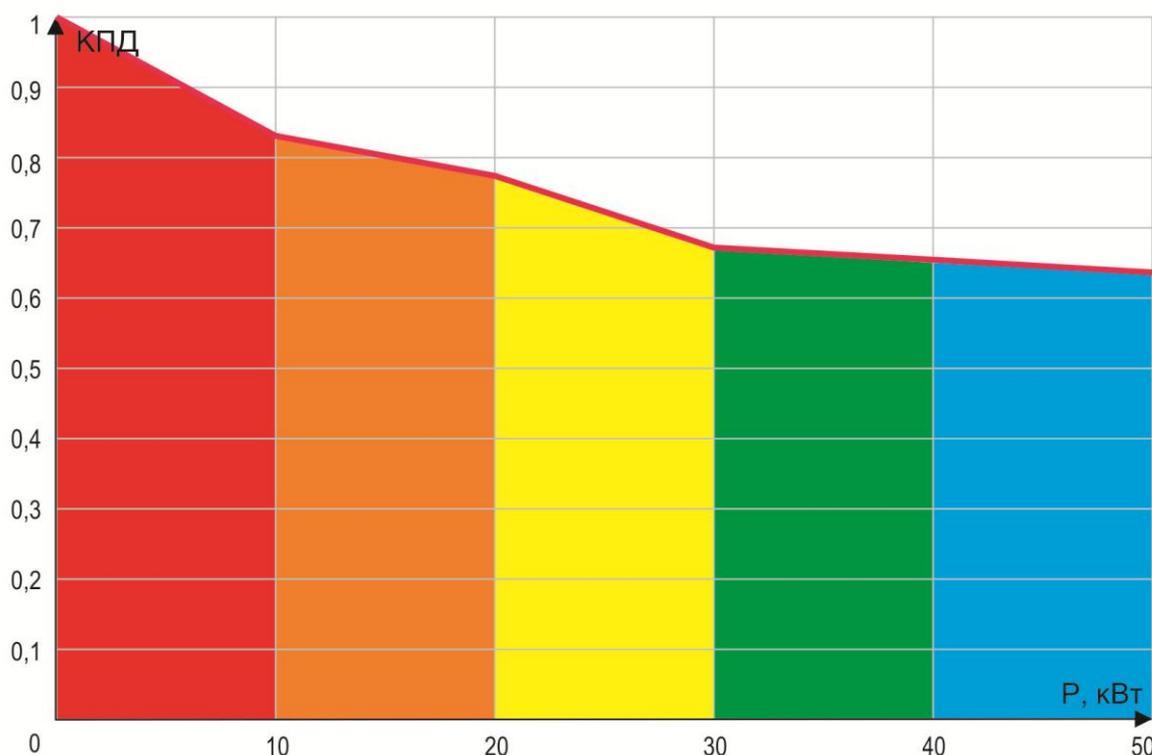


Рисунок 3.17 – Изменение доли утилизированной теплоты в общем КПД установки в зависимости от нагрузки генератора ДЭС.

Вопрос о необходимости интенсификации теплообмена можно решить на основе моделирования системы утилизации теплоты.

Проведенные испытания позволили получить массив данных,

необходимый выявления и наглядного отображения взаимных связей и зависимостей основных теплотехнических параметров дизель-агрегата. Кроме того, накопленные данные позволят на следующем этапе исследований разработать математическую модель системы утилизации теплоты, позволяющую определить величину утилизируемого теплового потока при различных нагрузках дизель-агрегата и расходах теплоносителя. Это позволит определить количественные факторы регулирования.

### **Основные выводы по Главе 3**

1. Сформулированы основные цели и задачи экспериментальных исследований, достижение которых позволит получить основные зависимости, необходимые для моделирования систем утилизации теплоты, передвижных дизельных электростанций.

2. Разработана методика экспериментальных исследований, что позволило получить достаточно обоснованные и достоверные результаты при проведении экспериментальных исследований.

3. Объем экспериментальных исследований определялся на основе статистических расчетов, что позволило получить достаточно репрезентативные данные с заданной точностью.

4. Замеры температуры проводились с использованием современной тепловизорной установки FLIR-i3, что позволило получить дополнительные данные о температурных полях и значительно повысить точность замеров, а метод наложения термоснимков объектов замеров на их фото позволил визуализировать ход эксперимента.

5. Установлена зависимость утилизированного теплового потока от расхода воздуха при различных нагрузках дизель-агрегата.

6. Наибольшая величина утилизированного теплового потока получена при мощности дизель-агрегата  $P=50$  кВт и расходе воздуха  $M=1,2$  кг/с и составила  $Q=78$  кВт.

7. Установлена зависимость величины утилизированного теплового потока от мощности дизель-агрегата при различном расходе воздуха.

8. Получена зависимость расхода топлива дизель-агрегата при различных нагрузках генератора дизель-агрегата.

9. Установлено, что КПД утилизации дизель-агрегата изменяется от 0,78 на холостом ходу до 0,43 при мощности 50 кВт.

10. В ходе исследований общий КПД установки достигал максимального значения 0,81 при мощности дизель-агрегата 20 кВт.

11. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить данные, необходимые для разработки математической модели системы утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН**

### **4.1. Выбор и обоснование параметров, входящих в модели**

Математическое моделирование находит все более широкое применение в науке и технике, в частности, для определения оптимальных параметров. В самом общем виде под математическим моделированием мы будем понимать замену технического устройства или процесса некоторой математической зависимостью, доступной для анализа средствами вычислительной математики [54].

В моделировании выделяют модели физические и абстрактные, именно к последнему виду относят математическое моделирование. В свою очередь, внутри математических моделей выделяют модели детерминированные и стохастические (или недетерминированные, вероятностные).

Как отмечает ряд авторов [15, 118], аналитические модели учитывают ограниченное число факторов, требуют определённых допущений, но именно они обеспечивают получение фундаментальных закономерностей.

Стохастические модели разрабатываются на основе статистического анализа, позволяют учитывать большое количество факторов. К недостаткам таких моделей следует отнести их низкую наглядность, громоздкость и необходимость в большом объёме статистического материала. Обычно статистические модели строятся на основе экспериментальных исследований.

В нашем случае успешно выполнено физическое моделирование, проведены экспериментальные исследования, получена выборка среднего объёма. Это делает возможным разработку статистической модели установки утилизации теплоты энергетического комплекса при бурении геолого-разведочных скважин.

Разработку математической модели рекомендуется вести по следующему алгоритму.

1. Формулировка цели, для которой разрабатывается данная модель.
2. Логический отбор факторов, в наибольшей степени влияющих на конечный параметр.
3. Сбор исходных данных, их преобразование и анализ.
4. Выбор формы связи между отобранными факторами и конечным параметром.
5. Оценка качества модели, её адекватности, значимости и точности.
6. Использование модели для анализа и прогнозирования.

1. Цель разработки математической модели – определение величины утилизированного теплового потока дизельной электростанции в различных режимах её работы. Модель разрабатывается для определения параметров оптимального режима работы.

2. Отбор факторов, включенных в модель.

На величину теплового потока, утилизированного от ДЭС, существенное влияние оказывают такие факторы, как нагрузка дизель-агрегата, расход топлива, теплотворная способность топлива, температура выхлопных газов, температура и расход воздушного потока через теплообменник.

Исследования, проведённые ранее [97, 100, 125], показывают, что основными внешними факторами, влияющими на утилизированный тепловой поток, являются нагрузка дизель-агрегата ( $P$ ) и расход воздуха ( $M$ ). Действительно, расход воздуха и температура выхлопных газов определяются величиной нагрузки генератора, которая задается внешним потребителем. Температура воздуха определяется его расходом, который так же, как и нагрузка, может рассматриваться как независимая случайная величина.

Таким образом, конечный параметр – величина утилизированного теплового потока ( $Q_{ут}$ ), зависит от двух случайных параметров - нагрузки дизель-агрегата ( $P$ ) и расхода воздуха ( $M$ ).

3. Сбор исходных данных и их анализ.

Исходными данными для построения математической модели служат результаты испытаний, полученные на опытном образце

теплоутилизационной установки. Дальнейший анализ и разработку статистической модели следует проводить на основе статистической обработки результатов испытания.

Одной из задач статистического анализа является обоснование эмпирического закона распределения случайной величины.

3.1. Проверка гипотез о нормальном законе распределения опытных данных.

Основным требованием корреляционного анализа является соответствие опытных данных многомерному закону нормального распределения. К сожалению, не существует общепринятого критерия проверки нормального закона многомерного распределения случайных величин. Обычно полагают, что закон распределения является нормальным, если одномерные распределения входящих параметров подчиняются нормальному закону распределения.

При построении гистограммы число интервалов определялось по формуле Стерджесса:  $m = 1 + 3,322 \lg n$ , а величина интервала принималась с учетом

$$K = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{m} \quad (4.1)$$

где  $n$  – число опытных данных,  $Q_{max}$ ,  $Q_{min}$  – максимальное и минимальное значение вариационного ряда, т.е. мощности теплового потока, наблюдаемые в опыте.

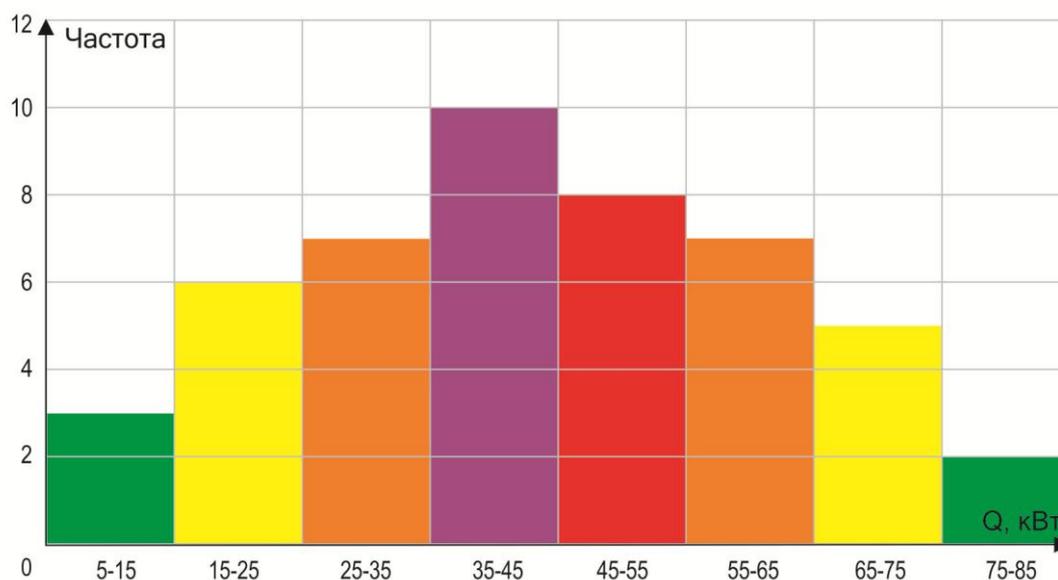


Рисунок 4.1 – Эмпирическое распределение мощности теплового потока  $Q$ , кВт

Для проверки гипотезы воспользуемся критерием Пирсона ( $\chi^2$ ), вычислим наблюдаемое значение критерия и сравним его с критическим (табличным) значением. Расчетное значение критерия определялось по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i} \quad (4.2)$$

где  $n_i$  – число значений параметра в данном интервале (эмпирическая частота),  $P_i$  – вероятность попадания в данный интервал, вычисленная с использованием функций Лапласа,  $nP_i$  – теоретическая частота.

Определение расчетного значения  $\chi^2$  приводится в Приложении А.

Критическое значение  $\chi^2$ -критерия определялось при уровне значимости  $\alpha=0,05$  для  $f$  степеней свободы, где  $f = m - r - 1 = 3$ . Значение  $\chi^2_{кр}$  составило 7,82, что превышает значение расчетное,  $\chi^2 < \chi^2_{кр}$ . Это позволяет утверждать, что гипотеза о нормальном распределении согласуется с опытными данными.

Признаком нормального распределения случайной величины является равенство коэффициента асимметрии (А) и эксцесса (Е)

$$A = \frac{\mu_3}{S^3} \quad (4.3)$$

где  $\mu_3$  – центральный момент 3-го порядка,

$$E = \frac{\mu_4}{S^4} \quad (4.4)$$

где  $\mu_4$  – центральный момент 4-го порядка, определялись по опытным данным.

Проверка проводилась с использованием t-критерия и показала, что эти величины не существенно отличаются от 0. Это также позволяет говорить о соответствии опытных данных нормальному закону распределения.

Подобным образом можно обосновать гипотезу о нормальном распределении других факторов – нагрузки дизель-агрегата (P) и расхода воздуха (M), включаемых в модель в качестве независимых переменных.

3.2. Следующим этапом статистического анализа является дисперсионный и корреляционный анализ, позволяющие выявить влияние различных факторов на результирующий параметр и оценить тесноту этих связей.

Задача многомерного корреляционного анализа состоит в определении выборочных коэффициентов корреляции. Выборочный коэффициент корреляции может быть определён по формуле [40]:

$$r_{xy} = \frac{xy - x \cdot y}{S_x S_y} \quad (4.5)$$

где  $xy$  – среднее значение произведения случайных величин  $x$  и  $y$ , включенных в модель;  $x$  и  $y$  – их средние значения,  $S_x$  и  $S_y$  – среднеквадратичные отклонения случайных величин.

Расчет выборочных парных коэффициентов приводится в Приложении Б.

Матрица парных выборочных коэффициентов корреляции примет вид:

$$q_{PM} = \begin{pmatrix} r_{qq} & r_{qp} & r_{qm} \\ r_{pq} & r_{pp} & r_{pm} \\ r_{mq} & r_{mp} & r_{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0,035 & 0,399 \\ 0,035 & 1 & 0,101 \\ 0,399 & 0,101 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

На основе матрицы определялся множественный коэффициент корреляции, который является обобщением парного коэффициента корреляции. Эта величина характеризует тесноту линейной связи величины Q и совокупности случайных параметров P и M.

Множественный коэффициент корреляции определялся по формуле

$$R_{q,pm} = \sqrt{\frac{r_{qp}^2 + r_{qm}^2 - 2r_{qp}r_{qm}r_{pm}}{1 - r_{pm}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,035^2 + 0,399^2 - 2 \cdot 0,035 \cdot 0,399 \cdot 0,101}{1 - 0,101^2}} = 0,16 \quad (4.7)$$

Величина  $R_{q,pm}$  свидетельствует о достаточно слабой линейной связи между этими параметрами. Оценка значимости проводилась по F-критерию

$$F = \frac{R_{q,mp}^2 (n-p)}{(1-R_{q,mp}^2)(p-1)} \quad (4.8)$$

где  $n$  – объем выборки ( $n=48$ ),  $p$  – число факторов, включенных в модель ( $p=3$ ), расчетное значение  $F = 0,59$ .

Критическое значение критерия Фишера определялось на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  при числе степеней свободы  $K_1=p-1$ ,  $K_2=n-p$ ,  $F_{кр}=4,06$  [40].

Расчетное значение критерия Фишера меньше критического,  $F < F_{кр}$ , следовательно, множественный коэффициент корреляции  $R_{q,pm}$  не является значимым.

Вероятнее всего, низкое значение коэффициента корреляции объясняется нелинейной формой связи между параметрами.

Для оценки тесноты нелинейной связи в Приложении 4.2 приведен расчет эмпирических корреляционных отношений для параметров Q, P и M. Корреляционное отношение показывает долю межгрупповой дисперсии в общей дисперсии. Остаточная дисперсия характеризует изменчивость неучтенных факторов, а межгрупповая дисперсия отражает ту часть вариации, которая связана с изменением параметров P и M.

Оценка эмпирических корреляционных отношений проводилась по следующей зависимости.

$$\eta_{yx} = \sqrt{\frac{\delta_{iy}^2}{S_y^2}} \quad (4.9)$$

где  $\delta_{iy}^2$  – межгрупповая дисперсия,  $S_y^2$  – общая дисперсия.

Корреляционные отношения для утилизированного теплового потока (Q) и нагрузки дизель-агрегата (P)  $\eta_{qp} = 48$ . Проверка значимости корреляционного отношения проводилась по критерию Фишера

$$F = \frac{\eta_{qp}^2 (n-m)}{(1-\eta_{qp}^2)(m-1)} \quad (4.10)$$

где n – объем выборки, m – число переменных.

Эта величина составила  $F = 6,88$ , что больше табличного значения  $F_{кр}$ . Это позволяет утверждать при уровне значимости  $\alpha=0,05$  величина  $\eta_{qp}$  значимо отличается от нуля.

Для переменных Q и M коэффициент  $\eta_{qm}$  также является значимым. Параметры P и M практически не коррелируют между собой ( $\eta_{pm} = 0,000644$ ) и могут быть использованы как независимые переменные, что исключает мультиколлениарность в разрабатываемой модели.

Таким образом, проведенный корреляционный анализ результатов испытаний теплоутилизационной установки позволил установить, что:

- на величину теплового потока (Q), утилизируемого установкой, существенное влияние оказывают два фактора - нагрузка генератора (P) и расход воздуха (M);

- величина теплового потока в большей степени определяется расходом воздуха, о чем свидетельствует более высокое корреляционное отношение этих параметров;

- параметры P и M могут рассматриваться, как независимые переменные, т.к. корреляционная связь между ними крайне низка и незначительна;

- форма связи между зависимой переменной Q и параметрами P и M носит нелинейный характер.

## 4.2. Разработка уравнения регрессии по опытным данным

Определение уравнения поверхности  $y=f(x_1, x_2)$ , описывающего исходные данные с той или иной степенью точности, значимости и адекватности, является задачей регрессионного анализа. В самом общем виде уравнение множественной регрессии имеет вид

$$y=f(x_1, x_2)+\varepsilon \quad (4.11)$$

где  $x_1, x_2$  – входящие параметры, независимые переменные,  $\varepsilon$  – случайная ошибка, характеризующая отклонение функции регрессии от опытных данных.

Случайная ошибка должна быть величиной случайной с нормальным распределением, что необходимо для оценки точности уравнения регрессии. Такая оценка может проводиться по выборочной остаточной дисперсии

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-2} \quad (4.12)$$

Параметры уравнения регрессии могут быть определены методом наименьших квадратов. Суть метода сводится к тому, что параметры уравнения регрессии выбираются исходя из условия минимума суммы квадратов отклонений опытных данных и рассчитанных по уравнению регрессии

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum (y_{x_i} - y_i)^2 \Rightarrow \min \quad (4.13)$$

где  $y_{x_i}$  – значение, рассчитанное по уравнению регрессии,  $y_i$  – значение, полученное эмпирически.

Этот метод позволяет снизить случайную ошибку эксперимента.

Сгруппируем опытные данные в группы при постоянной мощности. Из рисунка 3.11 видно, что характер изменения величины утилизированного теплового потока ( $Q$ ) от расхода воздуха ( $M$ ) имеет зависимость, близкую к логарифмической. Поэтому аппроксимацию зависимости  $Q = f(M)$  при  $P = \text{const}$  будем проводить функцией вида

$$Q = a + b \ln M, \text{ кВт} \quad (4.14)$$

где  $a$  и  $b$  – искомые коэффициенты уравнения регрессии,  $M$  – расход воздуха, кг/с.

Для приведения функции к линейному виду введем замену  $Q = y$ ,  $\ln M = x$ , тогда уравнение регрессии примет вид

$$y = a + bx \quad (4.15)$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам [29]

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (4.16)$$

$$b = \frac{xy - \bar{x} \cdot \bar{y}}{x^2 - (\bar{x})^2} \quad (4.17)$$

где  $xy$  – среднее значение произведения,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – средние значения параметров,  $x^2$  – среднее значение квадрата параметра  $x = \ln M$ . В Приложении Г приведены данные для расчета коэффициентов уравнения регрессии при  $P = 0$ . В Таблице 4.3. Приложения Г расход воздуха преобразован в логарифм этого параметра.

Значение коэффициента  $b$  определялось следующим образом.

$$b = \frac{xy - \bar{x} \cdot \bar{y}}{x^2 - (\bar{x})^2} = \frac{-12,83 - (-0,66)(32,12)}{0,87 - (-0,66)^2} = 18,78$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} = 32,12 - 18,78 \cdot (-0,66) = 44,43$$

Таким образом, уравнение регрессии примет вид:

$$y = 44,43 + 18,78 \cdot x \quad (4.18)$$

Проведя обратную замену  $x$  и  $y$ , получим

$$Q_0 = 44,43 + 18,78 \ln M, \text{ кВт при } P = 0 \text{ кВт.}$$

На рисунке 4.2 приводится график зависимости  $Q_0$  с наложенными экспериментальными точками.

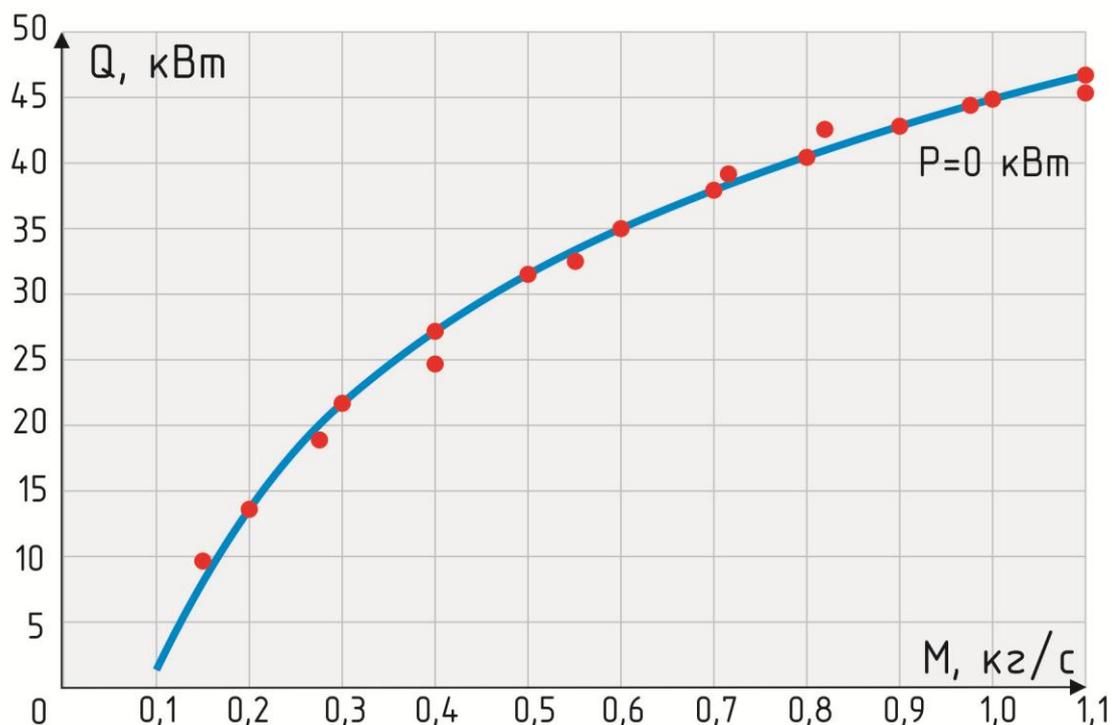


Рисунок 4.2 – График зависимости  $Q_0$

Расчет по этой зависимости должен достаточно качественно воспроизводить опытные данные. Рассеивание расчетных данных относительно экспериментальных значений можно оценить коэффициентом вариации  $Y$ :

$$Y = \frac{\sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}}{\bar{y}} \cdot 100\% = \frac{1,53}{32,12} \cdot 100\% = 4,78\% \quad (4.19)$$

Значение коэффициента вариации  $Y$  не превышает 10%, что говорит о хорошей сходимости расчетных и опытных данных.

Подобные расчеты были проведены для всех интервалов мощности: 0, 10, 20, 30, 40 и 50 кВт, что позволило получить аналогичные зависимости при различных значениях постоянной мощности. Результаты приводятся в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Рассчитанные значения коэффициентов регрессии и вариации.

Мощность P, кВт	Уравнение регрессии $Q = a + b \ln M$	Коэффициенты уравнения		Коэффициент вариации $Y$ , %
		a	b	
0	$Q = 44,43 + 18,78 \ln M$	44,43	18,78	4,78

10	$Q = 52,24 + 23,92 \ln M$	52,24	23,92	6,18
20	$Q = 59,36 + 29,19 \ln M$	59,36	29,19	5,05
30	$Q = 63,62 + 30,56 \ln M$	63,62	30,56	6,78
40	$Q = 68,67 + 31,93 \ln M$	68,67	31,93	7,73
50	$Q = 70,38 + 31,85 \ln M$	70,38	31,85	4,69

Для всех уравнений регрессии коэффициенты вариации не превышали 10%. В пределах одного интервала мощности получены уравнения регрессии, вполне удовлетворительно описывающие экспериментальные данные. Анализ коэффициентов уравнений регрессии приводится в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Корреляция коэффициентов и мощности

0	-25	625	-15,35	235,623	383,75	-8,92	79,5664	223
10	-15	225	-7,54	56,8516	113,1	-3,78	14,2884	56,7
20	-5	25	-0,42	0,1764	2,1	1,49	2,2201	-7,45
30	5	25	3,84	14,7456	19,2	2,86	8,1796	14,3
40	15	225	8,89	79,0321	133,35	4,23	17,8929	63,45
50	25	625	10,6	112,36	265	4,15	17,2225	103,75
25		1750		498,788	916,5		139,37	453,75
					839972			
						205889		

ra =	0,9623	0,98097
rb =	0,84416	0,91878

Анализ показал, что коэффициенты уравнений регрессии зависят от мощности  $P$ . Теснота линейной связи между коэффициентом  $a$  и мощностью, определяемая через коэффициент корреляции, составила для коэффициента  $a$ :  $r_a = 0,98$ , и для коэффициента  $b$ :  $r_b = 0,92$ . Это позволяет аппроксимировать значения коэффициентов через мощность дизель-агрегата функцией вида

$$a = a_1 + b_1 P \text{ и } b = a_2 + b_2 P \quad (4.20)$$

В результате регрессивного анализа были получены следующие зависимости для коэффициентов:

$$a = 46,69 + 0,57 \cdot P \text{ и } b = 21,22 + 0,259 \cdot P$$

Подставив уравнения для коэффициентов в уравнение регрессии

получим общую зависимость величины теплового потока от расхода воздуха и мощности дизель-агрегата

$$Q = (46,69 + 0,57 \cdot P) + (21,22 + 0,259 \cdot P) \cdot \ln M, \text{ кВт} \quad (4.21)$$

где  $P$  – мощность дизель-агрегата, кВт,  $M$  – расход воздуха, кг/с.

На рисунке 4.3 показана расчетная зависимость величины теплового потока от расхода воздуха при различной мощности, построенная по общему уравнению регрессии.

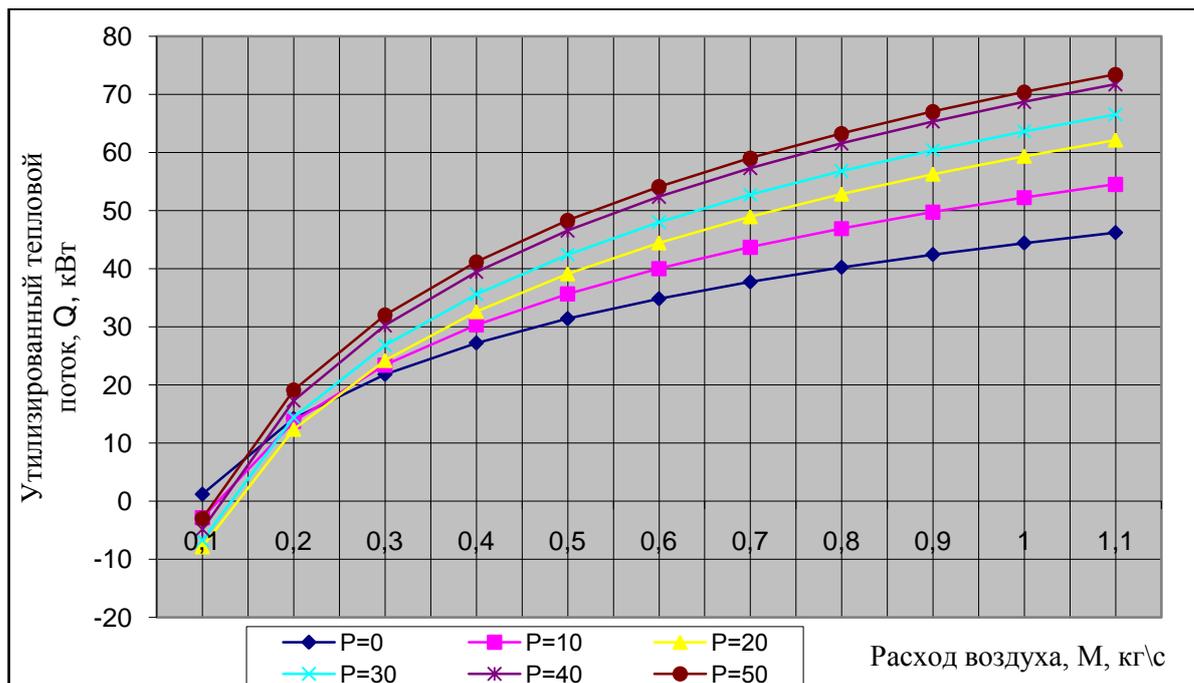


Рисунок 4.3 – Зависимость величины теплового потока от расхода воздуха при различной мощности.

Однако, для моделирования, составления прогнозов, определения параметров регулирования и оптимальных режимов работы следует оценить качество полученного уравнения регрессии. Только после обоснования значимости, адекватности и точности эту зависимость можно использовать в качестве математической модели системы утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций.

### 4.3. Оценка качества уравнения регрессии

Применение математической модели для изучения свойств технического объекта будет эффективным только в том случае, если эта модель удовлетворяет некоторым требованиям, называемым качеством модели. Основными из таких требований являются точность модели, её адекватность и значимость.

Точность – приемлемое совпадение значений, полученных с помощью модели и реальных значений [40]. В качестве оценки точности выступает вектор величины отклонений  $\varepsilon = \{y_i - y_i^0\} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_i, \varepsilon_n\}$ , точечной характеристикой такого вектора может служить среднее линейное отклонение

$$d = \frac{\sum |y_i - y_i^0|}{n} \quad (4.22)$$

где  $y_i$  – наблюдаемое значение параметра,  $y_i^0$  – значение параметра, полученное с помощью модели,  $n$  – число опытов.

В определенной степени оценкой точности может быть дисперсия или среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_i^0)^2}{n-2}} \quad (4.23)$$

Это абсолютные усредненные показатели. В качестве относительной оценки точности может выступать обобщенный коэффициент вариации

$$\Upsilon = \frac{\sigma}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (4.24)$$

Расчет обобщенного коэффициента вариации приводится в Приложении Д. Обобщенный коэффициент вариации составил

$$\Upsilon = \frac{2,58}{43,48} \cdot 100\% = 5,93\%$$

Эта величина принимает значение менее 10%, что свидетельствует о точности модели, т.е. приемлемом совпадении реальных значений теплового потока и воспроизводимых моделью.

Адекватность – способность модели воспроизводить параметры объекта

с относительной ошибкой, не превышающей некоторого заданного значения [40]. В качестве характеристики адекватности рекомендуется использовать коэффициент детерминации, как меру качества уравнения регрессии, характеристику его прогностической силы. Для многофакторных моделей предпочтительнее использование скорректированного коэффициента детерминации  $\check{R}^2$ , который определяется по формуле

$$\check{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1 - R^2) \quad (4.25)$$

где  $p$  – число внутренних факторов, включаемых в модель,  $R^2$  – множественный коэффициент детерминации.

Множественный коэффициент корреляции определяется следующим образом

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E}} \quad (4.26)$$

где  $E_R = E - E_e$ ,  $E$  – общая сумма квадратов отклонений,  $E_R$  – сумма квадратов отклонений, обусловленная регрессией,  $E_e$  – остаточная сумма, характеризующая влияние неучтенных факторов. Тогда

$$R = \sqrt{1 - \frac{E_e}{E}} \quad (4.28)$$

Значение  $R$  находится в интервале от  $-1$  до  $+1$  и чем ближе величина  $R^2$  к  $1$ , тем лучше регрессия описывает реальный процесс.

Расчет множественного коэффициента корреляции приводится в Приложении Д.

В нашем случае множественный коэффициент корреляции примет вид

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(Q_i - Q_i^0)^2}{\sum(Q_i - Q_{cp})^2}} \quad (4.29)$$

где  $Q_i$  – текущее значение теплового потока, полученное экспериментально, кВт;  $Q_i^0$  – текущее значение теплового потока, полученное по уравнению регрессии, кВт;  $Q_{cp}$  – среднее значение теплового потока, кВт.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(Q_i - Q_i^0)^2}{\sum(Q_i - Q_{cp})^2}} = \sqrt{1 - \frac{320,07}{4173808}} = 0,99$$

Высокое значение коэффициента корреляции говорит об адекватности модели.

Определим скорректированный коэффициент детерминации

$$\check{R}^2 = 1 - \frac{48-1}{48-2-1} (1 - 0,99) = 0,989 \quad (4.30)$$

Скорректированный коэффициент детерминации  $\check{R}^2 = 0,989$  близок к 1. Разработанная модель является адекватной.

Значимость – соответствие модели экспериментальным данным с точки зрения достаточности, включенных в уравнение факторов, для описания зависимой переменной, т.е. статическая обоснованность математической модели. Для оценки значимости используется критерий Фишера. Для оценки значимости определяется расчетное значение критерия и сравнивается с табличным значением. Последнее определяется при заданном уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и  $K_1$  и  $K_2$  степенях свободы,  $K_1=p$ ,  $K_2=n-p-1$ , где  $n$  - число опытов.

В нашем случае  $K_1=2$ , т.к. в модель включены 2 параметра – мощность (P) и расход воздуха (M).

$$K_2=48 - 2 - 1 \quad (4.31)$$

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  значение критерия Фишера для  $K_1=2$  и  $K_2=45$  составляет 3,22.

Расчетное значение критерия Фишера определялось по формуле

$$F = \frac{R^2(n-p-1)}{(1-R^2)p} = \frac{0,99(48-2-1)}{(1-0,99)2} = 2227,5 \quad (4.32)$$

Так как  $F > F_{ТАБ}$ ,  $2227,5 > 3,22$ , следовательно, разработанная модель является значимой.

Таким образом, можно сделать заключение, что результаты экспериментальных данных по утилизации теплоты передвижных дизельных электростанций могут быть воспроизведены математической моделью вида

$$Q = (46,69 + 0,57 \cdot P) + (21,22 + 0,259 \cdot P) \cdot \ln M, \text{кВт} \quad (4.33)$$

где  $P$  – мощность дизель-агрегата, кВт,  $M$  – расход воздуха, кг/с.

Следует иметь в виду, что область использования модели ограничена в интервале значений параметров  $P$  и  $M$ , которые были зарегистрированы при проведении экспериментальных исследований.

В интервалах этих значений ( $P = (0; 50)$  кВт,  $M = (0,14; 1,2)$  кг/с) полученная модель является точной, значимой и адекватной, и может быть использована в дальнейших исследованиях при выборе и обосновании оптимальных режимов работы энергетических комплексов при бурении геологоразведочных скважин.

#### **Основные выводы по главе 4**

1. Анализ видов математических моделей позволил выделить наиболее приемлемый вид разрабатываемой модели – статистическую. Это объясняется тем, что в результате экспериментальных исследований получен значительный объём данных, необходимых при статистическом моделировании.

2. Поставлены цели моделирования и выделены основные факторы, влияющие на величину теплового потока, утилизируемого от дизель-агрегата. Такими параметрами являются нагрузка дизель-агрегата ( $P$ ) и расход воздуха ( $M$ ).

3. По результатам экспериментальных исследований построена гистограмма эмпирического распределения и обоснована гипотеза о нормальном распределении величины утилизированного теплового потока. Проверка гипотезы проводилась на основе критерия Пирсона. Получены числовые значения характеристики распределения – дисперсия и математическое ожидание величины теплового потока.

4. На основе корреляционных отношений выявлена достаточно тесная связь между тепловым потоком ( $Q$ ) и расходом воздуха ( $M$ ), а также между

тепловым потоком (Q) и нагрузкой дизель-агрегата (P). Причем, параметры P и M практически не коррелируют между собой и могут восприниматься как независимые переменные.

5. Установлено, что корреляционные отношения  $\eta_{qp}$  и  $\eta_{qm}$  с надежностью 0,95 являются значимыми.

6. Установлено, что зависимость между Q и M носит нелинейный характер, а между Q и P близка к линейной.

7. Установлено, что зависимость величины утилизированного теплового потока от расхода воздуха при постоянной нагрузке дизель-агрегата носит логарифмический характер. Получены уравнения регрессии вида  $Q=a+\ln b$ , при этом коэффициент вариации не превышает 8%.

8. Установлена зависимость значений коэффициентов a и b уравнения регрессии от мощности (P) и получены уравнения регрессии вида  $a=a_1+b_1P$  и  $b=a_2+b_2P$ .

9. Получено общее уравнение регрессии  $Q = (46,69 + 0,57 \cdot P) + (21,22 + 0,259 \cdot P) \ln M$ , устанавливающее связь между величиной теплового потока (Q) и независимыми параметрами – мощностью (P) и расходом воздуха (M).

10. Проверка качества математической модели позволила установить, что данная модель является:

- точной, с коэффициентом вариации  $Y=5,93\%$ ;
- адекватной, с величиной скорректированного коэффициента детерминации  $\check{R}^2 = 0,989$ ;
- значимой, при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

11. Доказано, что данная модель может быть использована для оценки и обоснования оптимальных режимов работы теплоутилизационной установки передвижных дизельных электростанций.

## **ГЛАВА 5. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ БУРОВЫХ УСТАНОВОК РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ**

### **5.1 Основные виды систем энергообеспечения буровых установок разведочного бурения при бурении геолого-разведочных скважин**

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 [84, 99, 136].

Общими особенностями энергообеспечения геолого-разведочных работ являются:

- удалённость объектов от централизованной энергосети (ЦЭС);
- разнообразие как геологических, так и технико-экономических условий проведения работ;
- неравномерность плотности территориального распределения потребителей на разведываемых площадях;
- сложные транспортные и экстремальные климатические условия – отрицательные среднегодовые температуры, ветровая обстановка, влажность, осадки и т.п.;
- скачкообразные изменения объёма энергопотребления, зависящие от стадии и сезона производства работ.

Все вышеперечисленные особенности предполагают:

- использование большого разнообразия возможных вариантов

энергообеспечения, значительно различающихся по затратной части;

– комплексное производство тепловой и электроэнергии на местах;

– комплексное решение вопросов электро- и теплоснабжения;

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

Рыночные отношения определяют особенности, значительно усложняющие вопросы энергообеспечения потребителей отрасли: бессистемно нарушена связь с Единой Энергетической Системой (ЕЭС), как гарантом стабильного централизованного финансово доступного энергоснабжения; политика самофинансирования, положенная в основу самоокупаемости отрасли, исключила государственное энергообеспечение геолого-разведочных работ; возросли в цене энергоносители, возрос дефицит энерго мощностей.

С середины 90-х годов 20-го столетия становление рыночных отношений определило современный подход к геолого-разведочным работам. Добывающие компании все чаще делегируют производство геолого-разведочных работ юниорским компаниям, которые самостоятельно обеспечивают производство работ, закладывая затратную часть в смету расходов, не стремясь к экономии на энергоносителях и не заботясь об энергосбережении. Однако, ситуация в последнее 10-летие начала изменяться с определением единого заказчика производства геологоразведки, требующего особого подхода к экономии энергоносителей и выбора вариантов энергоснабжения в пользу энергосберегающих технологий в направлении основного вектора в области восполнения минерально-сырьевой базы страны – рационального недропользования.

Специалисты-энергетики, работающие в условиях отрицательных среднегодовых температур (республика Саха (Якутия)), отмечают: «...следует отметить беспрецедентно высокую себестоимость энергетической продукции, в ряде случаев достигающую 7-8 руб./(кВт·ч), при этом львиную долю в себестоимости производимой электроэнергии (до

72%) занимают затраты на топливо» [90].

Главная идея энергосбережения в области геолого-разведочных работ - максимально эффективное использование энергетических ресурсов, базирующееся на применении научно-обоснованных и экономически оправданных технических решений.

Поставленная задача решалась по следующим направлениям:

1. Комплексное решение вопросов автономного электро- и теплоснабжения с использованием вторичных энергоресурсов (утилизация теплоты).

2. Техничко-экономическое обоснование преимущества автономного варианта энергообеспечения на основе многофакторного анализа, влияющего на результат оптимизации – достижения заданных параметров.

Если первое направление предусматривает технические решения, неизбежно связанные с определенными расходами, то второе направление не требует дополнительных затрат и основывается на применении современной методики расчетов, обосновывающей выбор автономного варианта комплексного энергообеспечения по комплексу критериев.

С учетом особенностей энергообеспечения технологических объектов при производстве геолого-разведочных работ, определяемых типом энергоисточника, характером и объёмами потребления тепловой энергии и электроэнергии, становится возможным выделить характерные группы энергопотребителей и основные варианты энергоснабжения.

Геолого-разведочные работы на месторождениях твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) обычно включают в себя три основные стадии производства работ: поиски, предварительная и детальная разведка. Потребителями электроэнергии обычно являются передвижные буровые установки с электроприводом. Тепло требуется для обогрева помещений буровых установок и подогрева бурового раствора, частично – для технологических работ. В зависимости от объёмов разведочных работ, удаленности от централизованной электрической сети, рассредоточенности

потребителей по площади производства работ и некоторых прочих условий могут быть применены следующие варианты энергоснабжения буровых установок:

- от централизованной электрической сети (ЦЭС) с трансформацией электроэнергии по линиям электропередач (ЛЭП) и электрообогревом буровых установок;

- от стационарной дизельной электростанции (СДЭС) с трансформацией электроэнергии по линиям электропередач (ЛЭП) и печным (или электрическим) отоплением буровых;

- от полустационарных групповых дизельных электростанций (ГДЭС) без трансформации энергии и печным отоплением буровых;

- от индивидуальных автономных передвижных дизельных электростанций (ПДЭС) с утилизацией теплоты дизель-агрегатов на нужды теплоснабжения буровых.

Основными элементами предложенных вариантов энергообеспечения являются:

- госсеть – линия электропередач (с центральной подстанцией) и котельная;

- стационарная или полустационарная ДЭС (или газотурбинная электростанция) с трансформацией электроэнергии (или без таковой при компактном размещении) и котельная;

- передвижная ДЭС с системой утилизации теплоты дизель-агрегата.

В качестве альтернативы системам с дизельными электростанциями может также рассматриваться энергоустановка, работающая с использованием нетрадиционных энергоисточников – солнечных элементов и ветрогенераторов, группы кварцевых обогревателей – инфракрасных, плёночных и т.д., а также рассматриваются перспективы использования компактных атомных и физико-химических установок [34, 35, 64, 79, 95, 149, 156, 176].

## **5.2 Типовые варианты энергообеспечения буровых установок разведочного бурения при проведении геолого-разведочных работ на твердые полезные ископаемые**

Основными потребителями энергии при производстве геолого-разведочных работ на ТПИ являются буровые установки разведочного бурения. Такие буровые установки (исключая самоходные, используемых при поисках) имеют электрический привод и собственные теплогенераторы. При этом, в большинстве случаев для обогрева используются отопительные печи открытого горения, реже – электронагревательные приборы.

Выбор из числа возможных вариантов энергоснабжения зависит от числа энергопотребителей, степени их рассредоточенности по исследуемой площади, расстояния до ЦЭС, наличия и стоимости энергоресурсов, географических и климатических условий, определяющих условия и формирующих стоимость доставки энергоносителей до потребителя, а также перспектив дальнейшего освоения района и прочих факторов, оцениваемых комплексно по минимуму затрат на электро- и теплоснабжение.

При этом, возможен принципиальный выбор одного из четырех базовых вариантов энергообеспечения (рисунок 5.1).

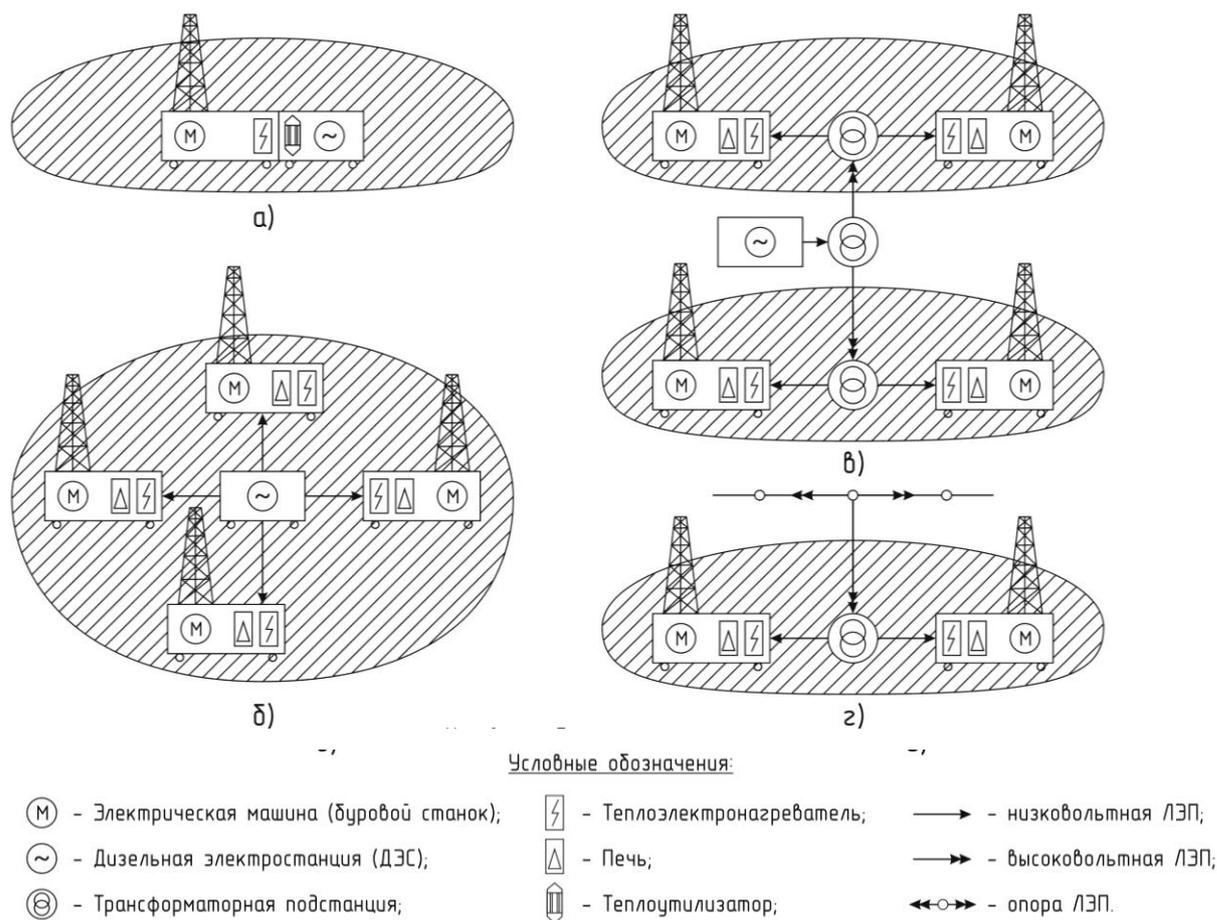


Рисунок 5.1 – Базовые варианты энергообеспечения буровых установок разведочного бурения

Вариант I. Энергообеспечение от автономных энергетических комплексов на базе индивидуальных передвижных дизельных электростанций (ПДЭС) (рисунок 5.1-а).

Каждая ПДЭС обслуживает только одну буровую установку и, блокируясь с ней, служит одновременно источником как электрической, так и тепловой энергии – комплексным автономным энергоисточником. Это наиболее мобильный вариант, исключая необходимость в организации линии электропередач (ЛЭП) и позволяющий применять теплоутилизационные установки для полезного использования теплоты дизель-агрегата ДЭС в целях отопления рабочих мест буровиков, подогрева бурового раствора, а также для прочих технологических целей. Однако, это влечет дополнительные трудозатраты на обслуживание энергоустановки для

буровой бригады или необходимость иметь на каждой буровой дополнительно специальный персонал, но этот вопрос успешно снимается путем внедрения систем автоматической регулировки процессов утилизации теплоты и отопления помещения буровой. Основные эксплуатационные расходы – затраты на закупку и доставку до места проведения работ дизельного топлива [104].

Капиталовложения (Capital Expenditure, CapEx, англ. – средства, используемые для приобретения и/или модернизации физических активов) при этом варианте включают в себя затраты на дизельные электростанции и теплоутилизаторы.

Эксплуатационные расходы (Operating Expenses, OpEx, англ. – затраты и платежи, связанные с проведением за определённый период времени финансовых, производственных и хозяйственных операций, необходимых для поддержания рабочего состояния основных средств в течение всего намеченного срока службы) при этом варианте связаны с расходами топлива для ДЭС, обслуживанием и ремонтом энергоустановок.

Наиболее благоприятными условиями для применения данного варианта является предварительная разведка при значительной рассредоточенности энергопотребителей, т.е. при широкой сетке скважин. При этом, возможность утилизации вторичных энергоресурсов (теплоты дизель-агрегата) позволяет существенно расширить области использования этого варианта энергообеспечения.

Вариант II. Энергоснабжение от полустационарных групповых дизельных электростанций (ГДЭС) (рисунок 5.1-б).

Конфигурация – групповое присоединение к ГДЭС до 4 буровых установок без трансформации электроэнергии на расстояние разумных допустимых потерь мощности и напряжения. По окончании бурения на отведенной площади энергоустановка передислоцируется в центр следующего разведываемого участка для равноудалённого подключения к потребителям.

При этом варианте снижаются удельные расходы топлива для каждой из присоединённых к источнику буровых установок и затраты на обслуживание энергоустановки относительно группы энергопотребителей, но возникает необходимость в сооружении распределительных линий электропередач (ЛЭП), появляются потери энергии в этих линиях. Обогрев буровых за счет утилизации теплоты дизель-агрегата ДЭС исключается, что вынуждает использовать печи или электрообогрев, создающий дополнительную нежелательную нагрузку на электростанцию.

Капиталовложения при этом варианте включают затраты на ДЭС и печи, а основные эксплуатационные издержки – на топливо (в том числе печное), строительство и обслуживание распределительных ЛЭП, потери в ЛЭП, ремонтные работы.

Вариант III. Электроснабжение от стационарной дизельной электростанции (СДЭС) с трансформацией электроэнергии (рисунок 5.1-в).

Отличается от предыдущего варианта тем, что дизельная электростанция не перемещается в течение всего срока проведения работ. Для этого варианта энергообеспечения появляется необходимость организации, помимо распределительных, ещё и магистральных ЛЭП, а также повышающих и понижающих трансформаторных подстанций, позволяющих обеспечить подвод высокого напряжения непосредственно к буровым установкам, что существенно снижает потери электроэнергии при передаче. Обогрев осуществляется посредством применения печей или электрообогревателей.

Капиталовложения по этому варианту включают затраты на ДЭС, повышающие и понижающие подстанции, магистральные ЛЭП и теплогенераторы, а эксплуатационные расходы – на топливо для ДЭС и печей, обслуживание ДЭС, подстанций и ЛЭП, ремонт.

Этот вариант наиболее приемлем при детальной разведке перспективного месторождения, удаленного от магистралей ЦЭС.

Вариант IV. Централизованное электроснабжение от линии ЦЭС (рисунок 5.1-г).

Предусматривает отсутствие ДЭС и повышающей трансформаторной подстанции. Позволяет исключить печное отопление в пользу электрообогрева. В этом случае от ЦЭС и понижающей трансформаторной подстанции по магистральной ЛЭП к потребителям подводится электроэнергия, за которую и взимается плата с потребителей.

Капиталовложения при этом варианте включают затраты на магистральные линии, понижающие подстанции и электронагревательные приборы. Эксплуатационные расходы при этом варианте связаны с обслуживанием подстанции и ЛЭП, оплатой электроэнергии по тарифу и ремонтными работами на линии.

Этот вариант рассматривается в случае, когда магистраль ЦЭС проходит непосредственно через район проведения геолого-разведочных работ или находится от него на экономически приемлемом расстоянии.

Для экономической оценки рассмотренных базовых вариантов энергообеспечения необходимо провести расчеты и сравнительный анализ на предмет выявления достижимых параметров при использовании буровых установок с автономными передвижными комплексными энергоисточниками и использованием теплоутилизационных установок.

### **5.3 Теоретические основы технико-экономического моделирования вариантов энергоснабжения буровых установок разведочного бурения при бурении геолого-разведочных скважин**

Рассмотренные выше особенности выполнения геолого-разведочных работ и наличие в этой связи нескольких вариантов организации энергообеспечения энергопотребителей требуют их систематизации.

Выбор приемлемого варианта комплексного энергоснабжения отдельных геолого-разведочных объектов зависит от многих факторов, среди которых:

- удаленность от линий ЦЭС;

- масштаб проводимых работ;
- мощность потребителей;
- степень разобщенности отдельных производственных объектов;
- тип месторождений и горно-геологические условия их залегания;
- природно-климатические особенности региона и экономические условия производства геолого-разведочных работ.

С учетом многообразия вышеперечисленных факторов, была предложена классификация вариантов электроснабжения, которая, с учетом вопросов теплоснабжения, может быть положена в основу оптимизации комплексного энергообеспечения [67].

По этой классификации для технико-экономической оценки с последующим сравнением способов энергообеспечения технологических потребителей выделяют [70, 134] четыре базовых варианта:

- электроснабжение от линий ЦЭС с отоплением буровых установок электроэнергией;
- электроснабжение от стационарной дизельной электростанции (СДЭС) с трансформацией энергии и локальным печным обогревом;
- электроснабжение от полустационарных ГДЭС без трансформации энергии с печным или электрообогревом потребителей;
- электроснабжение от автономных ПДЭС с утилизацией теплоты для обогрева и в интересах технологического процесса.

Помимо перечисленных базовых вариантов могут быть применены нестандартные варианты, представляющие их различные сочетания.

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.

Особенностью таких расчетов является принцип различия весовых коэффициентов для благ, получаемых в различные периоды. Это связано не только с инфляцией, но и с возможностью инвестировать или реинвестировать быстро полученные финансовые средства для получения дополнительного дохода [78].

Формула [134], с помощью которой определяется современная стоимость единичного платежа, производимого в будущем, имеет вид:

$$PV = \frac{FV}{(1+i)^n} \quad (5.1)$$

где  $PV$  – современная стоимость или доход,  $FV$  – будущая стоимость или доход,  $i$  – процентная ставка (доли единиц),  $n$  – количество единиц времени (месяцев, кварталов, лет), отделяющих дату платежа от нынешней даты.

Если речь идет о последовательности аннуитентных (фр. Annuite от лат. – «годовой, ежегодный») платежей, т.е. равных платежей через равные интервалы времени, то формулы, связывающие единичный платеж ( $R$ ) и сумму платежей в сегодняшней ( $PV$ ) и будущей ( $FV$ ) стоимости могут быть записаны следующим образом:

$$FV = R \frac{(1+i)^n - 1}{i} = RS_{ni} \quad (5.2)$$

$$PV = R \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} = Ra_{ni} \quad (5.3)$$

где  $S_{ni}$  и  $a_{ni}$  – классические функции финансовой математики

$$S_{ni} = \frac{(1+i)^n - 1}{i}, \quad (5.4)$$

$$a_{ni} = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \quad (5.5)$$

Для расчета финансового потока выбранного для анализа варианта энергоснабжения имеет смысл рассматривать только статьи затрат, так как понятие «доход» в области энергоснабжения геолого-разведочных работ не имеет смысла. В этой связи формула затрат будет иметь вид [134]:

$$Z = -K - K_{OB} - И + D + E + A \quad (5.6)$$

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

$$I = I_{\text{КВ}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (5.7)$$

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

$$D = \frac{K(1-pn)}{(1-i)^n} \quad (5.8)$$

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

$$E = I_{\text{К}} C_{\text{НП}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (5.9)$$

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

$$A = K \cdot p \cdot C_{\text{НП}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (5.10)$$

Перед слагаемым  $K$ ,  $K_{\text{ОБ}}$ ,  $I$  и  $D$  стоит отрицательный знак, так как они показывают отток средств, а перед слагаемыми  $E$  и  $A$  стоит положительный знак, так как они отражают поступление средств или их экономию. Это объясняется тем, что при осуществлении текущих затрат уменьшается прибыль, что приводит к уменьшению и налога на прибыль.

Такие приведенные затраты  $Z$  рассчитываются по каждому из вариантов энергоснабжения. Вариант выбирается как оптимальный, исходя из минимума затрат, задаваясь временем работы одной производственной единицы [140].

Исследование зависимостей по всем рассматриваемым вариантам энергообеспечения в единой системе координат позволяет определить вариант оптимального энергообеспечения на протяжении всего времени

производства геолого-разведочных работ, и выделить преимущества применения УУТ в составе комплексного автономного энергоисточника буровых установок разведочного бурения [135].

#### **5.4 Структура затрат по базовым вариантам комплексного энергоснабжения буровых установок разведочного бурения**

Структура затрат (В) для энергоснабжения буровых установок разведочного бурения, независимо от используемого варианта, состоит из основных составляющих – капиталовложений (А) и эксплуатационных расходов (Б).

Капиталовложения (А, CapEx), в зависимости от применяемого варианта энергоснабжения, включают в себя затраты на приобретение основных средств – дизельных электростанций или дизель-агрегатов для электростанций, трансформаторов для повышающей и понижающей подстанций, комплектной повышающей подстанции, магистральной ЛЭП, теплогенераторов (печей, теплоэлектронагревателей), утилизационных установок.

В свою очередь, эксплуатационные расходы (Б, OpEx), в зависимости от применяемого варианта энергоснабжения, включают в себя оплату труда персонала, затраты на приобретение дизельного топлива для ДЭС, печного топлива для отопления помещений буровых, оплату электроэнергии от ЦЭС, затраты на сооружение низковольтных и строительство высоковольтных распределительных линий, затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях, в магистральной ЛЭП и в трансформаторах подстанций, а также прочие затраты (Приложение Е – Сводная таблица статей расходов по вариантам энергоснабжения).

Рассмотрим статьи расходов на энергоснабжение буровых установок разведочного бурения по вариантам энергоснабжения.

#### 5.4.1 Энергоснабжение от индивидуальных автономных передвижных комплексных энергоисточников на основе дизельных электростанций с печным и/или электрообогревом, или применением теплоутилизационных установок

А. Капиталовложения.

Капиталовложения по этому варианту энергоснабжения связаны с приобретением передвижных ДЭС и оборудованием системы отопления.

$$K_I = (K_{ДЭС} + K_{УТ})i_{ДЭС} + (K_{П} + K_{Э})i_{Б}, \text{ руб.}, \quad (5.11)$$

где  $K_{ДЭС}$  – затраты на приобретение передвижных ДЭС, руб.;  $K_{УТ}$  – стоимость утилизационной установки, руб.;  $i_{ДЭС}$  – количество передвижных ДЭС;  $K_{П}$  – стоимость печей на одной буровой, руб.;  $K_{Э}$  – стоимость ТЭН на одной буровой, руб.;  $i_{Б}$  – количество буровых установок.

При вариации вариантов теплоснабжения возможно отсутствие одной из систем отопления. В этом случае капиталовложения в части, касающейся их приобретения, в расчет не принимаются – если на буровой организовано только печное отопление, то стоимости электрообогревателей и теплоутилизационной установки равны нулю ( $K_{Э}=0$  и  $K_{УТ}=0$ ); если обогрев организован от теплоутилизационных установок, то не учитываются стоимости электрообогревателей и печей ( $K_{П}=0$  и  $K_{Э}=0$ ), хотя зачастую электрообогрев резервируется для использования в качестве доводочной подсистемы и  $K_{Э} \neq 0$ .

Б. Эксплуатационные расходы (затраты).

$$I_I = I_{ЗП1} + I_{ДТ1} + I_{ТО} + I_{ПНВ} + I_{ПР1}, \text{ руб.}, \quad (5.12)$$

где  $I_{ЗП1}$  – зарплата обслуживающего персонала;  $I_{ДТ1}$  – затраты на дизельное топливо для ДЭС;  $I_{ТО}$  – затраты на печное топливо для отопления буровых;  $I_{ПНВ}$  – затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях;  $I_{ПР1}$  – прочие затраты.

Б-1. Заработная плата персонала.

$$I_{зп1} = C_{дэс1} + i_{дэс1} + N_{дэс1} + K_p 1,5, \text{руб.}, \quad (5.13)$$

где  $C_{дэс1}$  – тарифная ставка на обслуживание 1 машиносмены ДЭС;  $i_{дэс1}$  – число ДЭС;  $N_{дэс1}$  – норма времени (число смен) обслуживания одной ДЭС;  $K_p$  – районный коэффициент к зарплате.

Б-2. Затраты на дизельное топливо для ДЭС.

$$I_{дт1} = (P_{ср} T_{дэс} + P_{э} T_{э}) i_{б} q_{да1} (C_{дт} + C_{тр} l_{тр}) 10^{-3}, \text{руб.}, \quad (5.14)$$

где  $P_{ср}$  – средняя электрическая нагрузка технологических потребителей одной буровой, кВт;  $T_{дэс}$  – количество часов работы ДЭС, час в квартал;  $P_{э}$  – мощность электронагревательных приборов на одной буровой, кВт;  $T_{э}$  – количество часов работы электронагревателей, час

$$T_{э} = \frac{D_{оп} T_{дэс}}{365}, \quad (5.15)$$

где  $D_{оп}$  – количество дней отопительного периода;  $q_{да1}$  – удельный расход топлива дизель-агрегатом передвижной ДЭС, кг/кВт·час;  $C_{дт}$  – стоимость дизтоплива на нефтебазе, руб./т;  $C_{тр}$  – стоимость транспортировки топлива к месту работ, руб./т-км;  $l_{тр}$  – расстояние транспортировки топлива к месту работ, км.

Б-3. Затраты на печное топливо.

$$I_{то} = \frac{3,6 P_{п} T_{п} i_{б}}{Q \eta_{п}} (C_{то} + C_{тр} l_{тр}), \text{руб.}, \quad (5.16)$$

Б-4. Затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях.

$$I_{п1} = \frac{P_{сэ}^2 T_{дэс} (C_{дт} + C_{тр} l_{тр}) i_{б}}{U_{н}^2 \cos^2 \varphi \gamma_{к} s_{к}} l_{к} q_{дт}, \text{руб.}, \quad (5.17)$$

где  $P_{сэ}$  – средняя электрическая нагрузка одной буровой с учетом мощности электронагревателей, кВт;

$$P_{сэ} = \frac{P_{ср} T_{дэс} + P_{э} T_{э}}{T_{дэс}} \quad (5.18)$$

$l_{к}$  – средняя длина низковольтных кабельных линий, км;  $U_{н}$  – номинальное напряжение низковольтных линий, кВ;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;  $\gamma_{к}$  – удельная проводимость материала жил кабеля, м/Ом мм;  $s_{к}$  – сечение жил

кабеля, мм<sup>2</sup>.

Б-10. Прочие затраты.

$$I_{\text{ПР1}} = 0,3(0,075K_1p + I_{31}) \quad (5.19)$$

где  $p$  – норма амортизационных отчислений.

В. Общие затраты по Варианту I.

$$Z_I = -K_I - (I_{\text{ДТ}} + I_{\text{ТО}}) - I_I \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} + K_I \frac{(1 - 0,25pn)}{(1+i)^n} + \\ + K_I 0,25pC_{\text{П}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} + I_I \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} C_{\text{П}} \quad (5.20)$$

или

$$Z_I = \\ -K_I - (I_{\text{ДТ}} + I_{\text{ТО}}) - I_I \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_{\text{П}} - 1) + K_I \frac{(1-0,25pn)}{(1+i)^n} + \\ + K_I 0,25pC_{\text{П}} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i}, \text{ руб.} \quad (5.21)$$

#### 5.4.2 Энергоснабжение от полустационарных групповых ДЭС с печным и/или электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения

А. Капиталовложения.

$$K_{II} = K_{\text{ДА}} i_{\text{ДА}} + (K_{\text{П}} + K_{\text{Э}}) i_{\text{Б}}, \text{ руб.}, \quad (5.22)$$

где  $K_{\text{ДА}}$  – стоимость дизель-агрегатов полустационарной ДЭС;  $i_{\text{ДА}}$  – число дизель-агрегатов.

Б. Эксплуатационные расходы.

$$I_{II} = I_{\text{ЗП2}} + I_{\text{ДТ2}} + I_{\text{ТО}} + I_{\text{ПНВ}} + I_{\text{НВЛ}} + I_{\text{ПР2}}, \text{ руб.}, \quad (5.23)$$

где  $I_{\text{НВЛ}}$  – затраты на сооружение низковольтных распределительных линий.

Б-1. Заработная плата персонала.

$$I_{\text{ЗП2}} = C_{\text{ДЭС2}} i_{\text{ДЭС2}} N_{\text{ДЭС2}} K_{\text{Р}} 1,5, \text{ руб.}, \quad (5.24)$$

где  $C_{\text{ДЭС2}}$  – тарифная ставка на обслуживание 1 машиномены

полустационарной ДЭС;  $N_{дэс2}$  – норма времени (число смен) обслуживания одной полустационарной ДЭС;

Б-2. Затраты на дизельное топливо для ДЭС рассчитываются по формуле (5.14), где вместо  $q_{дэ1}$  применяется  $q_{дэ2}$  – удельный расход топлива дизель-агрегатами полустационарной ДЭС, кг/кВт·час.

Б-3. Затраты на печное топливо рассчитываются по формуле (5.16).

Б-4. Затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях рассчитываются по формуле (5.17).

Б-5. Затраты на сооружение низковольтных распределительных линий

$$I_{нвл} = \frac{l_{нвл} K_{нвл} i_B L^{0,25}}{H} \quad (5.25)$$

где  $K_{нвл}$  – затраты на строительство 1 км низковольтных распределительных линий, руб./км;  $L$  – годовой объем бурения, м;  $H$  – средняя глубина скважины, м;  $l_{нвл}$  – длина низковольтных распределительных линий, км.

Б-10. Прочие затраты рассчитываются по формуле (5.19).

В. Общие затраты по Варианту II.

$$Z_{II} = -K_{II} - (I_{дт} + I_{то}) - I_{II} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_{II} - 1) + K_{II} \frac{(1-0,25pn)}{(1+i)^n} + K_{II} 0,25pC_{II} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i}, \text{ руб.} \quad (5.26)$$

### **5.4.3 Энергоснабжение от стационарной ДЭС с трансформацией электроэнергии с печным и/или электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения**

А. Капитальные вложения.

$$K_{III} = (K_{тр} i_{тр} + K_{ктп} i_{ктп}) + K_{да} i_{да} + K_{маг} l_{маг} + (K_{II} + K_{э}) i_B, \text{ руб.}, \quad (5.27)$$

где  $K_{тр}$  – стоимость трансформатора на повышающей подстанции, руб.;  $i_{тр}$  – число трансформаторов центральной трансформаторной подстанции

(ЦТП);  $K_{КТП}$  – стоимость комплектной трансформаторной подстанции (КТП), руб.;  $i_{КТП}$  – число КТП;  $K_{ДА}$  – стоимость 1 дизель-агрегата центральной дизельной электростанции (ЦДЭС);  $i_{ДА}$  – число агрегатов на ЦДЭС;  $K_{МАГ}$  – стоимость строительства 1 км магистральной ЛЭП;  $l_{МАГ}$  – длина магистральной ЛЭП.

Б. Эксплуатационные расходы.

$$I_{III} = I_{ЗПЗ} + I_{ДТЗ} + I_{ТО} + I_{ПНВ} + I_{ВВ} + I_{ПВВ} + I_{ПТР} + I_{ПРЗ}, \text{ руб.}, \quad (5.28)$$

Б-1. Заработная плата персонала.

$$I_{ЗПЗ} = (C_{ДЭСЗ} i_{ДЭСЗ} N_{ДЭСЗ} + C_{ТЗ} i_{ТР} N_{ТР}) K_{ЛЭП} K_p 1,5, \text{ руб.}, \quad (5.29)$$

где  $C_{ДЭСЗ}$  – тарифная ставка на обслуживание стационарной ДЭС,  $C_{ТЗ}$  – тарифная ставка на обслуживание трансформаторов, руб./м-см;  $N_{ТР}$  – норма времени (число смен) на обслуживание трансформаторов, см/квартал;  $K_{ЛЭП}$  – коэффициент доплат за обслуживание сетей.

Б-2. Затраты на дизельное топливо для ДЭС рассчитываются по формуле (5.14), где вместо  $q_{ДА1}$  применяется  $q_{ДАЗ}$  – удельный расход топлива дизель-агрегатами стационарной ДЭС, кг/кВт·час.

Б-3. Затраты на печное топливо рассчитываются по формуле (5.16).

Б-4. Затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях рассчитываются по формуле (5.17).

Б-6. Затраты на строительство высоковольтных распределительных линий

$$I_{ВВ} = \frac{l_{ВВ} K_{ВВ} i_{ВВ} L^{0,25}}{H}, \text{ руб.}, \quad (5.30)$$

где  $l_{ВВ}$  – длина высоковольтных распределительных линий, км;  $K_{ВВЛ}$  – стоимость 1 км высоковольтных распределительных линий, руб.

Б-7. Потери электроэнергии в магистральной ЛЭП рассчитываются по формуле (5.17).

Б-8. Потери электроэнергии в трансформаторах.

$$I_{ПТР} = 0,02 (S_{ЦП} + S_{ПП} i_{ТР}) T_K q_{ТР} (C_{ДТ} + C_{ТР} l_{ТР}) 10^{-3} \quad (5.31)$$

где  $S_{ЦП}$  – установленная мощность трансформаторов центральной

подстанций, кВА;  $S_{ПП}$  – установленная мощность трансформаторов передвижных подстанций, кВА.

Б-10. Прочие затраты рассчитываются по формуле (5.19).

В. Общие затраты по Варианту III.

$$Z_{III} = -K_{III} - (I_{ДТ} + I_{ТО}) - I_{III} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_{П} - 1) + K_{III} \frac{(1-0,25pn)}{(1+i)^n} + K_{III} 0,25pC_{П} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i}, \text{руб.} \quad (5.32)$$

#### 5.4.4 Энергоснабжение от ЦЭС с электрическим обогревом помещений буровых установок разведочного бурения

А. Капитальные вложения.

$$(K_{ТР}i_{ТР} + K_{КТП}i_{КТП}) + K_{МАГ}l_{МАГ} + (K_{П} + K_{Э})i_{Б}, \text{руб} \quad (5.33)$$

где  $K_{ТР}$  – стоимость трансформатора на центральной понижающей подстанции, руб.;  $i_{ТР}$  – число трансформаторов ЦТП;  $K_{КТП}$  – стоимость комплектной трансформаторной подстанции, руб.;  $i_{КТП}$  – число КТП;  $K_{МАГ}$  – стоимость 1 км магистральной ЛЭП;  $l_{МАГ}$  – длина магистральной ЛЭП.

Б. Эксплуатационные расходы.

$$I_{IV} = I_{ЗП4} + I_{ЭЭ} + I_{ТО} + I_{ВВ} + I_{ПН} + I_{ПВ} + I_{ПТР} + I_{ПР4}, \text{руб.}, \quad (5.34)$$

Б-1. Заработная плата персонала.

$$I_{ЗП4} = C_{Т4} j_{ТР} N_{ТР} K_{ЛЭП} K_{Р} 1,5, \text{руб.}, \quad (5.35)$$

где  $C_{Т4}$  – тарифная ставка на обслуживание трансформаторов, руб./м·см;  $N_{ТР}$  – норма времени (число смен) на обслуживание трансформаторов, см/квартал;  $K_{ЛЭП}$  – коэффициент доплат за обслуживание сетей.

Б-3. Затраты на печное топливо рассчитываются по формуле (5.16).

Б-6. Затраты на строительство высоковольтных распределительных линий рассчитываются по формуле (5.30).

Б-4. Затраты, связанные с потерями электроэнергии в низковольтных сетях рассчитываются по формуле (5.17).

Б-7. Потери электроэнергии в магистральной ЛЭП рассчитываются по

формуле (5.17).

Б-8. Потери электроэнергии в трансформаторах.

$$I_{ПТР} = 0,02(S_{ЦПС} + S_{ППС}i_{ТР})T_K C_{ЭЭ} \quad (5.36)$$

Б-9. Оплата электроэнергии по тарифам.

$$I_{ЭЭ} = (P_C T_K + P_Э T_Э)i_B C_{ЭЭ} \quad (5.37)$$

где  $C_{ЭЭ}$  – стоимость 1 кВт-час электроэнергии, руб./кВт-час.

Б-10. Прочие затраты рассчитываются по формуле (5.19).

В. Общие затраты по Варианту IV.

$$Z_{IV} = -K_{IV} - (I_{ДТ} + I_{ТО}) - I_{IV} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_{П} - 1) + K_{IV} \frac{(1-0,25pn)}{(1+i)^n} + \\ + K_{IV} 0,25p C_{П} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i}, \text{руб.} \quad (5.38)$$

Полученные зависимости представляют собой экономико-математические модели основных вариантов энергоснабжения буровых установок разведочного бурения.

## **5.5 Выбор оптимального варианта комплексного энергоснабжения буровых установок разведочного бурения на основе технико-экономического моделирования**

Любое из принимаемых решений характеризуется прогнозным ожиданием – благоприятным достижимым результатом или негативным последствием. В тех случаях, когда результат может быть выражен количественно еще на стадии проектирования, становится возможным провести сравнительный анализ альтернативных вариантов и выбрать лучший из них. Количественный анализ создает предпосылки для разработки достаточно достоверной модели, а также выбора требуемого критерия оптимальности [15, 126, 156].

За экономико-математическую модель можно принять зависимости, применяемые для расчёта финансовых затрат по рассматриваемым вариантам энергоснабжения геолого-разведочных объектов, приведённые к начальному

моменту времени. В качестве критерия оптимизации можно рассматривать минимум приведенных затрат [123]. Это позволит провести сравнительный анализ возможных в определённых условиях вариантов энергоснабжения технологических объектов и отобрать из них удовлетворяющие оптимизационному критерию.

Рассмотрим методику определения оптимального варианта энергообеспечения на конкретном примере.

Условия: разведка участка месторождения; буровые установки УКБ-4; количество буровых установок – 3 ед.; годовой объем бурения – 10800 метров в год глубина скважины – 300 метров.

Для этих условий рассматриваются три возможных варианта энергоснабжения.

Вариант I. Энергоснабжение осуществляется от передвижных дизельных электростанций типа ДЭС-60р. Стоимость дизельного топлива с учетом доставки к месту работ  $C_{ТД} = 30\ 000$  руб./т. Теплоснабжение буровой осуществляется от электрообогревателей мощностью 10 кВт и печей на твердом топливе. Электрическая нагрузка составляет 38,5 кВт, тепловая нагрузка – 40 кВт. Оптимизационное решение – утилизация теплоты дизель-агрегата ДЭС в целях отопления помещения буровых и прогрева технологического раствора.

Вариант II. Электроснабжение осуществляется от центральной ДЭС на основе стационарного дизель-агрегата ДГА-300. Для доставки электроэнергии к буровым установкам устраивается повышающая трансформаторная подстанция мощностью 250 кВт, организовывается линия электропередач напряжением 6 кВ длиной 5 км. Буровые установки получают электроэнергию от передвижных понижающих трансформаторных подстанций КТП-100. Теплоснабжение буровой осуществляется от электрообогревателей мощностью 10 кВт и печей на твердом топливе.

Вариант III. Электроснабжение осуществляется от линии ЦЭС напряжением 6 кВт, проходящей на расстоянии 15 километров от места

проведения работ. Буровые установки получают электроэнергию от передвижных понижающих трансформаторных подстанций КТП-100. Стоимость электроэнергии по тарифу госсети составляет 4,5 руб./кВт·ч. Теплоснабжение буровой осуществляется от электрообогревателей мощностью 10 кВт, реже – от печей на твердом топливе.

Задачей исследования было выяснение, в каких условиях вариант с использованием теплоутилизационной установки в составе комплексного автономного энергоисточника буровой установки разведочного бурения будет оптимальным или преимущественным для использования.

Сравнение затрат по рассматриваемым вариантам приводится на рисунке 5.2. Минимальные затраты обеспечивал III 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 I – энергоснабжение от ПДЭС с установкой утилизации теплоты.

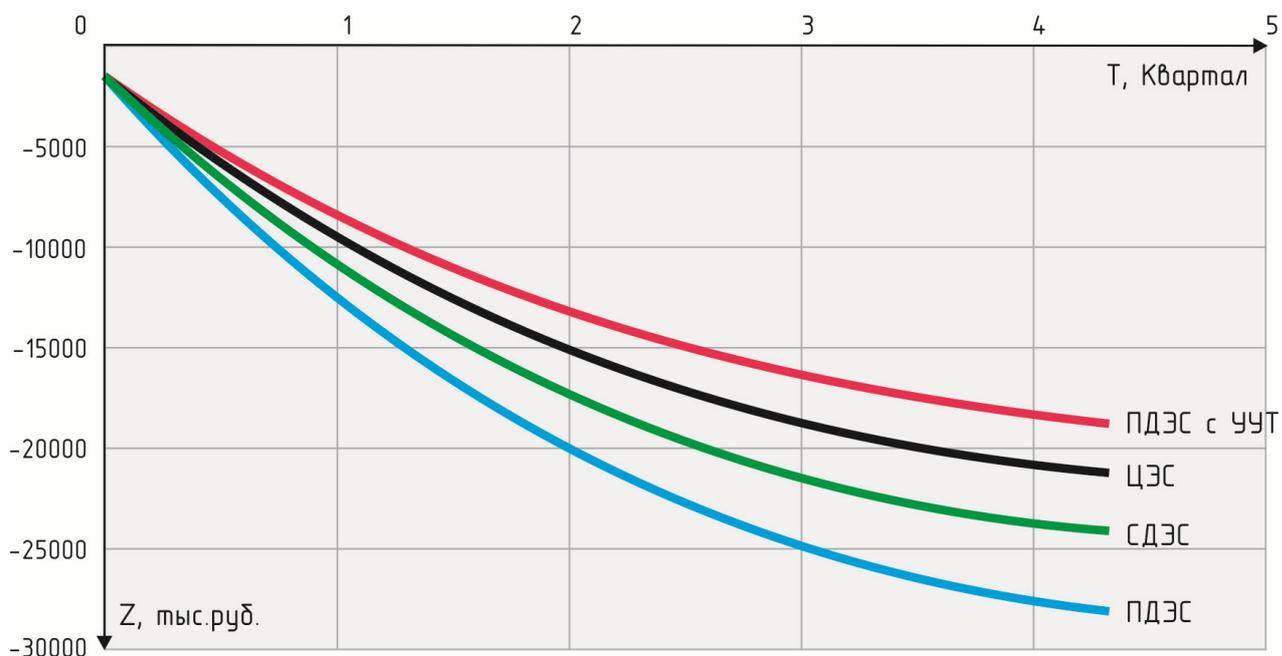


Рисунок 5.2 – Сравнение вариантов энергоснабжения по критерию минимума затрат

Предыдущие исследования и расчеты, проведенные в интересах выбора оптимального варианта энергоснабжения [70, 134], определили основные критерии оптимизации, сравнивая реальные значения которых с значениями, критическими для данных условий, можно делать вывод о том, какой из вариантов энергоснабжения для любого из условий станет оптимальным. Среди параметров, выступающих в качестве такого критерия оптимизации, можно выделить расстояние от места производства работ до линий ЦЭС или предельное расстояние подключения – расстояние, при превышении которого рассматриваемый вариант энергоснабжения перестает удовлетворять требованиям оптимальности [70, 134]. 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.

Анализ предельного расстояния позволяет выявить влияние прочих параметров на выбор оптимального варианта, а также определить, какие из параметров являются значимыми для конкретных условий и должны приниматься в расчёт при определении оптимального варианта энергоснабжения.

Расчёты, проведённые авторами исследований [70, 134] путем сопоставления затратной части вариантов энергоснабжения от ЦЭС и от ПДЭС (с утилизацией теплоты дизель-агрегатов и без таковой), выявили основные зависимости влияния на предельное расстояние подключения буровых установок разведочного бурения к энергоисточникам следующих ключевых критериев: сроков работ, потребляемой электрической мощности, стоимости электроэнергии, мощности отопления, стоимости дизельного и печного топлива:

$$l_{\text{ПР}} = \frac{-\Delta K \cdot G - B \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_H - 1)}{\left[ K_{IV-M} \cdot G + C \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} (C_H - 1) \right]}, \text{ км} \quad (5.39)$$

где  $\Delta K = K_{IV-M} - K_I$ , руб,  $K_{IV-M}$  – капиталовложения при осуществлении энергоснабжения от ЦЭС без учета стоимости строительства магистральной

ЛЭП, руб.;  $K_I$  – капиталовложения при осуществлении энергоснабжения от ПДЭС, руб.;

$$G = -1 + \frac{1-0,25 \cdot p \cdot n}{(1+i)^n} + 0,25 \cdot p \cdot C_{НП} \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (5.40)$$

где  $p$  – норма амортизационных отчислений (квартальная);  $n$  – количество единиц времени (кварталов);  $C_{НП}$  – налог на прибыль;  $i$  – ставка альтернативного вложения;

$$B = I_{IV-M} - I_I, \text{ руб.}, \quad (5.41)$$

$I_{IV-M}$  – издержки при осуществлении энергоснабжения от ЦЭС без учета затрат на обслуживание магистральной ЛЭП и потерь в ней;  $I_I$  – издержки при осуществлении энергоснабжения от ПДЭС;

$$C = 225 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot K_M + C_{ЛЭП} \cdot K_P + \frac{P_C^2 \cdot T_K \cdot C_Э \cdot i_B}{U_M^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \gamma_M \cdot s_M}, \text{ руб./км} \quad (5.42)$$

где  $K_M$  – стоимость 1 км магистральной ЛЭП, руб./км;  $C_{ЛЭП}$  – стоимость обслуживания 1 км магистральной ЛЭП, руб./км;  $P_C$  – средняя электрическая мощность буровой установки, кВт;  $T_K$  – число часов работы в квартал, час.;  $C_Э$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч;  $i_B$  – число буровых установок;  $U_M$  – напряжение магистральной ЛЭП, кВ;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;  $s_M$  – сечение проводов магистральной ЛЭП, мм<sup>2</sup>;  $\gamma_M$  – удельная проводимость магистральной ЛЭП, м/Ом·мм<sup>2</sup>.

Проведённые расчёты [70, 134] 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 за счёт отказа от использования печного и электрического отопления помещений буровых установок;

– увеличение электрической мощности технологических потребителей –

буровых установок разведочного бурения, 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 утилизацией теплоты;

– 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 буровых установок разведочного бурения в значительной степени определяются затратами на теплообеспечение. Снижение затрат на теплоснабжение за счет утилизации теплоты дизель-агрегатов энергетических комплексов оказывает определяющее влияние на выбор оптимального варианта энергоснабжения – использование теплоутилизационных установок в составе автономных автоматизированных энергетических комплексов буровых установок разведочного бурения на базе ПДЭС расширяет область эффективного применения этого варианта энергообеспечения геолого-разведочных работ на ГПИ.

### **Основные выводы по Главе 5**

1. Проведенный анализ рассматриваемой группы производственных энергопотребителей обозначил возможные варианты энергоснабжения, характерные для типовых условий производства работ, рассмотренные как типовые варианты комплексного энергоснабжения передвижных буровых установок разведочного бурения.

2. Предложена методика финансово-экономической оценки системы энергоснабжения с целью определения оптимального варианта на основе

сравнения затратной части с использованием минимума затрат по рассматриваемому варианту энергоснабжения в качестве критерия оптимальности.

3. По каждому из типовых вариантов разработана экономико-математическая модель, учитывающая величину капиталовложений и эксплуатационных издержек по основным статьям расходов, приведенных к начальному моменту времени.

4. Проведен сравнительный анализ влияния разного рода параметров и условий на выбор оптимального варианта энергоснабжения при вариантах использования утилизации теплоты дизель-агрегатов ПДЭС и без таковой.

5. Установлено определяющее влияние затрат на теплообеспечение на суммарные затраты по энергоснабжению буровых установок разведочного бурения.

6. Установлена прогрессивная зависимость увеличения предельного расстояния подключения буровых установок разведочного бурения к энергоисточникам по варианту энергообеспечения от ПДЭС с теплоутилизационными установками, а также выявлена экономическая эффективность утилизации теплоты дизель-агрегатов энергетических комплексов в интересах теплообеспечения буровых установок разведочного бурения при бурении геолого-разведочных скважин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения по определению конструктивных и режимных параметров теплоутилизационных систем в составе индивидуальных комплексных энергоисточников на базе передвижных ДЭС для решения задачи комплексного энергообеспечения буровых установок разведочного бурения в отдаленных от энергетических центров регионах освоения месторождений твердых полезных ископаемых в условиях отрицательных среднегодовых температур, а также обоснована экономическая эффективность использования таких систем на основе проведенного технико-экономического моделирования.

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующему.

1. Анализ используемых систем и вариантов энергоснабжения ГРП позволил осуществить постановку востребованных вопросов, требующих решения для совершенствования АЭЖ УРБ, которые в большей степени влияют на эффективность ГРП 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 ГРП, 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 АЭЖ 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 ГРП, 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 ГРП по критериям минимума затрат, а также величины предельного расстояния подключения с централизованным энергосетям, что наглядно продемонстрировало очевидное преимущество использования предложенных модернизированных автономных энергосистем с СУТ по сравнению с прочими вариантами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверкиев Ю.В. Дизель-электрические агрегаты завода «РУМО» для малой энергетики. «Горный журнал», 2004. Специальный выпуск.
2. Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Гудзь В.Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. СПб., СПбГПУ, 2005.
3. Аксельбанд А.М. Судовые энергетические установки. Л., 1970.
4. Алексеев В.В. Экономия топливно-энергетических ресурсов в геологических организациях. Обзор ВИЭМС «Технология и техника разведки». М., 1983.
5. Алексеев В.В., Акимов В.Д., Пинчук Н.П. Двигатели внутреннего сгорания для производства геологоразведочных работ и основы технической термодинамики. М., Геоинформмарк, 2002.
6. Алексеев В.В., Гланц А.А., Алексеева Т.В. Энергоснабжение геологоразведочных организаций. М., 1980.
7. Алексеев В.В., Гланц А.А., Чайкин А.С. Передвижные и стационарные электростанции в геологоразведочных организациях. М., Недра, 1984.
8. Алексеев В.В., Гланц А.А. Экономия топливно-энергетических ресурсов в геологических организациях. М., Недра, 1986.
9. Алексеев А.П., Чекменев Е.Е., Кудряшов Г.Ф. Дизельные и карбюраторные электроагрегаты. Справочник. М., Машиностроение, 1973.
10. Алексеев В.В., Швырев Ю.В., Акимов В.Д. Основы автоматики. М.«Недра» 1998г.
11. Андреев В.А. Судовые теплообменные аппараты. Л., 1968.
12. Аракелов В.Е. Исследование оптимальных схем и параметров теплоутилизационных установок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. МЭИ. М., 1974.
13. Аронов И.З. Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных. М., 1967.

14. Атабеков В.Б. Передвижные электростанции М., Высшая школа, 1982.
15. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации. М., МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2003.
16. Афанасьев В.Н., Исаев С.И., Кожинов И.А., и др. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена. М., Высшая школа, 1986.
17. Багаутдинов Г.А., Марков Ю.А., Маргулин А.П. и др. Электропривод и электрификация приисков. М., Недра, 1989.
18. Баев С.Ф. Судовые компактные теплообменные аппараты. Л., 1965.
19. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. и др. Теплотехника. М., Энергоатомиздат, 1991.
20. Батенин В.М., Масленников В.М., Цой А.Д. О роли и месте децентрализованных источников энергии. «Энергосбережение», №1, 2003.
21. Башкатов Д.Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. М., Недра, 1985.
22. Башкатов Д.Н. Оптимизация разведочного бурения. Н-Новгород, 2007.
23. Белых Б.П., Щуцкий В.И., Заславец Б.И. и др. Электропривод и электрификация открытых горных работ. М., Недра, 1983.
24. Беляев И.Г. Эксплуатация утилизационных установок дизельных судов. М., Транспорт, 1979.
25. Битколов И.З. Жидкостные нейтрализаторы дизельного выхлопа. В сб. «Токсичность ДВС и пути ее снижения». М., 1968.
26. Богинский П.Я., Денисов В.И., Пономарев А.В. и др. Тепловой режим в зданиях буровой установки. М. Сб. научных трудов ЦНИГРИ, вып. 190. 1984.
27. Богинский П.Я., Разрезов Е.Д., Романов Н.Г. и др. К вопросу нормализации микроклимата в буровых зданиях. Сб. научных трудов «Охрана труда на геологоразведочных работах». М. 1982.

28. Богославский В.Н. Тепловой режим здания. М., Стройиздат, 1979.
29. Богуславский В.И. Теплофизика аппаратов утилизации тепла. М. 1983.
30. Бородина О.А. Исследование и разработка методов перевода отопительных и производственных котельных в режим мини-ТЭЦ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С-Пб., 2004.
31. Бородихин И.В. Исследование эффективности и оптимизация параметров ТЭЦ в комбинированных системах теплоснабжения с ДВС. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2004.
32. Бочаров А.И. Охрана труда при механическом колонковом бурении. Л., ЛГИ, 1983.
33. Брюховецкий О.С., Лимитовский А.М., Меркулов М.В. Перспективные направления развития энергетики геологоразведочных работ в современных условиях. Сборник избранных научных трудов V международной научной конференции. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых на рубеже XX-XXI века». М., 2006.
34. Брюховецкий О.С., Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Калугин Е.В. Малая энергетика на базе возобновляемых источников энергии на объектах геологоразведочных работ. Горный журнал. Специальный выпуск. М. 2004.
35. Брюховецкий О.С., Лимитовский А.М., Меркулов М.В. О перспективе использования возобновляемых источников энергии при производстве геологоразведочных работ. Известия ВУЗов. «Геология и разведка». № 3, 2007.
36. Булгаков К.В. Использование вторичных энергоресурсов. М., 1963.
37. Ванюшин Ю.Н., Глушков В.И. Утилизация тепла на компрессорных станциях магистральных газопроводов. М., 1978.

38. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций. М., Энергоиздат, 1981.
39. Вознесенский А.А. Использование отработавшего тепла от дизельных установок. М.-Харьков, 1936.
40. Ганджумян Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении. М., Недра, 1990.
41. Гладилин Л.В. Основы электроснабжения горных предприятий. М., Недра, 1980.
42. Гойтова Т.Б. Развитие теоретических и практических электротехнических комплексов для нетрадиционной энергетики. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2006.
43. Головин С.В., Меркулов М.В., Черезов Г.В. Проблемы и варианты решения повышения эффективности автономного комплексного энергообеспечения геологоразведочных объектов при работах в условиях Заполярья и Крайнего Севера. XII Международная конференция «Новые идеи в науках о земле», Доклады конференции, Москва, 2015.
44. 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.
45. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
46. Гусев В.М., Ковалев Н.И., Попов В.П. и др. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Л., Стройиздат, 1981.
47. Денисов В.Н. Нормализация теплового режима рабочих пространств установок геологоразведочного бурения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. С-Пб, 1997.
48. Денисов В.Н., Богинский П.Я., Немченко А.А. и др. Тепловой

режим зданий геологоразведочных буровых установок. М., ВИЭМС, 1985.

49. Денисов В.Н., Богинский П.Я. Нормализация температурных условий как фактор повышения качества буровых установок. Сб. научных трудов «Методы повышения качества и надежности геологоразведочной техники». М., 1983.

50. Денисов В.Н., Богинский П.Я. Оценка и пути повышения эффективности отопительно-вентиляционных систем передвижных зданий. В кн. «Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем передвижных производственных зданий». Л., 1983.

51. Древис Г.В. Энергетические установки. М., 1975.

52. Ермоленко М.Н. Рациональное использование теплоты в системах отопления и вентиляции компрессорных станций магистральных газопроводов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. С-Пб, 2004.

53. Жернаков А.П., Акимов В.Д., Алексеев В.В. Экономия топливно-энергетических ресурсов при геологоразведочных работах. М., Геоинформмарк, 2000.

54. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М., МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2003.

55. Ильковский К.К., Ливинский А.П., Парников Н.М., Дьяконов П.М. Проблемы малой энергетики в энергоизолированных районах Сибири и Дальнего Востока. «Горный журнал», 2004. Специальный выпуск.

56. Исаев С.И., Кожин И.А., Кафанов В.И. и др. Теория тепломассообмена. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.

57. Исаков Ю.Н., Кочинев Ю.Ю., Ливенцев Ф.Л. Расчет параметров систем использования вторичных энергоресурсов дизельных установок. М., «Двигателестроение», №11, 1980.

58. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М. Энергия, 1981.

59. Кабанцев А.И., Бочаров А.И., Ахмет-Валей Х. и др. Охрана труда.

М., 1986.

60. Кардыш В.Г. Повышение эффективности работы буровых станков. М., 1980.

61. Кардыш В.Г., Мурзаков В.Г., Окмянский А.С. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин. М., 1980.

62. Каспаров А.А. Гигиена труда и промсанитария. М., 1977.

63. Клер А.М., Деканова Н.П., Санеев Б.Г. и др. Оптимизация развития и функционирования автономных энергосистем. Новосибирск, 2001.

64. Кобелев А.В. Повышение эффективности систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Липецк, 2004.

65. Козловский А.Е. Оптимизация процесса бурения (структура и элементы управления). М., ВСЕГЕИ, 2000.

66. Козловский А.Е., Сердюков С.Г. Новые направления исследований по оптимизации процесса бурения. В сб. «Доклады 3-го Международного симпозиума по бурению скважин в осложненных условиях». СПб., СПГГИ, 1997.

67. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения. М. 1975.

68. Козловский Е.А., Питерский В.М., Мурашов С.Ф. Автоматизация управления геологоразведочным бурением. М., Недра, 1991.

69. Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России. М.: Минтопэнерго РФ, 1994.

70. Косьянов В.А. Научные основы, оптимизация и совершенствование комплексного энергообеспечения геологоразведочных работ. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУ ВПО "Российский государственный геологоразведочный университет". М., 2011.

71. Косьянов В.А., Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Головин С.В.

Повышение эффективности комплексного энергообеспечения децентрализованных геологоразведочных объектов в условиях Заполярья и Крайнего Севера. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, № 4'2014.

72. Косьянов В.А., Черезов Г.В., Головин С.В. Оптимизация комплексного энергоснабжения геологоразведочных работ на основе технико-экономического моделирования. Разведка и охрана недр, №3'2016.

73. Кривов В.Г., Синатов С.А. Эффективность использования отходящей теплоты дизельной установки. М., «Двигателестроение», №6, 1981.

74. Кудряшов Б.Б., Яковлев В.М. Бурение скважин в осложненных условиях. М., Недра, 1987.

75. Кузнецов А.В., Ачкасов К.Л. Устройство, эксплуатация и ремонт дизельных электростанций. М., 1974.

76. Ливинский А.П., Борисов К.Б., Владимирова С.А. Эффективность использования мини-ТЭЦ в районах Крайнего Севера. «Горный журнал». 2004. Специальный выпуск.

77. Ливинцев Ф.Л. Силовые установки с двигателями внутреннего сгорания. Л., 1969.

78. Лимитовский М.А. Инвестиции на развивающихся рынках. М, 2002.

79. Лимитовский А.М. Компактные атомные и физико-химические установки как альтернативные источники энергии в отдаленных районах. «Горный журнал», 2004. Специальный выпуск.

80. Лимитовский А.М. Научные основы, оптимизация и совершенствование электроснабжения геологоразведочных работ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 1980.

81. Лимитовский А.М. Электрооборудование и электроснабжение геологоразведочных работ. М., АиБ, 1998.

82. Лимитовский А.М., Гланц А.А. Оптимизация и совершенствования электроснабжения геологоразведочных работ. М., 1983.

83. Лимитовский А.М., Гланц А.А., Меркулов М.В. Перспективы использования ветроэнергетики на геологоразведочных работах. В книге «Оптимизация и совершенствование электроснабжения геологоразведочных работ». М., «Недра», 1983.

84. Лимитовский А.М., Гланц А.А., Меркулов М.В. Утилизация тепла дизельных электростанций – главный резерв экономии топливно-энергетических ресурсов ГРП. В книге «Оптимизация и совершенствование электроснабжения геологоразведочных работ». М., «Недра», 1983.

85. Лимитовский А.М., Коняхин В.И., Меркулов М.В. Динамика и особенности развития электрификации геологоразведочных работ за 1974-1979 гг. ВИНТИ № 3790=80. Деп. от 21.08.80.

86. Лимитовский А.М., Лузганов В.И., Меркулов М.В. и др. Вопросы и перспективы теплообеспечения потребителей на участках ударно-канатного бурения в условиях Крайнего Севера. «Технология и техника геологоразведочных работ» Межвузовский сборник №10, МГРИ, 1988.

87. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Тихонов Ю.В., Лузганов В.И. Вопросы и перспективы теплообеспечения технологических потребителей на участках ударно-канатного бурения в условиях Крайнего Севера. Сборник «Технологический прогресс в технике и технологии разведки месторождений п.и.», М., МГРИ, 1989

88. Лимитовский А.М., Марков Ю.А., Меркулов М.В. и др. «Электро- и теплоснабжение геологоразведочных работ», М.: Недра, 1988.

89. Лимитовский А.М., Марков Ю.А., Меркулов М.В. и др. Роторный теплообменник. Авторское свидетельство № 1177644.

90. Лимитовский А.М., Марков Ю.А., Меркулов М.В. и др. Совершенствование систем электроснабжения ГРП Северо-Восточных районов СССР. «Технология и техника геолого-разведочных работ».

91. Межвузовский сборник №9, МГРИ, 1987.

92. Лимитовский А.М., Марков Ю.А., Меркулов М.В., Хрипко А.М. Анализ возможных схем утилизации тепла стационарных дизельных электростанций. «Технология и техника геологоразведочных работ». Межвузовский сборник, МГРИ, 1984.

93. Лимитовский А.М., Меркулов М.В. К вопросу определения сечения проводов ЛЭП на геологоразведочных работах. ВИНТИ № 559=81 Деп. от 5.02.81.

94. Лимитовский А.М., Меркулов М.В. Перспектива применения малых теплоэлектростанций для геологоразведочных работ отдаленных районов. «Технология и техника геологоразведочных работ». Межвузовский сборник №8, МГРИ, 1985.

95. Лимитовский А.М., Меркулов М.В. О возможности применения ветроагрегатов на геологоразведочных работах. Известия ВУЗов «Геология и разведка» № 8, 1980.

96. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Калугин Е.В. Влияние тепловой нагрузки буровой установки на выбор системы энергоснабжения. Известия ВУЗов «Геология и разведка» № 2, 2006.

97. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Калугин Е.В. Экспериментальные данные исследований утилизационной установки дизельной электростанции ДЭС-60р. Известия ВУЗов «Геология и разведка» № 6, 2006.

98. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Калугин Е.В. Утилизация тепла дизель-электрических станций при ведении геологоразведочных работ в северных районах. «Горный журнал». 2004. Специальный выпуск.

99. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Хрипко А.М. Экономия топливно-энергетических ресурсов за счет утилизации тепла передвижных дизельных электростанций. Известия ВУЗов «Геология и разведка» №1, 1984.

100. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Хрипко А.М. Промышленно-экспериментальные исследования утилизаторов тепла передвижных дизельных электростанций на буровых работах. Известия ВУЗов «Геология и

разведка» №2, 1984.

101. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Хрипко А.М. Результаты промышленно-экспериментальных исследований утилизаторов тепла ДЭС. «Разведка и охрана недр», №2, 1985.

102. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Хрипко А.М. Вопросы утилизация тепла дизельных электростанций геологоразведочных работ. ВИНТИ №5603-81. Деп 5.1181г.

103. Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Шляпцев Д.Б. Особенности расчета электрических сетей геологоразведочных работ. ВИНТИ № 3801-84. Деп. 07.06.84г.

104. Лисенко В.Г., Щелоков А.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергоснабжения. Справочник в 2 книгах. М., Теплоэнергетик, 2002.

105. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. М., Энергия, 1978.

106. Меркулов М.В. Анализ энергопотребления и его влияние на эффективность геологоразведочных работ. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №8, 2008. Деп. № 641/08-08 от 21.04.08.

107. Меркулов М.В. Исследование температурного режима буровой установки в условиях Крайнего Севера. В сб.: «Тезисы научной конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов МГРИ.» М., МГРИ, 1988.

108. Меркулов М.В. Обеспечение энергетических нагрузок буровой установки за счет утилизации теплоты дизельных электростанций. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №8, 2008. Деп. № 643/08-08 от 21.04.08.

109. Меркулов М.В. Определение тепловых нагрузок установок колонкового бурения. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №8, 2008. Деп. № 642/08-08 от 21.04.08.

110. Меркулов М.В. Оценка теплопотерь производственных потребителей при бурении скважин. В сб.: «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов международной научной конференции. М., МГГА, 1999.

111. Меркулов М.В. Перспективы использования установок утилизации

теплоты ДЭС при разведочном бурении на нефть и газ. «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов международной научной конференции. М., МГГА, 1997.

112. Меркулов М.В. Прогнозирование параметров установки утилизации теплоты в различных режимах работы. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №8, 2008. Деп. № 644/08-08 от 28.04.08.

113. Меркулов М.В. Структура теплотребления и пути повышения эффективности теплоэнергетики ГРП. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых на рубеже XX-XXI века». Тезисы докладов. М., МГГА, 2000.

114. Меркулов М.В. Теплоснабжение буровых работ за счет использования вторичных энергоресурсов. В сб.: «Новые достижения в науках о Земле». Тезисы докладов научной конференции профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников МГГА. М., МГГА, 1995.

115. Меркулов М.В. Теплотехника и теплоснабжение ГРП. М., РГГРУ. 2008.

116. Меркулов М.В. Улучшение условий труда и повышение эффективности буровых работ за счет использования вторичных энергоресурсов. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., МГРИ, 1989.

117. Меркулов М.В. Экономико-математическое моделирование при оптимизации технических решений. В сб.: «Современные аспекты социально-экономического развития муниципальных образований в контексте реализации приоритетных национальных проектов». М., «Готика» 2007.

118. Меркулов М.В., Андреев В.И. Разработка математической модели утилизации теплоты дизельных электростанций на геологоразведочных работах. Известия ВУЗов «Геология и разведка» № 1, 1996.

119. Меркулов М.В., Андреев В.И., Волченсков В.И., и др. Выбор и обоснование оптимального варианта энергоснабжения объектов ГРП. В сб.:

«Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых на рубеже XX-XXI века». Избранные доклады. М., МГГА, 1999.

120. Меркулов М.В., Богодист С.Г., Лимитовский А.М. и др. Устройство утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания. Авторское свидетельство №1677361. 1994.

121. Меркулов М.В., Волченков В.И. Обоснование и выбор оптимального варианта энергоснабжения объектов ГРР. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых на рубеже XX-XXI века». Тезисы докладов. М., МГГА, 1998.

122. Меркулов М.В., Ивченко И.А. Возможность использования ВИЭ в России. Энергия ветра, солнца, биомассы. «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов VIII международной научной конференции. Т. 6, М., РГГРУ, 2007.

123. Меркулов М.В., Калугин Е.А. Перспективные направления экономии топливно-энергетических ресурсов на геологоразведочных работах. Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов международной научной конференции. М., МГГРУ.2003.

124. Меркулов М.В., Калугин Е.А. Повышение эффективности дизельных электростанций на геологоразведочных работах. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых». Тезисы докладов. М., РГГРУ, 2004.

125. Меркулов М.В., Калугин Е.А. Теоретические и экспериментальные исследования утилизационных установок дизельных электростанций. «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов VII международной научной конференции. М., РГГРУ, 2005.

126. Меркулов М.В., Кончаков А.А. Использование методов интерполирования при моделировании экономических задач. «Социальная работа: взаимодействие науки, образования и практики. Инновационные региональные проекты». Материалы научно-практической конференции. Филиал РГСУ в г. Павловский Посад. 2006.

127. Меркулов М.В., Косьянов В.А. Обоснование оптимального варианта энергоснабжения на основе технико-экономического моделирования. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №8, 2008. Деп. № 644/08-08 от 28.04.08.

128. Меркулов М.В., Косьянов В.А., Обоснование оптимального сечения проводов распределительных линий электропередач напряжением до 1 кВ. Тезисы докладов V международной научной конференции. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых». М., РГГРУ, 2006

129. Меркулов М.В., Косьянов В.А., Соловьев Н.В. Повышение эффективности буровых работ путем совершенствования систем их электроснабжения. «Разведка и охрана недр». №11 2007.

130. Меркулов М.В., Кузнецов А.Г. Перспективы использования солнечной энергии. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых на рубеже XX-XXI века». Тезисы докладов III международной научно-практической конференции. М., МГГА, 2002.

131. Меркулов М.В., Косьянов В.А. Теплотехника и теплоснабжение геологоразведочных работ. М., МГГА, 2001.

132. Меркулов М.В., Лимитовский А.М., Калугин Е.А. Об использовании возобновляемых источников энергии на ГРП. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых». Материалы IV международной научно-практической конференции. М., МГГА, 2004.

133. Меркулов М.В., Слоистов С.М. Определение средней скорости ветра в ветроэнергетических расчетах. Тезисы докладов V международной научной конференции. «Наука и новейшие технологии при освоении месторождений полезных ископаемых». М., РГГРУ, 2006.

134. Меркулов М.В. Оптимизация энергетических комплексов при бурении геологоразведочных скважин в условиях Крайнего Севера.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУ ВПО «Российский государственный геологоразведочный университет». М., 2008, с.276.

135. Методика определения экономической эффективности внедрения новой техники и технологии в бурении. М.: 1973.

136. Михайлов В.В., Гудков Л.В., Терещенко А.В. Рациональное использование топлива и энергии в промышленности. М., 1978.

137. Михалин И.Г. Эксплуатация дизельных электростанций. М., 1972.

138. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., Энергия, 1977.

139. Муравейник В.И., Курас Д.М., Тимофеев В.Н. Состояние микроклимата рабочих мест буровых установок и пути его нормализации. М., ВИЭМС, 1978.

140. Назарова З.М., Гольдман Е.Л., Комащенко В.И. Управление, организация и планирование геологоразведочных работ. М., Высшая школа. 2004.

141. Немцов З.Ф., Арсентьев Г.В. Теплоэнергетические установки. М., 1982.

142. Нефедова Н.И. Моделирование процессов тепло- массообмена при утилизации высоковлажных тепловых вторичных энергоресурсов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2006.

143. Октябрьский Р.Д., Буц Д.Н. Оптимизация теплообменных установок. Водоснабжение и санитарная техника, №1, 1991.

144. Олесевич К.А., Олесевич А.К., Осипов М.И. Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик кожухотрубного теплообменного аппарата с винтовой перегородкой. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. №2, 2007.

145. Осташенков В.Ф. Теплотехнические испытания судовых энергетических установок. М., Транспорт, 1975.

146. Отчет о НИР: «Оптимизация и совершенствование способов производства, распределения и потребления энергии на ГРП». М. 1986г. № гос. регистрации 8101381.

147. Отчет о НИР: «Оптимизация и совершенствование способов производства, распределения и потребления энергии на ГРП». М., 1987г. № гос. регистрации 01860008267.

148. Отчет о НИР: «Участие в разработке системы управления утилизацией тепловой энергии передвижных дизель-электрических станций и обоснование целесообразности разработки комплекса утилизации тепловой энергии электростанций типа ДГА-300». М., 1990. № гос. регистрации 01890075705.

149. Попель О.С. Исследование и разработка систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2007.

150. Промышленный и энергетический потенциал России в 2004 г. М., «Энергоназор и энергобезопасность». №1, 2005.

151. Ребрик Б.М., Меркулов М.В., Сергеев С.Н., Хаустов И.П., Петров И.П., Тихонов Ю.В. Итоги конкурса по разработке новой техники. «Разведка и охрана недр», № 2, 1990.

152. Ребрик Б.М., Меркулов М.В., Некоз С.Ю., Смирнов Д.А. Затраты энергии, времени и оценка технической эффективности процесса бурения скважин. «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов международной научной конференции. М., МГГРУ.2003.

153. Ребрик Б.М., Некоз С.Ю., Меркулов М.В. и др. Особенности затрат энергии, времени и оценка технической эффективности процесса бурения скважин. Известия ВУЗов «Геология и разведка» №3, 2003.

154. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М., 1971.

150. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных

установках. Л., 1973.

155. Сидельников А.И. Разработка методики технико-экономического обоснования структуры и параметров энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2006.

156. Солоницын А.Г. Локальные электроэнергетические системы с широким использованием возобновляемых источников. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Владивосток, 2007.

157. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин. Под редакцией Е.А. Козловского. М., 1984.

158. Справочник по бурению геологоразведочных скважин. Под редакцией Е.А. Козловского. СПб., Недра, 2000.

159. Справочник. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М., Энергоатомиздат, 1991.

160. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. М., 1986.

161. Справочник энергетика геологоразведочных организаций. Под редакцией В.В. Алексеева. М., Недра, 1981.

162. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

163. Теплотехнический справочник. Под редакцией П.Д. Лебедева. Т I и II. М., 1978.

164. Теплотехника. Под редакцией А.П. Баскакова. М., Энергоиздат, 1991.

165. Тихомиров К.В., Сергиенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. М., БАСТЕТ, 2007.

166. Ушаков К.З., Кирин Б.Ф., Ножкин Н.В. и др. Охрана труда. М., 1986.

167. Харитонов Б.А., Исаков Ю.Н., Кочинев Ю.Ю. и др. Комплексная

утилизация тепла в энергетических установках. Научные труды, вып. №358, «Теплоэнергетика». Л., ЛПИ, 1977.

168. Чайкин А.С., Наугольников С.И. Методические рекомендации по нормированию расхода топлива на работу геологоразведочного оборудования с приводом от двигателей внутреннего сгорания. М.: ВИЭМС 1989.

169. Шлиновой В.А. Оптимизация и совершенствование энергоснабжения нефтегазодобычи. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 2006.

170. Штерн В.Н. Эксплуатация дизельных электростанций. М., 1980

171. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. М., «Российское информационное агентство ТЭК», 2003.

172. Chow W.K. Ventilation design use computational fluid dynamics as a study tool. Build. Ser. Eng. Res. and technol. – 1995. – 16, №2.

173. Mitchell B.J. Test dats fill theory dop an using foam as drilling fluid. “Oil and Gas”. J., 1971, vol. 69,36.

174. Reay D.A., Wright A. Innovation for energy efficiency. Oxfard, Pergamon, 1981.

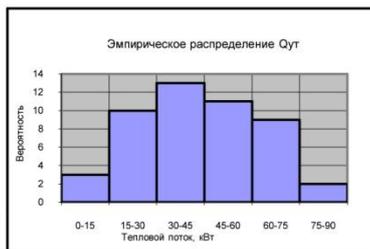
175. Smith C.B. Energy management principles. Elmsford, New York, Pergamon, 1985.

176. Treris L.L. (ed.) Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall Int. Ltd., Hemel Hemstead (UK), 1990.

## Приложение А

### Расчетное значение Критерия Пирсона

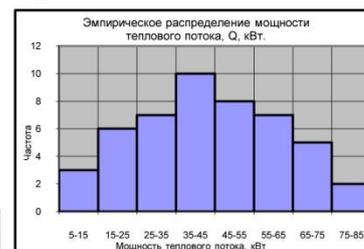
Q	n
0-15	3
15-30	10
30-45	13
45-60	11
60-75	9
75-90	2
	48



Q	n	аргум	функция	Pi				
0-10	1	-2,37540984	0,982	0,02465	1,1832			
10-20	5	-1,82896175	0,9327	0,06715	3,2232			
20-30	7	-1,28251366	0,7984	0,12885	6,1848	6	2,53956096	0,576334641
30-40	8	-0,73606557	0,5407	0,195	9,36	7	0,66455104	0,107449075
40-50	7	-0,18961749	0,1507	0,06525	3,132	8	1,8496	0,197606838
50-60	9	0,356830601	0,2812	0,1832	8,7936	7	14,961424	4,7769553
60-70	7	0,903278689	0,6476	0,1019	4,8912	9	0,04260096	0,004844541
70-80	4	1,449726776	0,8514	0,0508	2,4384	11	13,47183616	1,838004279
	48	1,996174863	0,953	0,8168	39,2064	48		7,501194673

Критерий Пирсона 7,5 меньше критического 7,82 (степеней свободы  $f=6-2-1=3$  при  $\alpha=0,05$ )

Закон распределения - нормальный



Q	n	аргум	функция	Pi				
5-15	3	-2,10218579	0,9643	0,04155	1,9944			
15-25	6	-1,5557377	0,8812	0,09685	4,6488			
25-35	7	-1,00928962	0,6875	0,1665	7,992	9	1,543669942	
35-45	10	-0,46284153	0,3545	0,14535	6,9768	7	0,123131131	
45-55	8	0,083606557	0,0638	0,20375	9,78	10	1,310018668	
55-65	7	0,630054645	0,4713	0,14535	6,9768	8	0,32396728	
65-75	5	1,176502732	0,762	0,0763	3,6624	7	0,00007715	
75-85	2	1,72295082	0,9146	0,0311	1,4928	7	0,66016586	
	48	2,269398907	0,9768	0,90675	43,524	48		3,961030028

Критерий Пирсона 3,96 меньше критического 7,82 (степеней свободы  $f=6-2-1=3$  при  $\alpha=0,05$ )

Закон распределения - нормальный

Q <sub>ср</sub>	43,47	
S(Q)	335,07	дисперсия
s(Q)	18,30491737	ср квадрат

9,38	1	44,73	4	19	2	60	6
17,55	2	51	5	26,66	3	63,75	6
25,2	3	52,25	5	37,44	4	70,7	7
33,55	3	53,55	5	41,25	4	75,6	8
39,76	4	12,96	1	51,83	5	22	2
42,33	4	21,17	2	58,1	6	28,56	3
43,65	4	33,75	3	65,96	7	40,32	4
45,51	5	37,23	4	69,12	7	55,25	6
10,2	1	48,3	5	18,36	2	60,75	6
20,77	2	53,46	5	28	3	64,6	6
31,68	3	57,96	6	36,96	4	71,71	7
38,4	4	65,55	7	52,65	5	78	8

## Приложение Б

### Расчет парных коэффициентов корреляции

	P, кВт	Q <sub>ут</sub>	M, кг/с	P*P	Q*Q	M*M	P*Q	P*M	Q*M
1	0	9,38	0,14	0	87,9844	0,0196	0	0	1,3132
2	0	17,55	0,27	0	308,0025	0,0729	0	0	4,7385
3	0	25,2	0,4	0	635,04	0,16	0	0	10,08
4	0	33,55	0,55	0	1125,6025	0,3025	0	0	18,4525
5	0	39,76	0,71	0	1580,8576	0,5041	0	0	28,2296
6	0	42,33	0,83	0	1791,8289	0,6889	0	0	35,1339
7	0	43,65	0,97	0	1905,3225	0,9409	0	0	42,3405
8	0	45,51	1,11	0	2071,1601	1,2321	0	0	50,5161
9	10	10,2	0,15	100	104,04	0,0225	102	1,5	1,53
10	10	20,77	0,31	100	431,3929	0,0961	207,7	3,1	6,4387
11	10	31,68	0,48	100	1003,6224	0,2304	316,8	4,8	15,2064
12	10	38,4	0,6	100	1474,56	0,36	384	6	23,04
13	10	44,73	0,71	100	2000,7729	0,5041	447,3	7,1	31,7583
14	10	51	0,85	100	2601	0,7225	510	8,5	43,35
15	10	52,25	0,95	100	2730,0625	0,9025	522,5	9,5	49,6375
16	10	53,55	1,05	100	2867,6025	1,1025	535,5	10,5	56,2275
17	20	12,96	0,18	400	167,9616	0,0324	259,2	3,6	2,3328
18	20	21,17	0,29	400	448,1689	0,0841	423,4	5,8	6,1393
19	20	33,75	0,45	400	1139,0625	0,2025	675	9	15,1875
20	20	37,23	0,51	400	1386,0729	0,2601	744,6	10,2	18,9873
21	20	48,3	0,69	400	2332,89	0,4761	966	13,8	33,327
22	20	53,46	0,81	400	2857,9716	0,6561	1069,2	16,2	43,3026
23	20	57,96	0,92	400	3359,3616	0,8464	1159,2	18,4	53,3232
24	20	65,55	1,15	400	4296,8025	1,3225	1311	23	75,3825
25	30	19	0,2	900	361	0,04	570	6	3,8
26	30	26,66	0,31	900	710,7556	0,0961	799,8	9,3	8,2646
27	30	37,44	0,48	900	1401,7536	0,2304	1123,2	14,4	17,9712
28	30	41,25	0,55	900	1701,5625	0,3025	1237,5	16,5	22,6875
29	30	51,83	0,73	900	2686,3489	0,5329	1554,9	21,9	37,8359
30	30	58,1	0,83	900	3375,61	0,6889	1743	24,9	48,223
31	30	65,96	0,97	900	4350,7216	0,9409	1978,8	29,1	63,9812
32	30	69,12	1,08	900	4777,5744	1,1664	2073,6	32,4	74,6496
33	40	18,36	0,19	1600	337,0896	0,0361	734,4	7,6	3,4884
34	40	28	0,28	1600	784	0,0784	1120	11,2	7,84
35	40	36,96	0,42	1600	1366,0416	0,1764	1478,4	16,8	15,5232
36	40	52,65	0,65	1600	2772,0225	0,4225	2106	26	34,2225
37	40	60	0,75	1600	3600	0,5625	2400	30	45
38	40	63,75	0,85	1600	4064,0625	0,7225	2550	34	54,1875
39	40	70,7	1,01	1600	4998,49	1,0201	2828	40,4	71,407
40	40	75,6	1,2	1600	5715,36	1,44	3024	48	90,72
41	50	22	0,2	2500	484	0,04	1100	10	4,4
42	50	28,56	0,28	2500	815,6736	0,0784	1428	14	7,9968
43	50	40,32	0,42	2500	1625,7024	0,1764	2016	21	16,9344
44	50	55,25	0,65	2500	3052,5625	0,4225	2762,5	32,5	35,9125
45	50	60,75	0,75	2500	3690,5625	0,5625	3037,5	37,5	45,5625
46	50	64,6	0,85	2500	4173,16	0,7225	3230	42,5	54,91
47	50	71,71	1,01	2500	5142,3241	1,0201	3585,5	50,5	72,4271
48	50	78	1,2	2500	6084	1,44	3900	60	93,6
сумма	1200	2086,46	30,94	44000	106777,521	24,6608	58014,5	787,5	1597,5198
среднее	25	43,4679167	0,64458333	916,666667	2224,53169	0,51376667	1208,63542	16,40625	33,2816625
	P	Q	M	P*P	Q*Q	M*M	P*Q	P*M	Q*M

r <sub>qp</sub>	0,00124771	0,03532289
r <sub>qm</sub>	0,15982032	0,39977534
r <sub>pm</sub>	0,01017511	0,10087177
R <sub>q,pm</sub>	0,02554268	0,15982077

1,2  
0,14

Проверка значимости R<sub>q,pm</sub> по F-критерию  
 $F = 0,58977468$   
 $F_{кр}$  при  $\alpha=0.05$ ,  $n=48$  и  $p=3$  4,06  
 т.к.  $F < F_{кр}$  то R<sub>q,pm</sub> не значим

## Приложение В

### Расчет корреляционных отношений

#### Корреляционное отношение Q и P

P, кВт		Q, кВт									межгрупповая дисп.		
		0\10	10\20	20\30	30\40	40\50	50\60	60\70	70\80	n	Qi	Qicp	(Q-Qicp) <sup>2</sup> *n
		5	15	25	35	45	55	65	75				
0-10	0	1	1	1	2	3	0	0	0	8	250	31,25	1400,08681
10-20	10	0	1	1	2	1	3	0	0	8	320	40	160,503472
20-30	20	0	1	1	2	1	2	1	0	8	330	41,25	83,4201389
30-40	30	0	1	1	1	1	2	2	0	8	360	45	2,17013889
40-50	40	0	0	1	1	1	1	2	2	8	395	49,375	191,753472
50-60	50	0	0	0	0	2	2	2	2	8	480	60	1927,17014
		1	4	5	8	9	10	7	4	48		44,4791667	78,4396701

Pi

Picp

Корреляционное отношение Q и P

0,2341

0,4838

общая дисперсия 335,08

Критерий Фишера

**6,88**

что больше табличного значения, т.е.

корреляционное отношение значимо.

#### Корреляционное отношение Q и M

43,5416667

P, кВт		Q, кВт								межгрупповая дисп.			
		0-10	10\20	20\30	30\40	40\50	50\60	60\70	70\80	n	Qi	Qicp	(Q-Qicp) <sup>2</sup> *n
		5	15	25	35	45	55	65	75				
0.1\0.3	0,2	1	5	4						10	180	18	6523,76736
0.3\0.50	0,4			3	5					8	250	31,25	1208,68056
0.5\0.7	0,6				3	2	2			7	305	43,57	0,0062004
.0.7\0.9	0,8				1	2	4	4		11	605	55	1444,22743
0.9\1.2	1					2	3	3	2	10	600	60	2708,76736
1.2\1.4	1,2								2	2	150	75	1979,25347
		6	5	7	9	6	9	7	4	48		47,1369048	288,847966

Корреляционное отношение Q и M

0,862

0,9285

общая дисперсия 335,08

#### Корреляционное отношение P и M

0,64458333

P, кВт	M						n
	0.1\0.3	0.3\0.50	0.5\0.7	0.7\0.9	0.9\1.2	1.2\1.4	
0,00	2	1	1	2	2	0	8
10\20	1	2	1	2	2	0	8
20-30	2	1	2	1	2	0	8
30-40	1	2	1	2	2	0	8
40-50	2	1	1	2	1	1	8
50-60	2	1	1	2	1	1	8

межгрупповая дисп.		
Qi	Qicp	(Q-Qicp) <sup>2</sup> *n
5	0,625	0,00307328
5,2	0,65	0,00023328
4,8	0,6	0,01591328
5,2	0,65	0,00023328
5,2	0,65	0,00023328
5,2	0,65	0,00023328
5,2	0,65	0,00023328
		0,00041499

Корреляционное отношение M и P

0,0006

0,0254

общая дисперсия 335,08

## Приложение Г

Данные для расчета коэффициентов уравнения регрессии при  $P=0$

P, кВт	Q, кВт	M, кг/с	lnM	lnM*lnM	lnM*Q	Qрасч	е	
0	9,38	0,14	-1,96611286	3,86559976	-18,4421386	7,50640056	3,51037487	
0	17,55	0,27	-1,30933332	1,71435374	-22,9787998	19,8407203	5,24739927	
0	25,2	0,4	-0,91629073	0,83958871	-23,0905264	27,2220601	4,08872687	
0	33,55	0,55	-0,597837	0,35740908	-20,0574314	33,2026211	0,12067208	
0	39,76	0,71	-0,34249031	0,11729961	-13,6174147	37,998032	3,10453124	
0	42,33	0,83	-0,18632958	0,03471871	-7,88733104	40,9307305	1,95795507	
0	43,65	0,97	-0,03045921	0,00092776	-1,32954441	43,8579761	0,04325405	
0	45,51	1,11	0,10436002	0,01089101	4,7494243	46,3898811	0,77419073	
среднее	32,11625		-0,65556162	0,86759855	-12,8317203	256,948422	18,8471042	0,07334976
						32,1185527	1,53489023	0,04778828

b= 18,7797085
---------------

a= 44,4275062
---------------

Аппроксимация функцией  $Q=44.43+18.78*\ln M$

P, кВт	Уравнение регрессии	а	в	коэф вариации
0	$Q=44.43+18.78*\ln M$	44,43	18,78	4,778
10	$Q=52.24+23.92*\ln M$	52,24	23,92	6,183165894
20	$Q=59.36+29.19*\ln M$	59,36	29,19	5,05
30	$Q=63.62+30.56*\ln M$	63,62	30,56	6,781084132
40	$Q=68.67+31.93*\ln M$	68,67	31,93	7,733827204
50	$Q=70.38+31.85*\ln M$	70,38	31,85	4,689085104
25		59,7833333	27,705	

## Приложение Д

### Расчет обобщенного коэффициента вариации

Расчет обобщенного коэффициента вариации

Мощность	Расход воздуха	Тепловой поток		Квадрат отклонений		
		Q, кВт	Qрасч, кВт			
0	0,14	9,38	4,969085188	19,45616948		
0	0,27	17,55	18,90594695	1,838592131		
0	0,4	25,2	27,24631067	4,187387357		
0	0,55	33,55	34,00389884	0,206024161		
0	0,71	39,76	39,42235564	0,114003711		
0	0,83	42,33	42,73608635	0,164906124		
0	0,97	43,65	46,04365562	5,729587214		
0	1,11	45,51	48,90451953	11,52276281		
10	0,15	10,2	6,75957316	11,83653684		
10	0,31	20,77	24,04413321	10,71994828		
10	0,48	31,68	34,45419394	7,696152024		
10	0,6	38,4	39,7672419	1,869350408		
10	0,71	44,73	43,77530574	0,911441122		
10	0,85	51	48,06042429	8,641105363		
10	0,95	52,25	50,70870666	2,375585158		
10	1,05	53,55	53,09169381	0,210044565		
20	0,18	12,96	11,8993215	1,125038884		
20	0,29	21,17	24,490117	11,0231769		
20	0,45	33,75	36,08939682	5,472777481		
20	0,51	37,23	39,39370379	4,681614107		
20	0,69	48,3	47,37391881	0,857626368		
20	0,81	53,46	51,60696477	3,433739552		
20	0,92	57,96	54,96872552	8,947722991		
20	1,15	65,55	60,85971528	21,99877077		
30	0,2	19	15,75239492	10,54693877		
30	0,31	26,66	28,45740537	3,230666051		
30	0,48	37,44	41,13223361	13,63258906		
30	0,55	41,25	45,07870535	14,65898464		
30	0,73	51,83	53,28653551	2,121495683		
30	0,83	58,1	57,00830553	1,19179682		
30	0,97	65,96	61,52698758	19,65159916		
30	1,08	69,12	64,64110058	20,06053999		
40	0,19	18,36	15,20410849	9,959651232		
40	0,28	28	27,44974396	0,302781712		
40	0,42	36,96	40,25433207	10,8526238		
40	0,65	52,65	54,04587551	1,948468439		
40	0,75	60	58,56500015	2,059224564		
40	0,85	63,75	62,51765221	1,518681084		
40	1,01	70,7	67,96423145	7,484429568		
40	1,2	75,6	73,40771476	4,806114558		
50	0,2	22	17,89550653	16,84686663		
50	0,28	28,56	29,39276286	0,693493977		
50	0,42	40,32	43,2475056	8,570289047		
50	0,65	55,25	58,17014776	8,527262923		
50	0,75	60,75	63,05990358	5,335654569		
50	0,85	64,6	67,33672818	7,489681126		
50	1,01	71,71	73,23000281	2,310408528		
50	1,2	78	79,1199276	1,254237819		
				2087,319807	320,0745436	Сумма
				43,48582931	6,668219657	Средние значения
					2,582289615	Среднеквадратичное отклонение
					<b>5,938232422</b>	<b>Обобщенный Коэфф. вариации</b>

Расчет множественного коэффициента корреляции

Тепловой поток		Квадрат отклонений	
Q, кВт	Qрасч, кВт	(Q-Qрасч) <sup>2</sup>	(Q-Qсред) <sup>2</sup>
9,38	4,969085188	19,45616948	1162,1281
17,55	18,90594695	1,838592131	671,8464
25,2	27,24631067	4,187387357	333,7929
33,55	34,00389884	0,206024161	98,4064
39,76	39,42235564	0,114003711	13,7641
42,33	42,73608635	0,164906124	1,2996
43,65	46,04365562	5,729587214	0,0324
45,51	48,90451953	11,52276281	4,1616
10,2	6,75957316	11,83653684	1106,8929
20,77	24,04413321	10,71994828	515,29
31,68	34,45419394	7,696152024	139,0041
38,4	39,7672419	1,869350408	25,7049
44,73	43,77530574	0,911441122	1,5876
51	48,06042429	8,641105363	56,7009
52,25	50,70870666	2,375585158	77,0884
53,55	53,09169381	0,210044565	101,6064
12,96	11,8993215	1,125038884	930,8601
21,17	24,490117	11,0231769	497,29
33,75	36,08939682	5,472777481	94,4784
37,23	39,39370379	4,681614107	38,9376
48,3	47,37391881	0,857626368	23,3289
53,46	51,60696477	3,433739552	99,8001
57,96	54,96872552	8,947722991	209,9601
65,55	60,85971528	21,99877077	487,5264
19	15,75239492	10,54693877	598,7809
26,66	28,45740537	3,230666051	282,5761
37,44	41,13223361	13,63258906	36,3609
41,25	45,07870535	14,65898464	4,9284
51,83	53,28653551	2,121495683	69,8896
58,1	57,00830553	1,19179682	214,0369
65,96	61,52698758	19,65159916	505,8001
69,12	64,64110058	20,06053999	657,9225
18,36	15,20410849	9,959651232	630,5121
28	27,44974396	0,302781712	239,3209
36,96	40,25433207	10,8526238	42,3801
52,65	54,04587551	1,948468439	84,2724
60	58,56500015	2,059224564	273,2409
63,75	62,51765221	1,518681084	411,2784
70,7	67,96423145	7,484429568	741,4729
75,6	73,40771476	4,806114558	1032,3369
22	17,89550653	16,84686663	460,9609
28,56	29,39276286	0,693493977	222,3081
40,32	43,2475056	8,570289047	9,9225
55,25	58,17014776	8,527262923	138,7684
60,75	63,05990358	5,335654569	298,5984
64,6	67,33672818	7,489681126	446,4769
71,71	73,23000281	2,310408528	797,4976
78	79,1199276	1,254237819	1192,3209
2086,46	2087,319807	320,0745436	4173808,14
43,46791667	43,48582931	6,668219657	0,999923314
		<b>0,999961656</b>	Множественный коэффициент корреляции

## Приложение Е

### Сводная таблица статей расходов по вариантам энергоснабжения буровых установок разведочного бурения

			Вариант I - ПДЭС с УУТ	Вариант II - ГДЭС	Вариант III - СДЭС	Вариант IV - ЦЭС
ДЭС, Дизель-агрегат	К <sub>ДЭС</sub>	Капиталовложения (СарЕх)	×	×	×	
Печи	К <sub>п</sub>			×	×	
Теплоэлектронагреватели (ТЭН)	К <sub>Э</sub>			×	×	×
Теплоутилизаторы (УУТ)	К <sub>ут</sub>		×			
Магистральная ЛЭП	К <sub>ЛЭП</sub>				×	×
Повышающая ТП	К <sub>ТРВ</sub>				×	
Понижающая ТП	К <sub>ТРН</sub>				×	×
Зарплата персонала	Б-1	Эксплуатационные расходы (ОрЕх)	×	×	×	×
Топливо для ДЭС	Б-2		×	×	×	
Печное топливо	Б-3			×	×	
Потери э/энергии в НВ сетях	Б-4		×	×	×	×
Сооружение НВ распредел. линий	Б-5				×	×
Сооружение ВВ распредел. линий	Б-6				×	×
Потери э/энергии в магистральной ЛЭП	Б-7					×
Потери э/энергии в трансформаторах	Б-8				×	×
Э/энергия по тарифам	Б-9					×
Прочие затраты	Б-10		×	×	×	×