

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»**

Шадрин Андрей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ
УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Ляхомский Александр Валентинович

Москва, 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В числе стратегических задач РФ является задача развития энергосбережения и повышения энергоэффективности в отраслях топливно-энергетического комплекса.

Существующие темпы снижения энергоемкости ВВП РФ, несмотря на прикладываемые усилия, не соответствуют целевым (не менее чем 1,5% в год) показателям законодательных и нормативных документов.

Расширяющееся применение энергии, сопровождающееся увеличением стоимости и тарифов на энергоресурсы, обуславливает значительную долю энергетических затрат в себестоимости продукции промышленных предприятий. Особенно это характерно для предприятий отраслей минерально-сырьевого комплекса. Так, доля затрат на энергетические ресурсы в себестоимости продукции предприятий угольной отрасли достигает 15-20%, горнорудной – 20-30%.

Энергоэффективность в значительной мере обусловлена энерготехнологической результативностью основных производственных процессов, на долю которых приходится 75–90% потребления энергетических ресурсов промышленных предприятий.

Поэтому исследования, направленные на повышение энергоэффективности предприятий угольной отрасли на основе управления энерготехнологической результативностью производственных процессов, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. В разработку вопросов теории и практики повышения энергоэффективности существенный вклад внесли исследования Б. Н. Авилова-Карнаухова, В. В. Алексеева, Г. И. Бабокина, Б. П. Белых, С. Д. Волобрина, М. С. Ершова, Б. И. Заславца, Е. А. Зенютича, Б. А. Константинова, Н. А. Ковальчука, М. Г. Ладыгичева, В. Г. Лисиенко, А. В. Ляхомского, С.А. Малофеева, Ю. П. Миновского, Г. В. Никифорова, В. К. Олейникова, Е.Н. Перфильевой, А.Б. Петроченкова, С.В. Петухова, Л. А. Плащанского, Ю. В. Шевырева, Я. М. Щелокова, В. И. Щуцкого и др.

В работах указанных авторов, в основном, рассматривались вопросы, касающиеся: оптимизации режимов энергопотребления, развития теории, разработки методов, научно-технических решений по повышению энергоэффективности. Однако, в проведенных исследованиях не в полной мере учитывается энерготехнологический аспект повышения энергоэффективности.

Объектом исследования диссертационной работы является электропотребление производственных процессов вскрыши, добычи, обогащения предприятий угольной отрасли.

Предметом исследования является энерготехнологическая результативность производственных процессов вскрыши, добычи, обогащения предприятий угольной отрасли.

Идея работы состоит в том, что улучшение энерготехнологической результативности производственных процессов обеспечит повышение энергоэффективности предприятий угольной отрасли.

Целью работы является повышение энергетической эффективности предприятий угольной отрасли на основе улучшения энерготехнологической результативности производственных процессов.

Для достижения указанной цели диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать методику исследования энергоэффективности предприятий угольной отрасли, обеспечивающую выполнение исследований: энерготехнологических показателей с определением их статистических характеристик, вероятностных моделей; энерготехнологической результативности производственных процессов.

2. Провести исследование вероятностно-статистических свойств энерготехнологических показателей производственных процессов.

3. Разработать вероятностно-статистический подход и провести исследования энерготехнологической результативности производственных процессов с определением потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления.

4. Разработать рекомендации по повышению энергоэффективности предприятий угольной отрасли.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач использовались методы теории электроснабжения промышленных предприятий, электропотребления, вероятностей, математической статистики, энергетического менеджмента. При проведении исследований использовались методы корреляционно-регрессионного анализа, наименьших квадратов, Граббса, Шапиро-Уилка, Дарбина-Уотсона, Чеддока. При обработке экспериментальных данных использовались пакет прикладных программ Excel, локальная веб-программа Jupyter Notebook для языка программирования Python.

Научная новизна диссертационной работы заключается в: обосновании вероятностно-статистического подхода к исследованию энерготехнологической результативности производственных процессов; разработке методических принципов исследования энергоэффективности с учетом энерготехнологической результативности производственных процессов; разработке метода исследования энерготехнологической результативности с оценкой потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления производственных процессов; установлении вероятностных моделей и энерготехнологических профилей циклично-поточной и циклической технологий выемочно-погрузочных и обогатительных работ.

Научные положения, выносимые на защиту.

1 Вероятностно-статистический подход к исследованию энерготехнологической результативности производственных процессов.

2. Методические принципы исследования энергоэффективности с учетом энерготехнологической результативности производственных процессов.

3. Метод исследования энерготехнологической результативности с оценкой потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления.

4. Установленные вероятностные модели и энерготехнологические профили циклично-поточной, цикличной технологий выемочно-погрузочных работ и обогатительных работ по производству угольного концентрата.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается научным обоснованием постановки задач исследования, корректным использованием общепризнанных теорий и методов, статистической значимостью и высоким уровнем сходимости (до 10%) теоретических результатов с данными экспериментальных исследований, внедрением результатов работ в производственную и учебную практику.

Значение полученных результатов работы:

для теории – в разработке вероятностно-статистического подхода к исследованию энерготехнологической результативности производственных процессов; метода исследования энерготехнологической результативности с оценкой потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления; методических принципов исследования энергоэффективности с учетом энерготехнологической результативности основных производственных процессов; установлении вероятностных моделей и энерготехнологических профилей циклично-поточной и цикличной технологий выемочно-погрузочных работ, а также обогатительных работ по производству угольного концентрата.

для практики – в разработке методики исследования энергоэффективности с учетом энерготехнологической результативности производственных процессов; получении оценок статистических характеристик энерготехнологических показателей производственных процессов; определении значений потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ, выполняемых по циклично-поточной и цикличной технологиям, а также обогатительных работ по производству угольного концентрата; разработке рекомендаций, обеспечивающих повышение энергоэффективности.

Реализация результатов работы.

Вероятностно-статистический подход, методические принципы и методика анализа энерготехнологической результативности основных производственных процессов внедрены и используются в региональном производственном объединении «СУЭК-Хакасия».

Основные научные результаты диссертации используются в учебном процессе НИТУ МИСИС при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», специалистов по направлению 21.05 «Горное дело», магистров по направлению 13.03 «Электроэнергетика и электротехника».

Личный вклад автора состоит в определении статистических характеристик и вероятностных моделей энерготехнологических показателей производственных процессов, установлении зависимостей полного и удельного электропотребления от объемов выемочно-погрузочных и обогатительных работ, установлении вероятностных распределений количества смен/суток в %, отработавших в определенном интервале энерготехнологических показателей основных производственных процессов, определении потенциалов повышения сменной производительности и повышения энергоэффективности – снижения удельного электропотребления выемочно-погрузочных и обогатительных работ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 2023 г.); XIX Форум-конкурс «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2023 г.); «Энергетика будущего – цифровая трансформация» (г. Липецк, ФГБОУ ВО «ЛГТУ», 2023 г.); Симпозиумы «Неделя-горняка» (г. Москва, НИТУ МИСИС, 2021-2024 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в числе которых 3 научные статьи, входящие в Перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК РФ, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 91 наименование, 13 приложений. Общий объем работы 176 стр., из которых 100 стр. основного текста, включая 33 рисунка, 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы объект и предмет исследования, идея, цель и задачи диссертационной работы, показана методология и методы исследования, новизна научных положений, практическая и теоретическая ценность работы, приведены сведения о реализации ее результатов.

В первой главе выполнен анализ состояния энергоэффективности промышленных предприятий.

Проведен обзор исследований по энергопотреблению, энергосбережению и повышению энергоэффективности, касающийся режимов электропотребления; положений, методов, способов и процедур повышения эффективности использования энергетических ресурсов; организационных, мотивационных, информационных, маркетинговых и

инвестиционных аспектов управления энергетической эффективностью; функционала систем энергетического менеджмента.

Проведённый обзор исследований показывает научно-техническую и практическую актуальность вопросов энергопотребления, энергосбережения и повышения энергоэффективности промышленных предприятий. Вместе с этим вышеуказанный обзор показывает:

1. На промышленных предприятиях существует потенциал повышения энергоэффективности, для реализации которого, наряду с другим, целесообразно повысить уровень аналитического энерготехнологического описания производственных процессов.

2. При исследовании процесса электропотребления недостаточно учитывается вероятностно-статистический характер энерготехнологической результативности производственных процессов, которые в значительной степени обуславливают энергоэффективность предприятий.

3. В информационном обеспечении повышения энергоэффективности недостаточно внимания уделяется связи между натуральным и финансовым измерениями энерготехнологической результативности, что снижает мотивационный аспект управления энергоэффективностью.

На основании вышеизложенного сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе разработана методика исследования энергоэффективности предприятий угольной отрасли, обеспечивающая выполнение исследований: энерготехнологических показателей с определением их статистических характеристик, распределением вероятностей и аналитических зависимостей электропотребления от объемов выполняемых работ; энерготехнологической результативности производственных процессов.

Обоснованы и сформулированы следующие основные методические принципы исследования энергоэффективности:

1. Энерготехнологические показатели основных производственных процессов – объемы работ, полное и удельное электропотребление – являются случайными величинами, обусловленные вероятностным влиянием горно-геологических, климато-метеорологических, производственно-технологических, организационно-управленческих и иных факторов. Это требует для анализа и оценки энерготехнологических показателей применение методов теории вероятностей и математической статистики.

2. Энерготехнологическая результативность основных производственных процессов характеризуется комплексным показателем – удельным электропотреблением, интегрирующим технологический показатель производственных процессов – объемы работ, с энергетическим показателем – потреблением электроэнергии.

3. Энерготехнологическая результативность определяется как разность между плановым (заданным) и фактическим удельным электропотреблением.

4. Анализ и оценка энерготехнологической результативности основных производственных процессов должны быть связаны с отчетными

временными периодами деятельности предприятий – сменой, сутками, месяцем, кварталом, годом.

5. Оперативное управление энерготехнологической результативностью как технических (машины, оборудование), так и организационно-производственных (смена, участок) энергопотребляющих объектов должно проводиться в сменном формате времени.

6. Исходные фактические энерготехнологические показатели - объемы работ (Q_i), полное (W_i) и удельное электропотребление (w_i) - для анализа и оценки управления энерготехнологической результативностью определяются на основе результатов энерготехнологического мониторинга.

Вышеизложенные методические принципы позволяют разработать методику исследования энергоэффективности предприятий угольной отрасли, включающую исследование как вероятностно-статистических свойств энерготехнологических показателей, так и энерготехнологической результативности основных производственных процессов.

На основании данных мониторинга энерготехнологических показателей основных производственных процессов формируются исходные статистические ряды:

$$X_i = X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n \quad (1)$$

где X_i – значение энерготехнологического показателя;

n – число наблюдаемых значений энерготехнологических показателей, $i = 1, 2, \dots, n$.

При мониторинге и формировании статистических выборок энерготехнологических показателей могут возникать аномальные условия, когда влияние некоторых из вышеуказанных факторов (п.2.1) начинает преобладать. Это может вызвать аномальные отклонения значений энерготехнологических показателей от среднего значения статистического ряда. В этом случае требуется определить, являются ли эти значения "выбросами".

Проверка статистических рядов на наличие «выбросов» выполнялась по критерию Граббса.

На основании корректировки («очищение») исходных статистических рядов формировались упорядоченные ряды энерготехнологических показателей - объемов работ (Q_y), полного (W_y) и удельного электропотребления (w_y) – для первой, второй смен и суток.

Для упорядоченных рядов определялись статистические характеристики энерготехнологических показателей для циклично-поточной технологии добычи и погрузки угля, циклических технологий транспортной вскрыши и приемки вскрышных пород в отвалы.

На основе упорядоченных статистических рядов формировались интервальные вариационные ряды энерготехнологических показателей, для которых определялись: оптимальная величина интервала ($h(X)$), число интервалов (l) в интервальном ряду.

На основании интервальных вариационных рядов строились гистограммы экспериментальных распределений плотности вероятностей $P(X)$ анализируемых энерготехнологических показателей.

Анализ гистограмм позволял: определять характер распределений вероятностей значений анализируемых энерготехнологических показателей (симметрию, моно- или полимодальность, остро- или плосковершинность); провести оценку физической сущности условий формирования значений энерготехнологического показателя как случайной величины.

При ведении основных производственных процессов значения энерготехнологических показателей, в большинстве случаев, формируются в следующих условиях:

1. Существует значительное количество горно-геологических, климато-метеорологических, организационно-управленческих и иных факторов, оказывающих влияние на энерготехнологические показатели.

2. Факторы влияют на значения энерготехнологических показателей случайным образом.

3. Ни один из факторов не оказывает доминирующего влияния на энерготехнологические показатели.

В этом случае можно сделать предположение и сформулировать нулевую гипотезу (H_0) о том, что распределение вероятностей значений энерготехнологических показателей (объемов работ, полного и удельного электропотребления) подчиняется нормальному закону распределения.

Подтверждение нулевой гипотезы выполнено по критерию согласия Шапиро-Уилка ($W_{кр}$), который при доверительной вероятности 0,95 позволил определить область принятия нулевой гипотезы.

Вместе с этим для оперативного управления энерготехнологической результативностью требуется установить аналитические зависимости энергетических показателей производственных процессов – полного и удельного электропотребления от технологического показателя – объема выполняемых работ.

Предварительный анализ диаграмм рассеяния корреляционных полей в осях – «объем работ»-«электропотребление», «объем работ»-«удельное электропотребление» позволяет сделать предположение о виде энерготехнологических зависимостей полного и удельного электропотребления от объема выполняемых работ, соответствующих линейным выражениям:

$$W = a_0 + a_1 Q, w = a_0 - a_1 Q, \quad (2)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты соответствующего уравнения.

Статистическая значимость коэффициентов корреляции (R_{WQ}, R_{wQ}), их интервальных оценок, коэффициентов детерминации (R_{WQ}^2, R_{wQ}^2), коэффициентов a_0 и a_1 зависимостей электропотребления от объемов работ определялась по критериям Стьюдента и Фишера.

Точность зависимостей электропотребления от объемов работ определялась по средней относительной ошибке аппроксимации по шкале Чеддока.

Условия некоррелированности остатков ($\bar{\epsilon}$) по критерию Дарбина-Уотсона ($d_{расч}$) подтверждают правомерность использования метода наименьших квадратов при установлении зависимостей электропотребления от объемов работ.

Оценка влияния изменения объема работ на 1% на изменение полного и удельного расхода электроэнергии определена с применением коэффициента эластичности ($\bar{\epsilon}$).

Исследование энерготехнологической результативности основных производственных процессов с применением вероятностно-статистического подхода позволяет выполнить оценку потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления.

Алгоритм методики исследования энерготехнологической результативности основных производственных процессов представлен на рис.1.

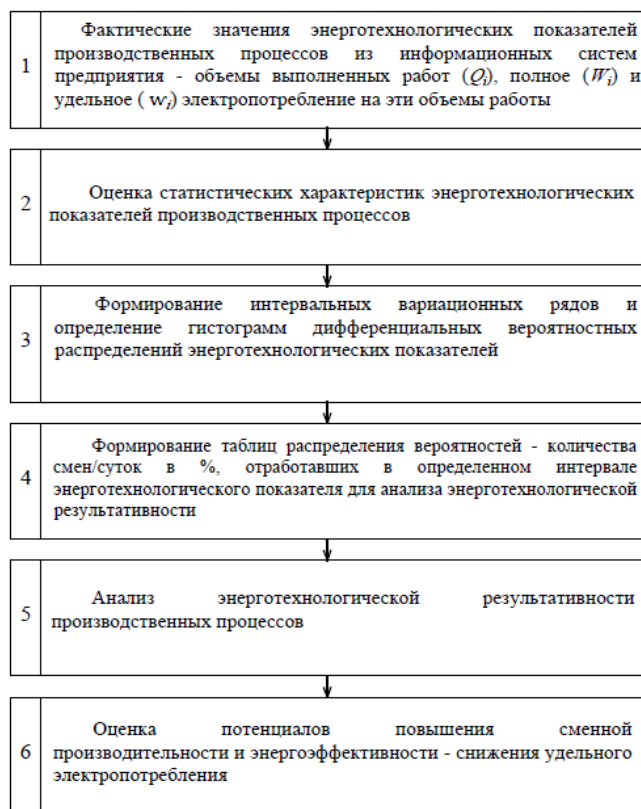


Рис. 1 - Алгоритм методики исследования энерготехнологической результативности основных производственных процессов

Для анализа энерготехнологической результативности формируются таблицы распределения вероятностей - количества смены/суток в %, отработавших в определенном интервале энерготехнологического показателя (табл.2).

Таблица 2 - Количество смен/суток в %, отработавших в определенном интервале энерготехнологического показателя

Показатель	Количество смен/суток (%), отработавших в интервале энерготехнологического показателя			
	$X_{\min 1} \div X_{\max 1}$	$X_{\min 2} \div X_{\max 2}$	...	$X_{\min j} \div X_{\max j}$
Количество смен/суток, %	m'_1	m'_2	...	m'_j

Дифференциальные распределения показывают вероятность – количество смен/суток в %, отработавших в определенном интервале энерготехнологического показателя в течение анализируемого месяца.

На основании анализа данных табл.2 определяются потенциалы повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления.

Потенциал повышения сменной производительности определяется по выражению

$$Q_{\text{пов.см.пр.}} = \bar{Q}_{\text{см}} - Q_{\text{см.ср.взв.мин}}, \quad (3)$$

где $\bar{Q}_{\text{см}}$ – среднесменный объем работ за месяц;

$Q_{\text{см.ср.взв.мин}}$ – средневзвешенный объем работ смен, отработавших в интервалах меньше среднесменного за месяц.

Потенциал повышения энергоэффективности – снижения удельного электропотребления определяется по выражению

$$w_{\text{сниж.см.}} = w_{\text{ср.взв.мах}} - \bar{w}_{\text{см}}, \quad (4)$$

где $\bar{w}_{\text{см}}$ – среднесменное удельное электропотребление за месяц;

$w_{\text{ср.взв.мах}}$ – средневзвешенное удельное электропотребление смен, отработавших в интервалах больше среднесменного за месяц.

Методика исследования повышения энергоэффективности обеспечивает выполнение исследований: энерготехнологических показателей с определением их статистических характеристик, установлением вероятностных моделей и энерготехнологических профилей; энерготехнологической результативности производственных процессов.

В третьей главе выполнено исследование вероятностно-статистических свойств энерготехнологических показателей производственных процессов предприятий с открытой разработкой и обогащения угля.

На предприятии с открытой разработкой угля исследование вероятностно-статистических свойств энерготехнологических показателей выполнено для производственных процессов:

1. Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии с экскаваторным парком в составе: ЭР-2500 – 2 ед., ЭР-1600 – 2 ед., ЭР-1250 – 4 ед.

2. Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии с экскаваторным парком в составе: ЭКГ-15 – 1 ед., ЭКГ-12.5 – 4 ед., ЭКГ-10 – 1 ед., ЭКГ-8ус – 3 ед.

3. Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии с экскаваторным парком в составе: ЭШ-13/50 – 1ед., ЭШ-10/70 – 1 ед., ЭКГ-10 – 2 ед., ЭКГ-8и – 2 ед., ЭКГ-8ус – 1 ед., ЭКГ-6.3ус – 1 ед.

На предприятии по обогащению угля исследование вероятностно-статистических свойств энерготехнологических показателей производственных процессов выполнено для обогатительных и погрузочно-разгрузочных работ производства угольного концентрата.

На основании данных, полученных по результатам энерготехнологического мониторинга, сформированы исходные статистические ряды энерготехнологических показателей выемочно-погрузочных работ. С использованием критерия Граббса, проведена проверка и исключение «выбросов» из исходных статистических рядов.

На основании очищенных от выбросов исходных статистических рядов сформированы упорядоченные статистические ряды и рассчитаны статистики энерготехнологических показателей выемочно-погрузочных работ, приведенные в табл.3.

Таблица 3 – Статистики энерготехнологических показателей выемочно-погрузочных работ – добыча и погрузка угля, вскрыша, приемка в отвалы горной породы

Статистические характеристики	Объемы работ (Q_i), м ³ (т)			Удельное электропотребление (w_i), кВт·ч/м ³ (кВт·ч/т) ¹⁾		
	смена 1	смена 2	сутки	смена 1	смена 2	сутки
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии						
Среднее значение, $\bar{X}$	24970,8	27904,1	52829,7	0,81	0,78	0,79
Медиана, Me	24467,0	27232,0	52440,0	0,8	0,77	0,78
Среднеквадратическое отклонение, σ_x	3970,9	3559,4	5884,0	0,12	0,08	0,09
Коэффициент вариации, V , %	15,9	12,76	11,14	14,45	9,76	10,93
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии						
Среднее значение, $\bar{X}$	22962,8	27443,3	50406,1	1,15	1,04	1,09
Медиана, Me	23096,0	27166,0	50294,0	1,15	1,05	1,13
Среднеквадратическое отклонение, σ_x	2334,0	3387,1	4163,1	0,13	0,14	0,12
Коэффициент вариации, V , %	10,16	12,34	8,26	11,22	13,59	11,03
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии						
Среднее значение, $\bar{X}$	18034,6	22044,2	40509,9	0,93	0,80	0,84
Медиана, Me	18076,5	21062,5	40449,0	0,95	0,84	0,89
Среднеквадратическое отклонение, σ_x	3020,1	5880,8	9988,3	0,17	0,18	0,19
Коэффициент вариации, V , %	16,75	26,68	24,66	17,58	22,21	21,84

¹⁾ Размерность процесса добычи и погрузки угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии в тоннах. Размерность транспортной вскрыши и приемки вскрышных пород в отвалы - м³.

Исследуемые энерготехнологические показатели выемочно-погрузочных работ характеризуются: близкими оценками среднего и медианы; коэффициенты вариации для процессов добычи и транспортной вскрыши находятся в диапазоне (8,26-15,9%); для приемки вскрышных пород в отвалы – (13,55-26,7%); асимметрия имеет незначительные положительные и отрицательные значения; эксцесс показывает незначительную положительную и отрицательную островершинность.

Коэффициенты вариации имеют относительно невысокие значения и характеризуют производственные процессы выемочно-погрузочных работ как процессы с невысоким «разбросом» значений объемов работ, полного и удельного электропотребления относительно средних значений.

Статистические характеристики дают возможность выдвинуть гипотезу о распределении вероятностей анализируемых энерготехнологических показателей по нормальному закону.

С применением критерия Шапиро-Уилка установлено, что со статистической значимостью 0,05 допустимо принять нормальные законы распределения вероятностей, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Вероятностные модели энерготехнологических показателей выемочно-погрузочных работ

№	Выемочно-погрузочные работы, смена/сутки	Энерготехнологические показатели	Вероятностные модели распределения	Критерий Шапиро-Уилка	
				$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{кр}}$
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии					
1	Смена 1	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-24970,8)^2}{31536729,0}}$	0,933	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$	$f^*(w) = 3,32 \times e^{-\frac{(w-0,81)^2}{0,03}}$	0,975	0,929
2	Смена 2	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-27904,1)^2}{25337944,8}}$	0,976	0,926
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$	$f^*(w) = 4,99 \times e^{-\frac{(w-0,78)^2}{0,01}}$	0,956	0,926
3	Сутки	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-52829,7)^2}{69242912,0}}$	0,967	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$	$f^*(w) = 4,43 \times e^{-\frac{(w-0,79)^2}{0,02}}$	0,967	0,929
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии					
4	Смена 1	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,0002 \times e^{-\frac{(Q-22962,8)^2}{10895485,4}}$	0,970	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 3,07 \times e^{-\frac{(w-1,15)^2}{0,03}}$	0,984	0,929
5	Смена 2	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-27443,3)^2}{22944757,3}}$	0,968	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 2,85 \times e^{-\frac{(w-1,04)^2}{0,04}}$	0,956	0,929
6	Сутки	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-50406,1)^2}{34662636,7}}$	0,933	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 3,32 \times e^{-\frac{(w-1,09)^2}{0,03}}$	0,971	0,929
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии					
7	Смена 1	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-18034,6)^2}{18242491,2}}$	0,968	0,927
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 2,35 \times e^{-\frac{(w-0,93)^2}{0,06}}$	0,977	0,927
8	Смена 2	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-22044,2)^2}{69168323,0}}$	0,934	0,927
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 2,22 \times e^{-\frac{(w-0,80)^2}{0,06}}$	0,957	0,927
9	Сутки	$Q_{\text{в}}, \text{м}^3$	$f^*(Q) = 0,00004 \times e^{-\frac{(Q-40509,9)^2}{199533072,8}}$	0,983	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/ м}^3$	$f^*(w) = 2,10 \times e^{-\frac{(w-0,84)^2}{0,07}}$	0,978	0,929

Гистограммы и вероятностные модели циклично-поточной технологии добычи и погрузки угля, циклических технологий транспортной вскрыши и

приемки вскрышных пород в отвалы выемочно-погрузочных работ первых смен приведены на рис.2–7.

Циклично-поточная технология добычи и погрузки угля

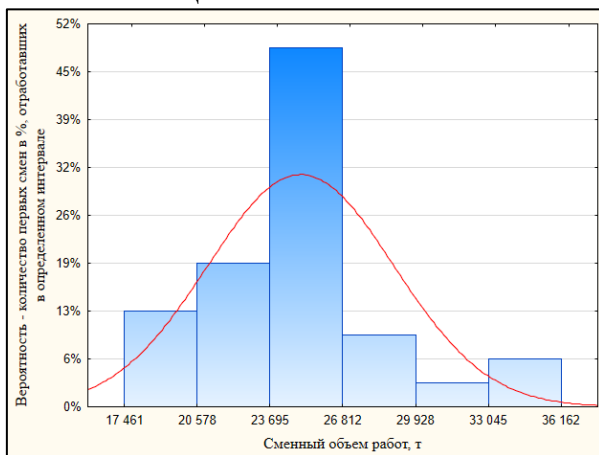


Рис. 2 – Вероятностная модель сменного объема работ

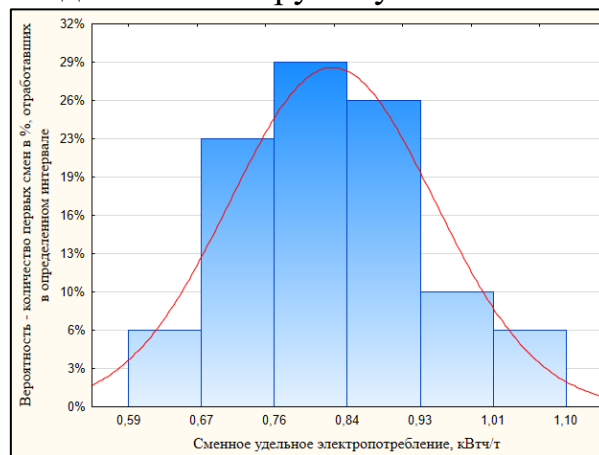


Рис. 3 - Вероятностная модель сменного удельного электропотребления

Цикличная технология транспортной вскрыши горных пород

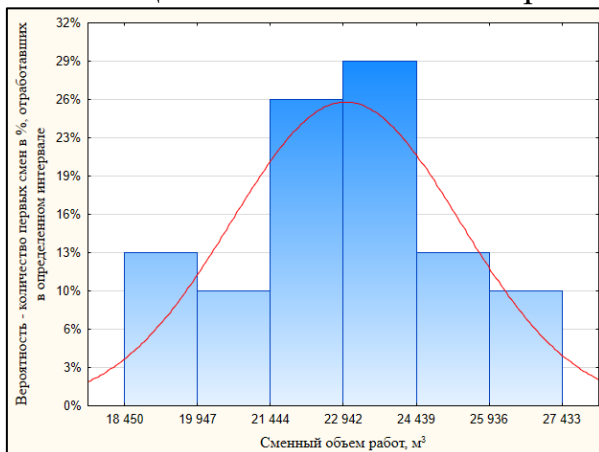


Рис. 4 – Вероятностная модель сменного объема работ

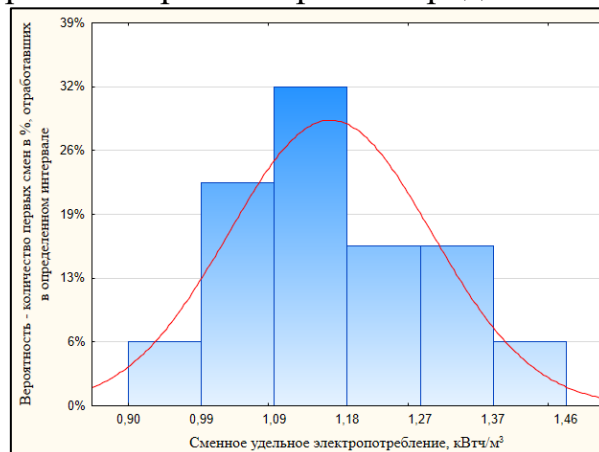


Рис. 5 - Вероятностная модель сменного удельного электропотребления

Цикличная технология приемки вскрышных пород в отвалы

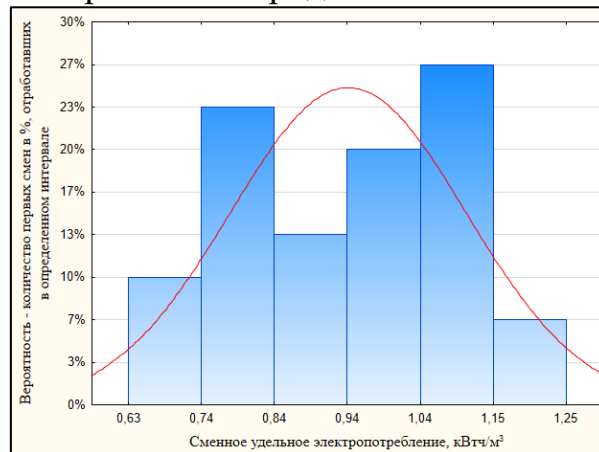
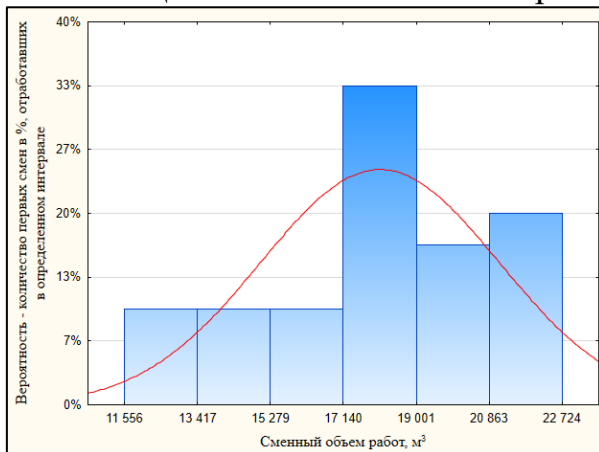


Рис. 6 – Вероятностная модель
сменного объема работ

Рис. 7 - Вероятностная модель
сменного удельного
электропотребления

На основании данных, полученных по результатам энерготехнологического мониторинга, сформированы исходные статистические ряды энерготехнологических показателей обогатительных работ. С использованием критерия Граббса, проведена проверка и исключение «выбросов» из исходных статистических рядов.

На основании очищенных от выбросов исходных статистических рядов сформированы упорядоченные статистические ряды и рассчитаны статистики энерготехнологических показателей обогатительных работ, приведенные в табл.5.

Таблица 5 – Статистики энерготехнологических показателей обогатительных работ – производство угольного концентрата и погрузочно-разгрузочные работы

Статистические характеристики	Объемы работ (Q_{is}), т			Удельное электропотребление (w_i), кВт·ч/т		
	смена 1	смена 2	сутки	смена 1	смена 2	сутки
Производство угольного концентрата						
Среднее значение, $\bar{X}$	7012,2	5818,1	12830,2	5,10	6,81	5,88
Медиана, Me	7355,0	6505,0	13156,0	5,38	5,97	5,73
Среднеквадратическое отклонение, σ_x	1156,5	2138,6	2798,5	1,77	3,99	1,34
Коэффициент вариации, V , %	16,49	36,76	21,81	31,82	29,16	21,98
Погрузочно-разгрузочные работы						
Среднее значение, $\bar{X}$	12083,0	11214,4	22808,9	0,21	0,26	0,23
Медиана, Me	12593,0	11038,0	23863,5	0,21	0,26	0,22
Среднеквадратическое отклонение, σ_x	2350,1	1816,1	4042,1	0,05	0,04	0,02
Коэффициент вариации, V , %	19,45	16,19	17,72	23,08	15,53	10,39

Исследуемые энерготехнологические показатели обогатительных работ характеризуются: близкими оценками среднего и медианы; коэффициенты вариации для производства угольного концентрата незначительно превышает значение 33%; для погрузочно-разгрузочных работ находится в диапазоне – (10,39-23,08%); асимметрия имеет незначительные положительные и отрицательные значения; эксцесс показывает незначительную положительную и отрицательную островершинность.

Коэффициенты вариации, имея относительно невысокие значения, характеризуют производственные процессы обогатительных работ как процессы с невысоким «разбросом» значений объемов работ, полного и удельного электропотребления относительно средних значений.

Статистические характеристики дают возможность выдвинуть гипотезу о распределении вероятностей анализируемых энерготехнологических показателей по нормальному закону.

С применением критерия Шапиро-Уилка установлено, что со статистической значимостью 0,05 допустимо принять нормальные законы распределения вероятностей, приведенные в таблице 6.

Таблица 6 – Вероятностные модели энерготехнологических показателей обогатительных работ

№	Обогатительные работы	Энерготехнологические показатели	Вероятностные модели распределения	Критерий Шапиро-Уилка	
				$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{кр}}$
Производство угольного концентрата					
1	Смена 1	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0003 \times e^{-\frac{(Q-7012,2)^2}{2674799,5}}$	0,931	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 0,23 \times e^{-\frac{(w-5,10)^2}{6,27}}$	0,965	0,929
2	Смена 2	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0002 \times e^{-\frac{(Q-5818,1)^2}{9147562,1}}$	0,973	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 0,10 \times e^{-\frac{(w-6,81)^2}{31,84}}$	0,933	0,929
3	Сутки	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-12830,2)^2}{15662756,7}}$	0,931	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 0,30 \times e^{-\frac{(w-5,88)^2}{3,59}}$	0,953	0,929
Погрузочно-разгрузочные работы					
4	Смена 1	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0002 \times e^{-\frac{(Q-12083,0)^2}{11045752,0}}$	0,956	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 7,98 \times e^{-\frac{(w-0,21)^2}{0,01}}$	0,969	0,929
5	Смена 2	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0002 \times e^{-\frac{(Q-11214,4)^2}{6596656,4}}$	0,975	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 9,97 \times e^{-\frac{(w-0,26)^2}{0,0032}}$	0,973	0,929
6	Сутки	$Q_{\text{в}}, \text{т}$	$f^*(Q) = 0,0001 \times e^{-\frac{(Q-22808,9)^2}{32677468,2}}$	0,959	0,929
		$w_{\text{в}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	$f^*(w) = 19,95 \times e^{-\frac{(w-0,23)^2}{0,0008}}$	0,945	0,929

Определенные статистики и установленные вероятностные модели повышают уровень аналитического описания энерготехнологических показателей для установления со статистической значимостью 0,05 устойчивых уровней объемов выемочно-погрузочных и обогатительных работ и удельного электропотребления смен, участков.

Для улучшения оперативного управления энерготехнологической результативностью установлены энерготехнологические зависимости – энерготехнологические профили выемочно-погрузочных и обогатительных работ по сменам $W_{\text{см}} = f(Q_{\text{см}})$, $w_{\text{см}} = f(Q_{\text{см}})$ и суткам $W_{\text{с}} = f(Q_{\text{с}})$, $w_{\text{с}} = f(Q_{\text{с}})$.

Анализ диаграмм рассеяния корреляционных полей полного и удельного расхода электроэнергии позволил предположить, что зависимости полного и удельного расхода электроэнергии от объема работ соответствуют линейным выражениям.

Установленные энерготехнологические зависимости (профили) выемочно-погрузочных работ и их характеристики приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Энерготехнологические зависимости (профили) полного и удельного расхода электроэнергии от сменной производительности выемочно-погрузочных работ

№ п/п	Выемочно-погрузочные работы, смена/сутки	Коэффициенты зависимостей		Коэффициенты		Точность зависимостей		Коэффициент эластичности
		a_0	a_1	Корреляции, R	Детерминации, R^2	$\bar{A}$	Степень точности	
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии, $W = a_0 + a_1 \cdot Q$								
1	Смена 1	13487	0,27	0,470	0,221	8,09	высокая	0,332
2	Смена 2	7558	0,50	0,687	0,472	6,87	высокая	0,651
3	Сутки	23706	0,34	0,484	0,235	6,76	высокая	0,205
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии, $w = a_0 - a_1 \cdot Q$								
4	Смена 1	1,35	$-0,20 \cdot 10^{-4}$	-0,707	0,499	8,74	высокая	-0,645
5	Смена 2	1,03	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	-0,423	0,179	6,79	высокая	-0,289
6	Сутки	1,24	$-0,80 \cdot 10^{-5}$	-0,560	0,314	6,91	высокая	-0,260
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии, $W = a_0 + a_1 \cdot Q$								
7	Смена 1	16231	0,44	0,399	0,159	7,82	высокая	0,385
8	Смена 2	26677	0,068	0,376	0,141	8,42	высокая	0,066
9	Сутки	50752	0,08	0,369	0,136	7,20	высокая	0,035
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии, $w = a_0 - a_1 \cdot Q$								
10	Смена 1	1,89	$-0,30 \cdot 10^{-4}$	-0,577	0,332	7,80	высокая	-0,635
11	Смена 2	1,77	$-0,30 \cdot 10^{-4}$	-0,623	0,388	8,20	высокая	-0,575
12	Сутки	1,96	$-0,20 \cdot 10^{-4}$	-0,591	0,349	6,96	высокая	-0,358
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии, $W = a_0 + a_1 \cdot Q$								
13	Смена 1	9419	0,40	0,481	0,231	12,00	хорошая	0,436
14	Смена 2	16503	0,05	0,410	0,168	12,54	хорошая	0,060
15	Сутки	31522	0,07	0,443	0,196	10,82	хорошая	0,035
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии, $w = a_0 - a_1 \cdot Q$								
16	Смена 1	1,46	$-0,30 \cdot 10^{-4}$	-0,526	0,277	11,68	хорошая	-0,553
17	Смена 2	1,32	$-0,20 \cdot 10^{-4}$	-0,712	0,507	12,64	хорошая	-0,485
18	Сутки	1,44	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	-0,720	0,519	11,53	хорошая	-0,283

Энерготехнологические зависимости полного и удельного электропотребления циклично-поточной технологии добычи и погрузки угля в ж/д транспорт приведены на рис.8, 9.

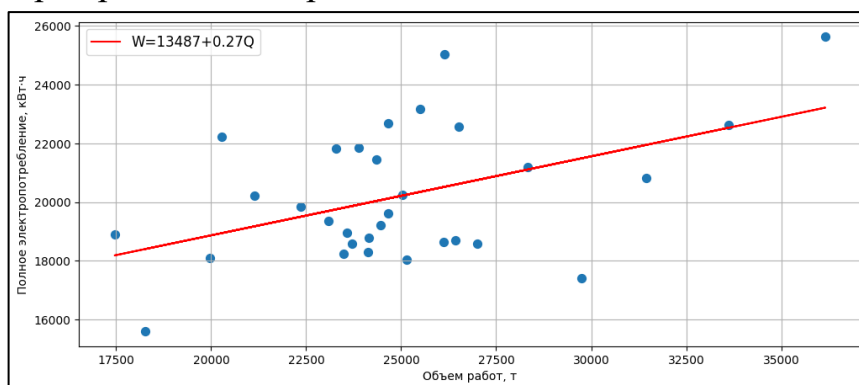


Рис. 8 – Энерготехнологическая зависимость полного электропотребления от объема выемочно-погрузочных работ добычи и погрузки угля (первая смена)

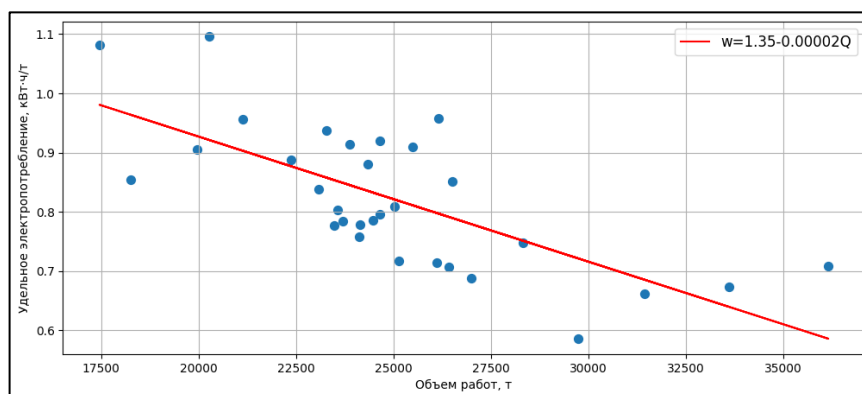


Рис. 9 – Энерготехнологическая зависимость удельного электропотребления от объема выемочно-погрузочных работ добычи и погрузки угля (первая смена)

Установленные энерготехнологические зависимости (профили) обогатительных работ и их характеристики приведены в табл. 8.

Таблица 8 – Энерготехнологические зависимости (профили) полного и удельного расхода электроэнергии от сменной производительности обогатительных работ

№ п/ п	Обога- титель- ные работы, смена/сутки	Коэффициенты зависимостей		Коэффициенты		Точность зависимостей		Коэффициент эластичности
		a_0	a_1	Корреляции , R	Детерминации, R^2	$\bar{A}$	Степень точности	
Производство угольного концентрата, $W = a_0 + a_1 \cdot Q$								
1	Смена 1	30957	0,69	0,478	0,228	36,41	удовлет.	0,135
2	Смена 2	40922	0,22	0,490	0,240	10,56	хорошая	0,033
3	Сутки	48340	2,11	0,538	0,290	9,94	высокая	0,196
Производство угольного концентрата, $w = a_0 - a_1 \cdot Q$								
4	Смена 1	10,58	$-0,80 \cdot 10^{-3}$	-0,499	0,247	36,77	удовлет.	-1,019
5	Смена 2	18,08	$-0,17 \cdot 10^{-3}$	-0,918	0,843	17,53	хорошая	-1,481
6	Сутки	10,53	$-0,40 \cdot 10^{-3}$	-0,725	0,525	10,84	хорошая	-0,400
Погрузочно-разгрузочные работы, $W = a_0 + a_1 \cdot Q$								
7	Смена 1	1253	0,10	0,476	0,227	15,60	хорошая	0,496
8	Смена 2	1015	0,17	0,629	0,396	11,64	хорошая	0,647
9	Сутки	718	0,20	0,857	0,735	8,13	высокая	0,458
Погрузочно-разгрузочные работы, $w = a_0 - a_1 \cdot Q$								
10	Смена 1	0,35	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	-0,537	0,289	16,17	хорошая	-0,647
11	Смена 2	0,36	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	-0,406	0,165	11,76	хорошая	-0,421
12	Сутки	0,26	$-0,10 \cdot 10^{-5}$	-0,415	0,172	8,11	высокая	-0,074

Энерготехнологические зависимости полного и удельного электропотребления погрузочно-разгрузочных работ приведены на рис.10, 11.

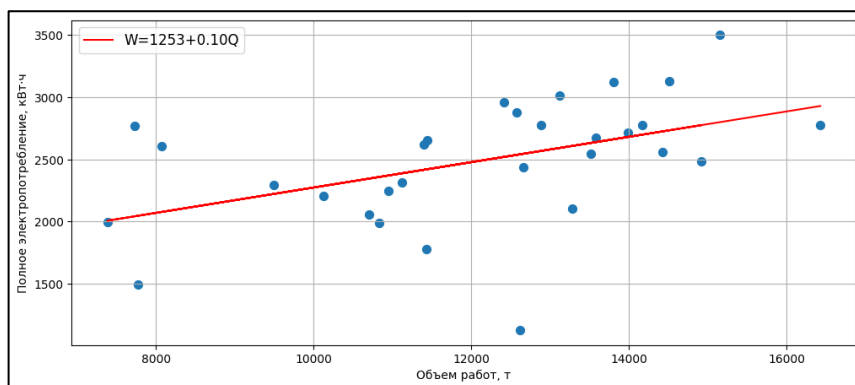


Рис. 10 – Энерготехнологическая зависимость полного электропотребления от объема погрузочно-разгрузочных работ (первая смена)

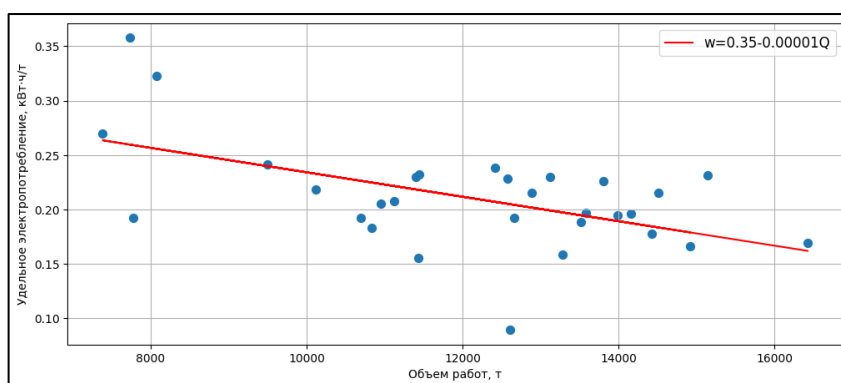


Рис. 11 – Энерготехнологическая зависимость удельного электропотребления от объема погрузочно-разгрузочных работ (первая смена)

Анализ точности установленных энерготехнологических зависимостей полного и удельного электропотребления выемочно-погрузочных и обогатительных работ по шкале Чеддока показал, что степень точности в основном находится на хорошем ($10\% < \bar{A} < 20\%$) и высоком уровне ($\bar{A} < 10\%$). Проверка коэффициентов энерготехнологических профилей a_0 и a_1 и корреляции показала статистическую значимость по t -критерию Стьюдента. Проверка коэффициентов детерминации показала статистическую значимость по F -критерию Фишера. Условия некоррелированности остатков ($\bar{\varepsilon}$) по критерию Дарбина-Уотсона ($d_{\text{расч}}$) подтвердили правомерность использования МНК ($\bar{\varepsilon} \approx 0$) при установлении энерготехнологических профилей. Значения критерия Дарбина-Уотсона по выемочно-погрузочным и обогатительным работам находится в пределах значений ($0 \leq d_{\text{расч}} \leq 4$), что показывает отсутствие в остатках автокорреляции первого порядка: остатки не зависят от значений полного и удельного электропотребления.

На основании коэффициентов эластичности определено изменение электропотребления в % при увеличении объемов выемочно-погрузочных работ на 1%, приведенное в табл.9.

Таблица 9 – Изменение электропотребления при увеличении/уменьшении объемов выемочно-погрузочных работ на 1%

№ п/п	Повышение/уменьшение электропотребления, %			Снижение/увеличение удельного электропотребления, %		
	1-я смена	2-я смена	Сутки	1-я смена	2-я смена	Сутки
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии						
1	0,332	0,651	0,205	0,644	0,289	0,260
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии						
2	0,385	0,066	0,035	0,635	0,575	0,358
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии						
3	0,436	0,060	0,035	0,553	0,485	0,283

На основании коэффициентов эластичности определено изменение электропотребления в % при увеличении объемов обогатительных работ на 1%, приведенное в табл.10.

Таблица 10 – Изменение электропотребления при увеличении объемов обогатительных работ на 1%

№ п/п	Повышение электропотребления, %			Снижение удельного электропотребления, %		
	1-я смена	2-я смена	Сутки	1-я смена	2-я смена	Сутки
Производство угольного концентрата						
1	0,135	0,033	0,193	1,019	1,481	0,400
Погрузочно-разгрузочные работы						
2	0,496	0,647	0,458	0,647	0,421	0,074

Установленные вероятностные модели и энерготехнологические зависимости повышают уровень аналитического описания выемочно-погрузочных и обогатительных работ для принятия управленческих решений по улучшению энерготехнологической результативности.

В четвертой главе выполнено исследование энерготехнологической результативности основных производственных процессов.

На основании энерготехнологического анализа выемочно-погрузочных и обогатительных работ определены потенциалы повышения сменной производительности и повышения энергоэффективности – снижения удельного электропотребления (табл.11).

Таблица 11 – Потенциалы повышения сменной производительности и снижения удельного электропотребления выемочно-погрузочных и обогатительных работ

№, п/п	Смена	Повышения сменной производительности			Снижения удельного электропотребления		
		$\bar{Q}_{см}$	$Q_{см.ср.взв.min}$	$Q_{см.пов.пр.}$	$\bar{w}_{см}$	$w_{ср.взв.max}$	$w_{снж.см.}$
Добыча и погрузка угля в ж/д транспорт по циклично-поточной технологии							
1	Смена 1	24971 т	20886 т	4085 т	0,81 кВт·ч/т	0,93 кВт·ч/т	0,12 кВт·ч/т
2	Смена 2	27904 т	24277 т	3627 т	0,78 кВт·ч/т	0,89 кВт·ч/т	0,11 кВт·ч/т
Транспортная вскрыша горной породы с погрузкой в ж/д транспорт по цикличной технологии							
3	Смена 1	22963 м³	21094 м³	1869 м³	1,15 кВт·ч/м³	1,30 кВт·ч/м³	0,15 кВт·ч/м³

Продолжение табл. 11

№, п/п	Смена	Повышения сменной производительности			Снижения удельного электропотребления		
		$\bar{Q}_{см}$	$Q_{см.ср.взв.min}$	$Q_{см.пов.пр.}$	$\bar{w}_{см}$	$w_{ср.взв.max}$	$w_{сниж.см.}$
4	Смена 2	27443 м ³	24095 м ³	3348 м ³	1,04 кВт·ч/м ³	1,26 кВт·ч/м ³	0,22 кВт·ч/м ³
Приемка вскрышных пород в отвалы по цикличной технологии							
5	Смена 1	18035 м ³	14346 м ³	3689 м ³	0,93 кВт·ч/м ³	1,08 кВт·ч/м ³	0,15 кВт·ч/м ³
6	Смена 2	22044 м ³	18559 м ³	3485 м ³	0,80 кВт·ч/м ³	1,00 кВт·ч/м ³	0,20 кВт·ч/м ³
Обогащение угля - производство угольного концентрата							
7	Смена 1	7012 т	5519 т	1493 т	5,10 кВт·ч/т	7,36 кВт·ч/т	2,26 кВт·ч/м ³
8	Смена 2	5818 т	3722 т	2096 т	6,81 кВт·ч/т	11,57 кВт·ч/т	4,76 кВт·ч/м ³
Обогащение угля - погрузочно-разгрузочные работы							
9	Смена 1	12083 т	9992 т	2091 т	0,21 кВт·ч/т	0,26 кВт·ч/т	0,05 кВт·ч/м ³
10	Смена 2	11214 т	9240 т	1974 т	0,26 кВт·ч/т	0,31 кВт·ч/т	0,05 кВт·ч/м ³

Потенциалы повышения сменной производительности и снижения удельного электропотребления добычи и погрузки угля в ж/д транспорт на примере первой смены приведены на рис. 10, 11.

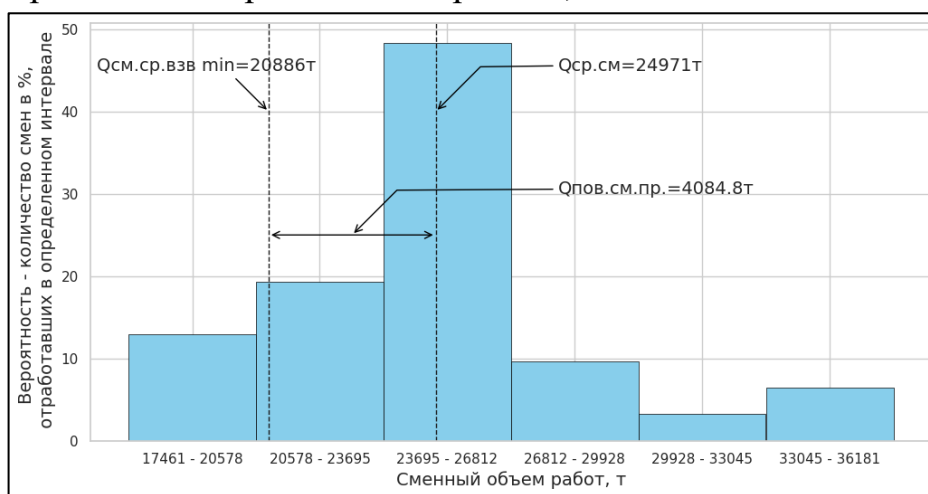


Рис. 10 – Потенциал повышения сменной производительности добычи и погрузки угля первой смены

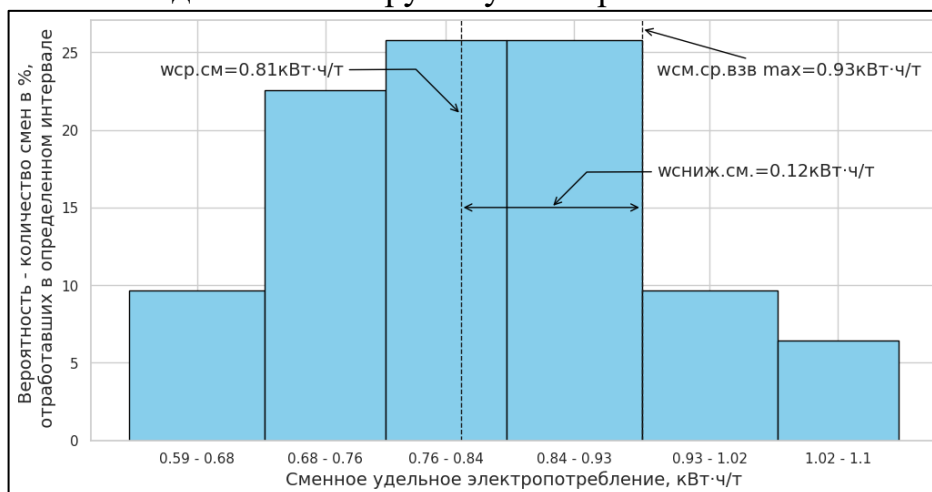


Рис.11 - Потенциал снижения удельного электропотребления добычи и погрузки угля первой смены

Потенциал повышения сменной производительности производственных процессов должен реализовываться за счет уменьшения количества смен/суток, отработавших со средневзвешенным

сменным/суточным объемом работ ниже среднесменного/среднесуточного за анализируемый месяц.

Потенциал повышения энергоэффективности – снижения удельного электропотребления должен реализовываться за счет уменьшения количества смен/суток, отработавших со средневзвешенным сменным/суточным удельным электропотреблением выше среднесменного/среднесуточного за анализируемый месяц.

Полученные потенциалы повышения сменной производительности и снижения удельного расхода электроэнергии, создают условия для поддержки работы по обеспечению и повышению энергетической эффективности, в том числе на основе улучшения оперативного управления энерготехнологической результативности основных производственных процессов предприятий угольной отрасли с открытой разработкой и обогащению угля.

В пятой главе разработаны рекомендации по повышению энергоэффективности предприятий угольной отрасли, включающие: оценку сменной энерготехнологической результативности машинистов экскаваторов; оценку энерготехнологической результативности персонала, в ведении которого выемочно-погрузочные работы (ВПР); цифровую поддержку анализа энерготехнологической результативности основных производственных процессов.

1. Оценка сменной энерготехнологической результативности i -того машиниста экскаватора по экономии/перерасходу электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ЭЭ см } i}$) в натуральном выражении определяется по выражениям для 1-й или 2-й смены

$$\mathcal{E}_{\text{ЭЭ см } i}^1 = \Delta w_{\text{см } i}^1 \cdot Q_{\text{см ф } i}^1 = (w_{\text{пл } j} - w_{\text{см ф } i}^1) \cdot Q_{\text{см ф } i}^1, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ЭЭ см } i}^2 = \Delta w_{\text{см } i}^2 \cdot Q_{\text{см ф } i}^2 = (w_{\text{пл } j} - w_{\text{см ф } i}^2) \cdot Q_{\text{см ф } i}^2, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6)$$

где: $Q_{\text{см ф } i}^1, Q_{\text{см ф } i}^2$ – фактический объем работы, выполненный i -тым машинистом экскаватора в 1-ю или 2-ю смену, (м^3);

$w_{\text{пл } j}$ – плановое удельное электропотребление j -го экскаватора, на котором отработал в 1-ю или 2-ю смену i -тый машинист, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$;

$w_{\text{см ф } i}^1, w_{\text{см ф } i}^2$ – фактическое удельное электропотребление, с которым i -тый машинист отработал в 1-ю или 2-ю смену, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$.

Оценка сменной энерготехнологической результативности i -того машиниста по экономии/перерасходу электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ЭЭ ф ЭкЭл см } i}$) в финансовом выражении определяется по выражениям для 1-й или 2-й смены

$$\mathcal{E}_{\text{ЭЭ ф см } i}^{1,2} = \mathcal{E}_{\text{ЭЭ см } i}^{1,2} \cdot \text{Ц}_{\text{ЭЭ}}, \text{ руб.} \quad (7)$$

где $\text{Ц}_{\text{ЭЭ}}$ – тариф на электроэнергию, $\text{руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$.

Оценка энерготехнологической результативности горных мастеров и начальников горных участков, в ведении которых ВПР, сводится к следующему.

Энерготехнологическая результативность ВПР, выполняемых экскаваторами в 1-ю или 2-ю смену, которой руководит сменный горный мастер, по экономии/перерасходу электроэнергии за месяц ($\mathcal{E}_{\text{ЭМ}p}^{1,2}$) в натуральном выражении определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭМ}}^{1,2} = \sum_1^{n^{1,2}} [(w_{\text{пл}j} - w_{\text{фм}j}^{1,2}) \cdot Q_{\text{фм}j}^{1,2}], \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (8)$$

где $w_{\text{пл}j}$ – плановое удельное электропотребление j -го экскаватора, кВт·ч/м³;

$w_{\text{фм}j}^{1,2}$ – фактическое удельное электропотребление j -го экскаватора в 1-ю или 2-ю смену за месяц, кВт·ч/м³;

$Q_{\text{фм}j}^{1,2}$ – фактический объем работы j -го экскаватора в 1-ю или во 2-ю смену за месяц, (м³);

$n^{1,2}$ – количество экскаваторов в 1-й или 2-й смене p -того участка,
 $j = 1, 2, \dots, n$.

Энерготехнологическая результативность ВПР, выполняемых экскаваторами в 1-ю или 2-ю смену, которой руководит сменный горный мастер, по экономии/перерасходу электроэнергии за месяц ($\mathcal{E}_{\text{ЭФМ}p}^{1,2}$) в финансовом выражении определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭФМ}}^{1,2} = \sum_1^{n^{1,2}} [(w_{\text{пл}j} - w_{\text{фм}j}^{1,2}) \cdot Q_{\text{фм}j}^{1,2}] \cdot C_{\text{ЭЭ}}, \text{ руб.} \quad (9)$$

Энерготехнологическая результативность ВПР начальника p -того горного участка за месяц по экономии/перерасходу электроэнергии в натуральном выражении определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭМ}p} = \mathcal{E}_{\text{ЭМ}}^1 + \mathcal{E}_{\text{ЭМ}}^2, \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (10)$$

Энерготехнологическая результативность ВПР начальника p -того горного участка за месяц по экономии/перерасходу электроэнергии в финансовом выражении определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭФМ}} = \mathcal{E}_{\text{ЭФМ}p}^1 + \mathcal{E}_{\text{ЭФМ}}^2, \text{ руб.} \quad (11)$$

2. Цифровая поддержка анализа энерготехнологической результативности обеспечивается разработанным программным кодом для:

- проверки исходных статистических рядов энерготехнологических показателей на наличие «выбросов» по критерию Граббса;

- формирования таблиц упорядоченных статистических рядов энерготехнологических показателей основных производственных процессов;
- формирования таблиц статистических характеристик энерготехнологических показателей;
- анализа энерготехнологической результативности объемов, полного и удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны методические принципы исследования энергоэффективности с учетом энерготехнологической результативности производственных процессов.
2. Разработана методика исследования энергоэффективности предприятий угольной отрасли, обеспечивающая выполнение исследований: энерготехнологических показателей с определением их статистических характеристик, установлением вероятностных моделей и получением энерготехнологических профилей; энерготехнологической результативности производственных процессов.
3. Определены статистические характеристики, установлены вероятностные модели энерготехнологических показателей, получены энерготехнологические профили циклично-поточной технологии добычи и погрузки угля в ж/д транспорт, циклических технологий транспортной вскрыши и приемки вскрышных пород в отвалы.
4. Определены статистические характеристики, установлены вероятностные модели энерготехнологических показателей, получены энерготехнологические профили производства угольного концентрата и погрузочно-разгрузочных работ.
5. Для выемочно-погрузочных и обогатительных работ на основании полученных коэффициентов эластичности зависимостей электропотребления от объемов работ определены значения: повышения/уменьшения электропотребления в % при повышении/уменьшении объема работ на 1%; снижения/повышения удельного электропотребления при повышении/уменьшении объема работ на 1%.
6. Обоснован и применен вероятностно-статистический подход к исследованию энерготехнологической результативности производственных процессов.
7. Разработан метод анализа энерготехнологической результативности с оценкой потенциалов повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления.

8. Определены потенциалы повышения сменной производительности и энергоэффективности – снижения удельного электропотребления выемочно-погрузочных и обогатительных работ.

9. Внедрение основных результатов работы приводят к следующим эффектам: повышению энергоэффективности предприятий по добыче и обогащению угля; разработке учебно-методических материалов для подготовки бакалавров, специалистов и магистров по направлениям «Электроэнергетика и электротехника», «Горное дело».

Основные положения диссертационного исследования изложены в следующих работах и свидетельствах:

1. А. В. Ляхомский, Е. Н. Кутепова, А. А. Шадрин. Вероятностно-статистический анализ энерготехнологической результативности производственных процессов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2025. – №. 1. – С. 45-50.

2. А. В. Ляхомский, Е. Н. Перфильева, У. А. оглы Рзаде, А. А. Шадрин. Энерготехнологический мониторинг производственных процессов для системного обеспечения и повышения энергетической эффективности // Энергобезопасность и энергосбережения. – 2023. – №. 6. – С. 14-21.

3. Ляхомский А.В., Шадрин А.А. Прогнозная модель электропотребления на основе полносвязной нейронной сети /Ляхомский А.В., Шадрин А.А./Журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы» УГНТУ. – 2022. – Т. 18. – № 1. С. 107–113.

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2023619962 РФ «Программа нейросетевого краткосрочного прогнозирования энергопотребления горных работ на предприятиях с открытой разработкой месторождений»/ А.В. Ляхомский; А.А. Шадрин заявитель и правообладатель НИТУ МИСИС. – №2023617681; заявл. 24.04.2023; опубл. 17.05.2023.

5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2023619961 РФ «Программа моделирования нейронной сети на основе генетического алгоритма выбора гиперпараметров с целью анализа энерготехнологической результативности основных производственных процессов горно-металлургических предприятий»/ А.В. Ляхомский; А.А. Шадрин заявитель и правообладатель НИТУ МИСИС. – №2023617680; заявл. 24.04.2023; опубл. 17.05.2023.

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2024614118 РФ «Программа для прогнозирования энергопотребления промышленных предприятий «DeepNetWork»/ А.В. Ляхомский; А.А. Шадрин

заявитель и правообладатель НИТУ МИСИС. – №2024612599; заявл.
09.02.2024; опубл. 20.02.2024.