

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

САДРИДИНОВ Ахлидин Бахридинович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ  
УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ ОБОСНОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – докт. тех. наук, профессор Петров В.Л.

Москва 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Эффективность работы горнодобывающих предприятий определяется техническим уровнем средств механизации и автоматизации технологических процессов добычи полезных ископаемых.

Интенсификация горного производства на перспективных шахтах за счет технического переоснащения очистных и проходческих комплексов требует значительных изменений в ведении подготовительных и добычных работ. В первую очередь это касается прогрессивного комбайнового способа, т.к. уровень комбайновой проходки по ведущим угольным шахтам колеблется от 72 до 98 %.

Горнопроходческие работы в условиях угольных шахт в настоящее время интенсивно развиваются как по увеличению объемов выполняемых работ, так и по темпам их ведения, что отражается в росте энергоемкости технологических процессов и объемов потребляемой электроэнергии.

На горных предприятиях для некоторых технологических процессов производства структура системы электроснабжения не позволяет реализовать принцип детерминации электрической нагрузки, так как ограничена возможность контроля электропотребления отдельными энергоемкими электроустановками, характерны неравномерность и неопределенность режима электропотребления, а также значительное влияние технологических факторов на эффективность ведения горных работ.

В связи с этим повышение энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе энерготехнологических параметров для управления электропотреблением является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** В основу исследования положены научные труды Б.Н. Абрамовича, В.Е. Аракелова, В.И. Вейца, М.С. Ершова, В.И. Заславца, А.Г. Захаровой, Л.Г. Зюбровского, Б.А. Константинова, А.Н. Кремера, Н.М. Кузнецова, А.В. Ляхомского, Г.В. Никифорова, В.К. Олейникова, А.Х. Сальникова, В.Н. Фащенко, Л.А. Шевченко и другие ученые, в которых разработаны методологические основы исследования и анализа режимов энергопотребления на предприятиях горнодобывающих отраслей промышленности, разработаны методы и средства эффективного управления энергоресурсами; научные труды В.В. Алексева, Г.И. Бабокина, А.В. Дементьева, Л.А. Плащанского, А.Д. Рубана, В.И. Щуцкого, в которых выполнен анализ электропотребления и оценка энергоэффективности подземных электротехнических комплексов и систем высокопроизводительных угольных шахт.

В научных работах решался широкий спектр задач, связанных с энергоэффективностью технологических процессов, технологий производства, производственных процессов промышленных предприятий и объединений минерально-сырьевого комплекса.

На угольных шахтах, наряду с энергоемкими процессами добычи и транспортировки полезного ископаемого, вентиляции горных выработок и работой систем водоотлива значительная составляющая расхода электроэнергии приходится на ведение горнопроходческих работ (ГПР), которые отличаются широким диапазоном применяемой техники и технологии прохождения горных выработок, в специфических условиях горного производства.

Одним из решений задачи повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в угольных шахтах является обеспечение устойчивой работы проходческих участков в соответствии с техническими условиями.

Управление электропотреблением ГПР может быть усовершенствовано за счет реализации мероприятий по повышению энергоэффективности, которые предложены в диссертационной работе.

**Объектом исследования** диссертационной работы является энергоэффективность горнопроходческих работ угольных шахт.

**Предметом исследования** является процесс электропотребления при ведении горнопроходческих работ угольных шахт.

**Идея работы** заключается в том, что повышение энергоэффективности достигается путем совершенствования управления электропотреблением с применением энерготехнологических показателей ГПР.

**Целью диссертационной работы** является повышение энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе энерготехнологических параметров для управления электропотреблением.

#### **Задачи научных исследований.**

Задачи научных исследований определены в соответствии с п. 2 и п. 3 паспорта специальности 05.09.03 и включают в себя следующие позиции.

1. Обоснование методических принципов и разработка методики анализа энергоэффективности горнопроходческих работ.
2. Исследование электропотребления горнопроходческих работ и обоснование энерготехнологических параметров.
3. Исследование прогнозных моделей электропотребления для повышения энергоэффективности горнопроходческих работ.
4. Обоснование и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ в угольных шахтах.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования энергопотребления при ведении горнопроходческих работ выполнены с использованием методов теории электроснабжения горных предприятий, теоретических методов анализа энергоэффективности, теории планирования эксперимента, теории вероятностей и математической статистики. При установлении вероятностных и энерготехнологических моделей процесса электропотребления использовались лицензионные программные пакеты *Statistica Neural Networks*, *Microsoft Office Excel*.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов рекомендаций** обеспечивается научно-обоснованной постановкой задач исследования, корректным использованием апробированных методов теории вероятности и математической статистики; удовлетворительной сходимостью (расхождение не превышает 10 %) результатов теоретических и экспериментальных исследований электропотребления; внедрением научных и практических результатов диссертационной работы в производственную практику.

**Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Методические принципы энерготехнологического анализа для управления энергоэффективностью ГПП.
2. Математические энерготехнологические модели, позволяющие проводить анализ электропотребления для повышения энергоэффективности ГПП.
3. Прогнозные модели на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих обеспечивающие управление энергоэффективностью ГПП.

Вышеизложенные научные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, получены впервые.

**Научная новизна результатов исследования** состоит в решении актуальной научной задачи повышения энергоэффективности ведения ГПП в условиях угольных шахт.

Составляющими научной новизны являются:

- 1) обоснование методических принципов энерготехнологического анализа электропотребления для управления энергоэффективностью ГПП;
- 2) разработка математических энерготехнологических моделей на основе результатов анализа электропотребления и производительности горнопроходческих работ;
- 3) разработка прогнозных моделей на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Установлены зависимости между общим и удельным расходами электроэнергии от производительности проходческих участков, позволяющие выполнить качественную и количественную оценку эффективности ведения горнопроходческих работ.

2. Установлены зависимости, позволяющих оценить уровни электропотребления при ведении горнопроходческих работ.

3. Обоснованы показатели оценки эффективности ведения горнопроходческих работ.

4. Разработан и апробирован программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении ГПР на угольных шахтах (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662067).

5. Разработаны рекомендации, для повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в соответствии с требованием технических условий.

6. Разработана и апробирована комплексная программа эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661811).

**Реализация работы.** Рекомендации по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ приняты к внедрению на шахте «Ангишт» и использованию в учебном процессе в НИТУ МИСиС.

**Апробация работы.** Основные положения и разделы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (Томск, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Совершенствование технологии строительства шахт и сооружений» (Донецк, Украина, 2012 г.), на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2013, 2014, 2018 и 2021 гг.), Всероссийской молодёжной научной школе-конференции «Состояние и пути развития российской энергетики» (Томск, 2014 г.), XX научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск 2014 г.), на Международном студенческом научном форуме Российской академии естествознания (Москва 2015 и 2018 гг.), 5-ом Международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2020 г.), Международной конференции по технике, технологиям и образованию (г. Стара Загора, Болгария, 2020).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в числе которых 5 научных статей и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, входящие в Перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых *Scopus*.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 124 страницах машинописного текста. Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований и включает 30 иллюстраций, 18 таблиц и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассмотрены цель и основные задачи оценки энергоэффективности технологических процессов ведения ГПР в угольных шахтах, дана характеристика современного уровня техники и технологии.

Анализ научных трудов ведущих ученых в области энергоэффективности показал, что они посвящены рассмотрению методических основ научных исследований, установлению зависимостей энергопотребления от производственных факторов, разработке методов планирования, нормирования, учета и контроля.

Достаточно полно представлены научные труды, связанные с анализом, прогнозным моделированием и оценкой энергоэффективности технологических процессов на россыпных месторождениях, процессами управления электропотреблением на железорудных предприятиях, системным управлением энергоресурсами алмазодобывающих предприятий, исследованием электропотребления и повышением энергоэффективности предприятий с открытой разработкой угля.

В тоже время вопросы повышения энергоэффективности электротехнических комплексов и систем угольных шахт изучены не достаточно полно.

В частности, не рассмотрены вопросы оценки эффективности электропотребления при ведении ГПР в условиях угольных шахт; отсутствует научное обоснование показателей для оценки энергоэффективности и определения устойчивых уровней электропотребления проходческих участков.

В связи с этим исследование электропотребления и повышение энергоэффективности ГПР в условиях угольных шахт является актуальной научной задачей.

На основании анализа исследований в области энергоэффективности электротехнических комплексов и систем, выполнен обзор перспективных направлений, в которых имеется успешный опыт ведения научных работ и значимые практические результаты.

Дана характеристика современного уровня техники и технологии ведения ГПР в условиях угольных шахт.

Анализ технических характеристик серийно выпускаемых проходческих машин показал, что основные направления, связанные с повышением энергоэффективности ГПР, ориентированы на рост энерговооруженности и производительности.

В основу научного исследования положены данные процесса электропотребления и объема производства ГПР проходческих участков шахты «Северная» ОАО «УРГАЛУГОЛЬ» СУЭК. Участки оборудованы проходческими комбайнами КП-21, МВ-670 («Сандвик»), 12СМ-30 («Джой») и R-75 («Дейльман Ханиэль»). Работы ведутся по породе, по углю и по углю с

присечкой. Сечение горных выработок 17,5; 18,2 и 18,9 м<sup>2</sup>. Транспортная схема включает в себя скребковые конвейеры 2СР75 и ленточные конвейеры 3Л-1200.

Поставлены научные задачи обоснования методических принципов и разработки методики анализа энергоэффективности, исследования электропотребления и обоснования энерготехнологических параметров, исследования энерготехнологических и прогнозных моделей электропотребления, разработки рекомендаций по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ в угольных шахтах.

**Во второй главе** диссертационной работы дано обоснование методических принципов и разработана методика анализа энергоэффективности ГПР.

Для каждого из проходческих участков шахты «Северная» в соответствии с требованиями технических условий к системе проходки и схемой электроснабжения определены среднесменные показатели производительности, а также потребления электрической энергии и ее удельного расхода. Анализ динамики электропотребления сменными бригадами показал отсутствие устойчивости режима работы участков, так как контролируемые параметры имеют значительный разброс относительно их средних значений.

Анализ экспериментальных данных показал, что в заданных диапазонах изменения потребляемой электроэнергии и производительности сменных бригад участков их взаимосвязь является не явно выраженной.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе обоснованы методические принципы анализа энергоэффективности ГПР, которые включают в себя:

- 1) реализацию комплексного подхода к исследованию процессов электропотребления при оценке энергоэффективности ГПР;
- 2) установление зависимостей энергопотребления на основании методов теории вероятности и математической статистики;
- 3) установление взаимосвязи между показателями электропотребления и факторами, определяющими энергоэффективность ведения ГПР;
- 4) анализ динамики энергопотребления для получения качественного прогноза по удельному расходу электроэнергии.

В основу методики анализа энерготехнологических характеристик положен корреляционно-регрессионный метод для установления взаимосвязи между показателями электропотребления и производительностью проходческих участков, отличительной особенностью которого является следующее.

С учетом вероятностного характера распределения электропотребления в качестве энерготехнологической характеристики предлагается использовать корреляционный эллипс:

$$\frac{1}{1-R_{WQ}^2} \left[ \left( \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W} \right)^2 + \left( \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} \right)^2 - 2 \cdot R_{WQ} \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W} \cdot \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} \right] = \chi_p^{*2}, \quad (1)$$

где  $R_{WQ}$  – коэффициент парной корреляции;  $\chi_p^{*2}$  – квантиль распределения Пирсона;  $\sigma_W, \sigma_Q$  – соответственно стандартные отклонения электропотребления  $W_i$  и производительности  $Q_i$  от их средних значений  $\bar{W}$  и  $\bar{Q}$ .

Координаты эллипса определяются с учетом дисперсии исследуемых признаков относительно основного линейного тренда  $W = b_0 + b \cdot Q$  и угла его наклона к оси абсцисс  $\alpha = \arctg(b)$ .

В этом случае область определения значений показателей устойчивого электропотребления будет определяться диапазонами максимального отклонения параметров электропотребления и производительности относительно их средних значений:

$$W \in \left[ \bar{W} \pm \frac{\sigma_W}{\sigma_Q} \cdot \operatorname{tg} \alpha \sqrt{D_{Q\alpha} - (Q - \bar{Q})^2} \right], \quad (2)$$

где  $D_{Q\alpha}$  – приведенная дисперсия аргумента  $D_{Q\alpha} = (\sigma_Q \cos \alpha)^2$ .

В основу методики анализа динамики энергопотребления положена модель временного ряда удельного расхода электроэнергии:

$$\omega(t) = T(t) + A(t), \quad (3)$$

где  $T(t) = a + b \cdot t$  – основной тренд энергопотребления;

$A(t) = \left[ \frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (A(t) - \bar{A}(t))^2 \right]^{0,5}$  – аддитивная помеха, представляющая собой вероятное отклонение от среднего уровня помех.

Здесь  $n$  – длина ряда;  $A(t)$  – текущая помеха;  $\bar{A}(t)$  – средний уровень помех.

В качестве прогнозной модели электропотребления предлагается использование экспоненциального сглаживания динамического ряда, которое позволят учесть прогнозные значения на заданном лаге в соответствии с вероятностными показателями  $\alpha \in [0,1]$ :

$$S_t = \alpha \cdot \omega_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}, \quad (4)$$

где  $S_t$  – прогнозное сглаженное значение,  $\alpha$  – весовой коэффициент;  $\omega_t$  – текущее значение;  $S_{t-1}$  – предыдущее значение сглаженного ряда.

Достоверность прогнозной модели электропотребления оценивается:

а) относительной ошибкой

$$\Delta \varepsilon_t = 100 \cdot (\omega_t - S_t) / \omega_t, \quad (5)$$

где  $\omega_t$  – наблюдаемое значение в момент времени  $t$ ;  $S_t$  – прогноз (сглаженное значение);

б) стандартной ошибкой коэффициента автокорреляции для  $i = [1, k - 1]$ :

$$\sigma(r_k) = \sqrt{\frac{1 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} r_i^2}{N}}, \quad (6)$$



в) статистикой (критерием) Бокса-Льюинга для  $i = [1, k]$ :

$$Q_k = N(N + 2) \sum \frac{r_i^2}{N-i}, \quad (7)$$

позволяющей оценить вероятностное распределение параметров авторегрессии и скользящего среднего лага.

**В третьей главе выполнен** анализ и дана оценка электропотребления при ведении ГПР, выполнен структурный анализ и получены модели потребления электроэнергии на базе энергетических характеристик, выполнен анализ динамики электропотребления на проходческих участках и построены прогнозные модели.

В результате анализа показателей расхода электроэнергии и производительности при ведении ГПР (таблица 1) было установлено следующее.

1. Разность по суммарному годовому расходу электроэнергии между сменами  $\Delta W$  для каждого из участков колеблется от 133 до 5127 кВт·ч ( $\Delta W \% = 0,91 - 4,1$ ). При этом для участков с большей энерговооруженностью этот показатель выше как в абсолютном, так и в относительном соотношении (между сменными бригадами внутри участков).

2. Разность по годовым показателям проходки горной выработки между сменами  $\Delta Q_{\text{пм}}$  для каждого из участков колеблется от 13,9 до 84,2 погонных метра ( $\Delta Q_{\text{пм}} \% = 1,35 - 7,07$ ). При этом абсолютные и относительные показатели проходки для участков и между сменными бригадами внутри участков практически не зависят от их энерговооруженности.

На первом этапе были определены среднесменные показатели производительности участков по пройденным погонным метрам горной выработки  $Q$  (пм), а также по сменному потреблению электрической энергии  $W$  (кВт·ч) и ее удельному расходу  $\omega$  (кВт·ч/пм).

Диапазон изменения показателей по удельному расходу электроэнергии относительно проходки  $\omega$  составил от 51,9 до 65,8 кВт·ч/пм ( $\Delta \varepsilon = 21 \%$ ). Такой разброс значений можно объяснить тем, что удельный расход электроэнергии на проходку одного погонного метра выработки в значительной степени зависит от горно-геологических, технологических и организационных факторов.

Целью второго этапа являлось установление законов распределения вероятностей, которым подчиняются среднесменные энерготехнологические показатели, определение их уровней и диапазона рекомендуемых отклонений. Это позволяет обосновать нормативные (плановые) показатели удельного расхода электроэнергии для проходческих участков.

Для 4-х характерных проходческих участков шахты «Северная» в результате аналитических исследований получены статистические показатели для полного и удельного расходов электроэнергии, а также производительности (для участка № 6 – см. пример рис.1).

Таблица 1. – Показатели расхода электроэнергии и производительности смен за весь период ведения проходческих работ в течение года

Смена	Показатель	Участок					
		1	5	6	8	9	10
1	$W$ , кВт·ч	32283,6	53407,9	14541,9	61378,1	119725,9	32197,8
	$Q$ , пм	581,94	1026,1	606,61	1063,4	2510,03	582,3
2	$W$ , кВт·ч	32417,8	53312,7	14668	60901,4	124852	31928,1
	$Q$ , пм	615,63	1023,3	589	989,8	2451,95	593,4
3	$W$ , кВт·ч	32475,2	53708,1	14534,9	60904,5	122416,9	30913,6
	$Q$ , пм	583,67	1003,1	600,8	1056,2	2499,43	613,44
4	$W$ , кВт·ч	32103,6	54491,7	14484,8	61824	123200,1	31877,8
	$Q$ , пм	572,13	1012,2	586,82	1059,41	2536,13	606,26
Итого	$W$ , кВт·ч	129280,2	214920,4	58229,5	245007,9	490194,8	126917,2
	$Q$ , пм	2353,4	4064,8	2383,2	4168,8	9997,5	2395,4

Анализ показал, что для представленных показателей характерен достаточно большой размах вариации относительно средней величины. Характеризующий его коэффициент осцилляции изменяется в диапазоне  $k_R = 30 - 170$  %. Наибольший размах вариации приходится на показатели  $\omega$  (кВт·ч/пм) и производительности  $Q$  (пм). Средние и медианные значения показателей для полного расхода электроэнергии практически совпадают: относительная погрешность  $-\Delta\varepsilon = +2,6$  %. Однако для удельного расхода электроэнергии относительная погрешность  $\Delta\varepsilon = -9$  %.

Установление законов распределения для среднесменных показателей выполнялось для шести проходческих участков. Результаты расчетов для проходческих участков № 1 и № 6 приведены в таблице 2. Гистограммы и функции плотности распределения на примере проходческого участка № 1 представлены на рисунках 2 и 3.

Анализ энерготехнологических характеристик для различных смен показал, что основные параметры в значительной степени зависят от уровня квалификации, степени организации и соответствия плановым показателям проходки. Контроль показателей электропотребления и производительности позволяет осуществлять внесение оперативной корректировки в ведение ГПР.

На рисунках 4 и 5 приведены энерготехнологические характеристики в зависимости от установленных уровней энергопотребления.

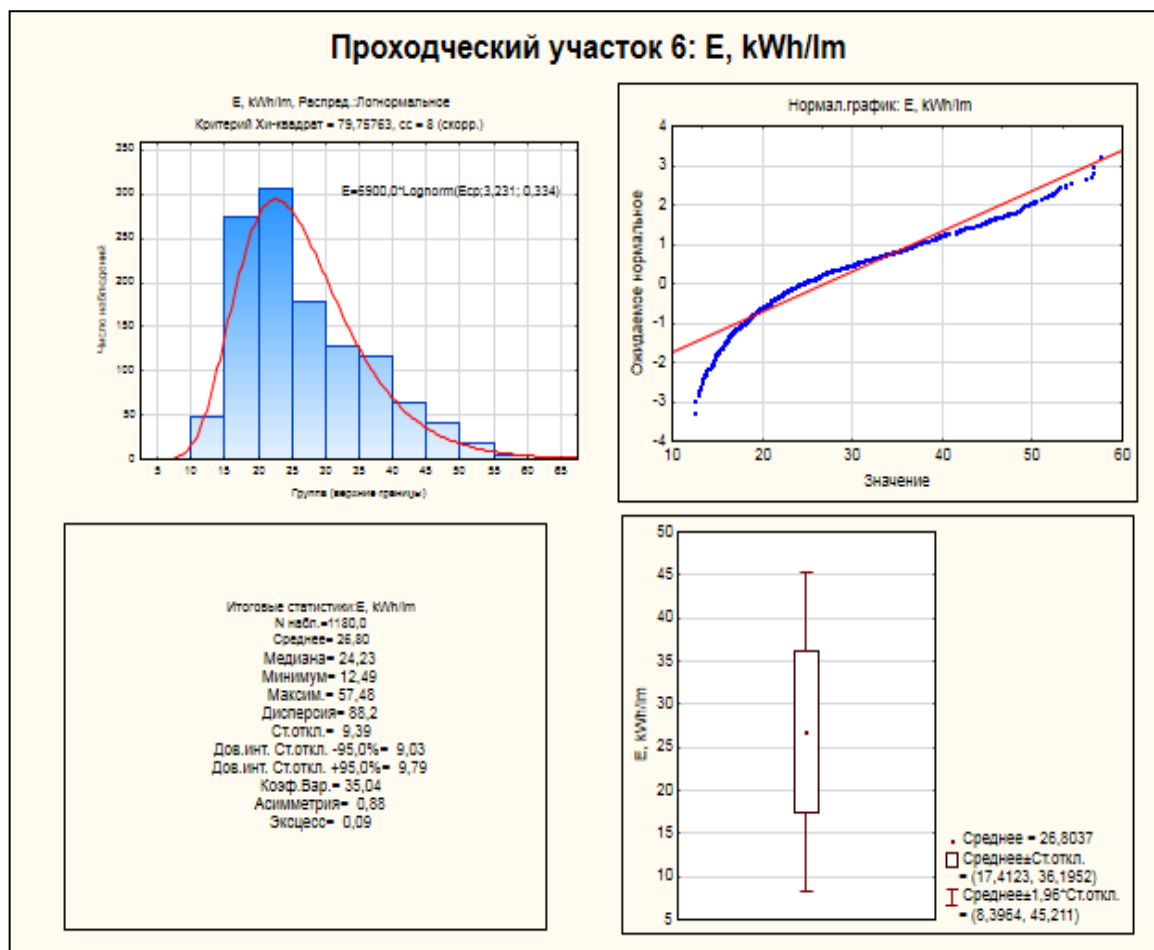


Рисунок 1. – Статистические показатели удельного расхода электроэнергии на участке № 6

Анализ позволяет определить уровни электропотребления, зона которых определяется корреляционным эллипсом.

В соответствии с разработанной методикой получены математические модели электропотребления проходческих участков, приведенные в таблице 3.

Анализ динамики электропотребления показал, что существуют устойчивые уровни полного и удельного расхода электроэнергии. Их изменения в диапазоне, превышающем значения стандартного отклонения, приводят к перерасходу электроэнергии или к повышению вероятности остановки ГПР для внепланового технического обслуживания или ремонта энерготехнологического оборудования.

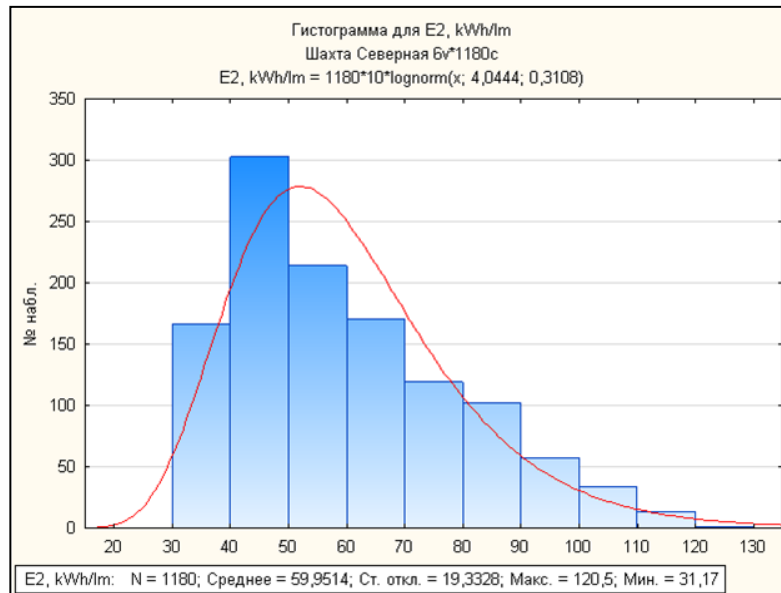


Рисунок 2. - Гистограмма функции плотности вероятностей  
распределения  $f^*(\omega)$

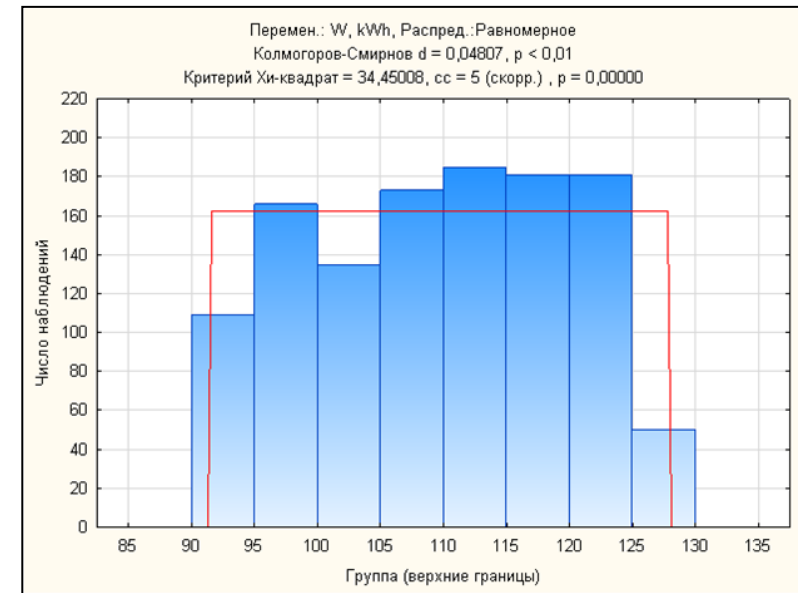


Рисунок 3. - Гистограмма функции плотности вероятностей  
распределения  $f^*(W)$

Таблица 2. – Законы распределения функции плотности вероятности общего и удельного расхода электроэнергии

Участок	Показатель	Размерность	$M$	$Me$	Закон распределения	Плотность распределения
№ 1	$W$	кВт·ч	109,6	110,3	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0275]$
	$\omega$	кВт·ч/пм	59,95	55,6	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 4,044; 0,3108]$
№ 6	$W$	кВт·ч	49,35	49,35	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0402]$
	$\omega$	кВт·ч/пм	26,8	24,23	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 3,231; 0,344]$

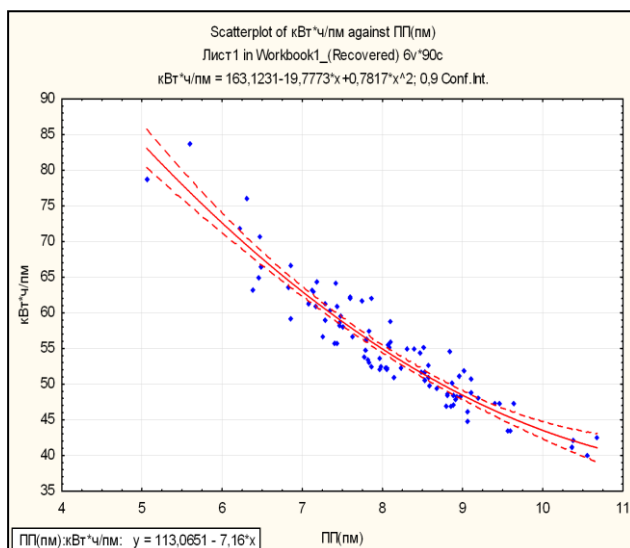


Рисунок 4. - Энерготехнологическая характеристика  $\omega = f(Q)$

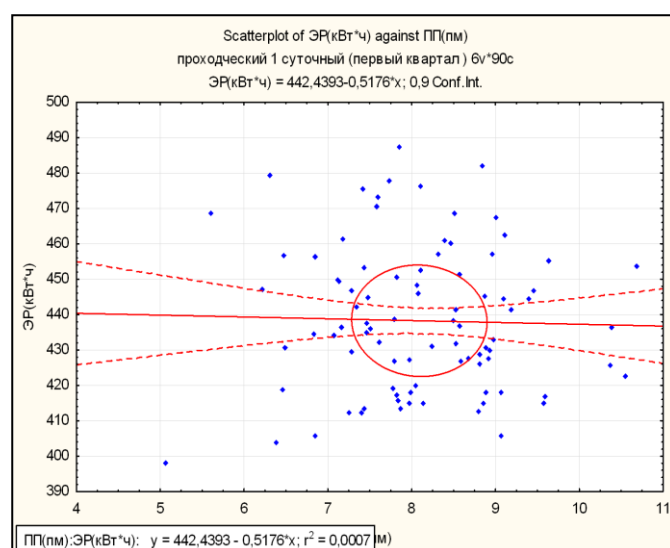


Рисунок 5. - Энерготехнологическая характеристика  $W = f(Q)$

Таблица 3. – Модели электропотребления проходческих участков

Участок	Математическая модель	$R^2$
№ 1	$W(Q) = 438,3 \pm 19,5 \cdot \sqrt{1,107 - (Q_i - 8,09)^2}$	—
	$\omega(Q) = 163,12 - 19,78 \cdot Q + 0,78 \cdot Q^2$	0,87
№ 6	$W(Q) = 277,1 \pm 48,4 \cdot \sqrt{0,46 - (Q_i - 4,76)^2}$	—
	$\omega(Q) = 123,2 - 9,83 \cdot Q + 0,24 \cdot Q^2$	0,81
№ 8	$W(Q) = 831,1 \pm 59,2 \cdot \sqrt{2,485 - (Q_i - 14,28)^2}$	—
	$\omega(Q) = 233,17 - 19,66 \cdot Q + 0,51 \cdot Q^2$	0,83
№ 9	$W(Q) = 1683,3 \pm 38,22 \cdot \sqrt{15,8 - (Q_i - 30,51)^2}$	—
	$\omega(Q) = 183,18 - 6,46 \cdot Q + 0,074 \cdot Q^2$	0,77

На рисунке 6 в качестве примера приведен график изменения суточного удельного расхода электроэнергии по проходческому участку № 8. Общий тренд за квартал описывается линейной зависимостью  $\omega = 61,7 - 0,046 \cdot t$ . Анализ показывает, что диапазон изменения  $\omega(t)$  свидетельствует о значительных отклонениях от общего тренда и превышает рекомендуемые пределы, соответствующие эффективной работе энерготехнологического оборудования участка.

На рисунке 7 представлена прогнозная модель удельного расхода электроэнергии  $\omega = 61,7 - 0,046 \cdot t \pm 8,6$ , состоящая из временного тренда с учетом аддитивной помехи. Прогнозная модель, исходя из квартального графика, рассчитана на 10 дней с лагом 12 по фиксированным показателям.

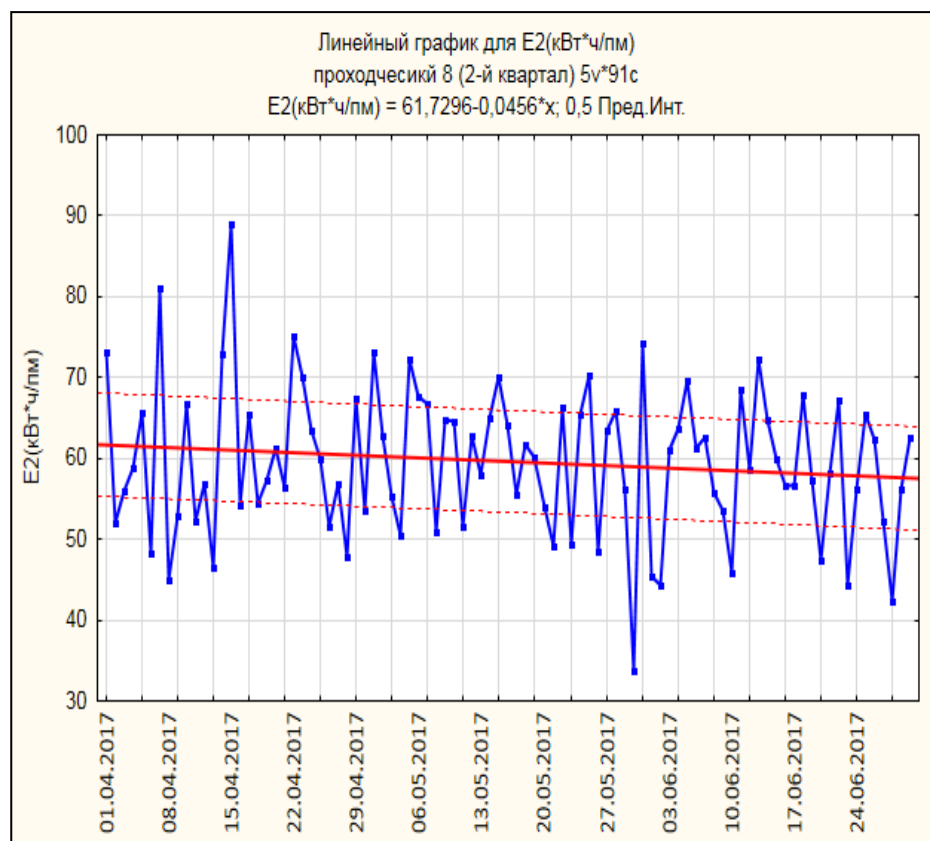


Рисунок 6. – Динамика удельного расхода электроэнергии (основной тренд и диапазон устойчивого электропотребления)

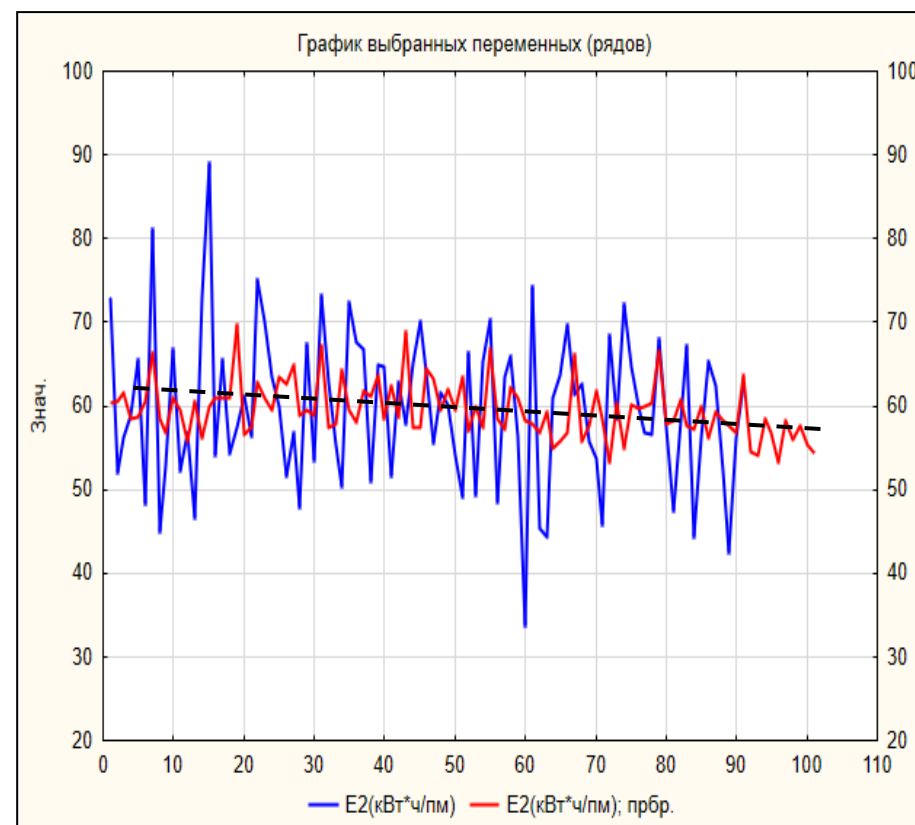


Рисунок 7. – Прогнозная модель удельного расхода электроэнергии с учетом экспоненциального сглаживания, основного тренда и аддитивной составляющей

Анализ результатов исследования эффективности электропотребления при ведении ГПР в условиях угольных шахт показал, что общий ( $W$ ) и удельный расход электроэнергии ( $\omega$ ), а также производительность проходческих бригад ( $Q$ ) имеют достаточно широкий диапазон вариации.

Электропотребление проходческих участков подчиняется равномерному закону распределения. Удельный расход электроэнергии в зависимости от проходки горной выработки подчиняется логнормальному закону распределения. Рекомендуется использовать соответствующие средние и медианные значения в качестве ориентиров при обосновании плановых показателей работы участков и смен.

Причинами ухода абсолютных показателей электропотребления за зону допустимых значений являются: превышение скорости проходки выработки отдельными бригадами в течение смены, нарушение габарита сечения горной выработки, резкое изменение геологических характеристик грунтов, потери времени на ликвидацию аварий на энерготехнологическом оборудовании, организационные причины, связанные с нарушением технологического процесса производства проходческих работ.

В результате регрессионного анализа получены математические модели в виде энергетических характеристик для оценки удельного расхода электроэнергии при ведении горнопроходческих работ. Разработанные модели полного расхода электроэнергии в виде энерготехнологических характеристик и корреляционных эллипсов позволяет определить области значений, а также диапазоны эффективного уровня электропотребления проходческими участками.

Разработанные временные модели электропотребления, учитывающие общие тренды и аддитивные составляющие положены в основу прогнозирования уровня электропотребления, обоснования нормативных показателей, а также управления энергоэффективностью горнопроходческих работ.

**В четвертой главе** выполнено обоснование и разработаны рекомендации по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ в угольных шахтах.

В диссертационной работе разработан «Программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении горнопроходческих работ на угольных шахтах» (Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020661811).

Программный комплекс предназначен для анализа электропотребления и может применяться для оценки энергоэффективности ведения горнопроходческих работ.

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

- статистический анализ данных по энергопотреблению горнопроходческими участками;
- расчет двумерных (2М-) моделей энергопотребления горнопроходческих участков;

- расчет трехмерных (3М-) моделей энергопотребления горнопроходческих участков;
- численный спектральный анализ динамики энергопотребления.

Разработана «Комплексная программа эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт» (Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020662067).

Программа предназначена для расчета и анализа комплекса показателей энергоэффективности и может применяться для оперативного управления энергоэффективностью ведения горнопроходческих работ.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- анализ энергетических показателей технологического процесса проходки горных выработок;
- моделирование и анализ электротехнических характеристик ГПП;
- прогнозное моделирование электропотребления методом экспоненциального сглаживания с учетом основного тренда и аддитивных помех;
- идентификация показателей электропотребления сменных бригад участков;
- формирование промежуточных и итогового отчета по эффективности энергопотребления проходческих участков.

Разработано методическое обеспечение и алгоритм эффективного управления электропотреблением ГПП угольных шахт.

Формируемая база данных включает в себя дату, номер смены, показатели сменной производительности проходческого участка, сменное потребление электроэнергии, а также индивидуальные коды бригад (*IDB*) и коды останова или простоя (*IDS*).

Коды *IDB* позволяют определить дату, номер смены, время работы и производительность конкретной бригады, а также сменный состав рабочих на участке.

Коды *IDS* позволяют определить характер причины и продолжительность остановки горнопроходческого технологического комплекса угольной шахты.

Сформированная в *Microsoft Excel* база данных на последующих этапах реализации алгоритма управления позволяет получить полную информацию для определения показателей эффективности ведения горнопроходческих работ и своевременного принятия решений.

Интерактивная система мониторинга эффективности электропотребления и производительности проходческих участков приведена на рисунке 8.

Реализация алгоритма управления осуществляется на основании разработанной методики оценки энергоэффективности горнопроходческих работ в угольных шахтах:



- определяются показатели общего электропотребления и удельного расхода электроэнергии для участков за каждую смену, сутки, месяц, квартал и за полный период проходки;
- соответствие фактических и плановых показателей работы сменных бригад участков оценивается по коэффициенту энергетической эффективности, показателю оценки уровня энергопотребления и показателю эффективности прохождения горных выработок, а также идентифицируются причины отклонений и время простоя;
- в соответствии планом и техническими условиями ведения горнопроходческих работ осуществляется корректировка режима работы проходческих участков и сменных бригад.

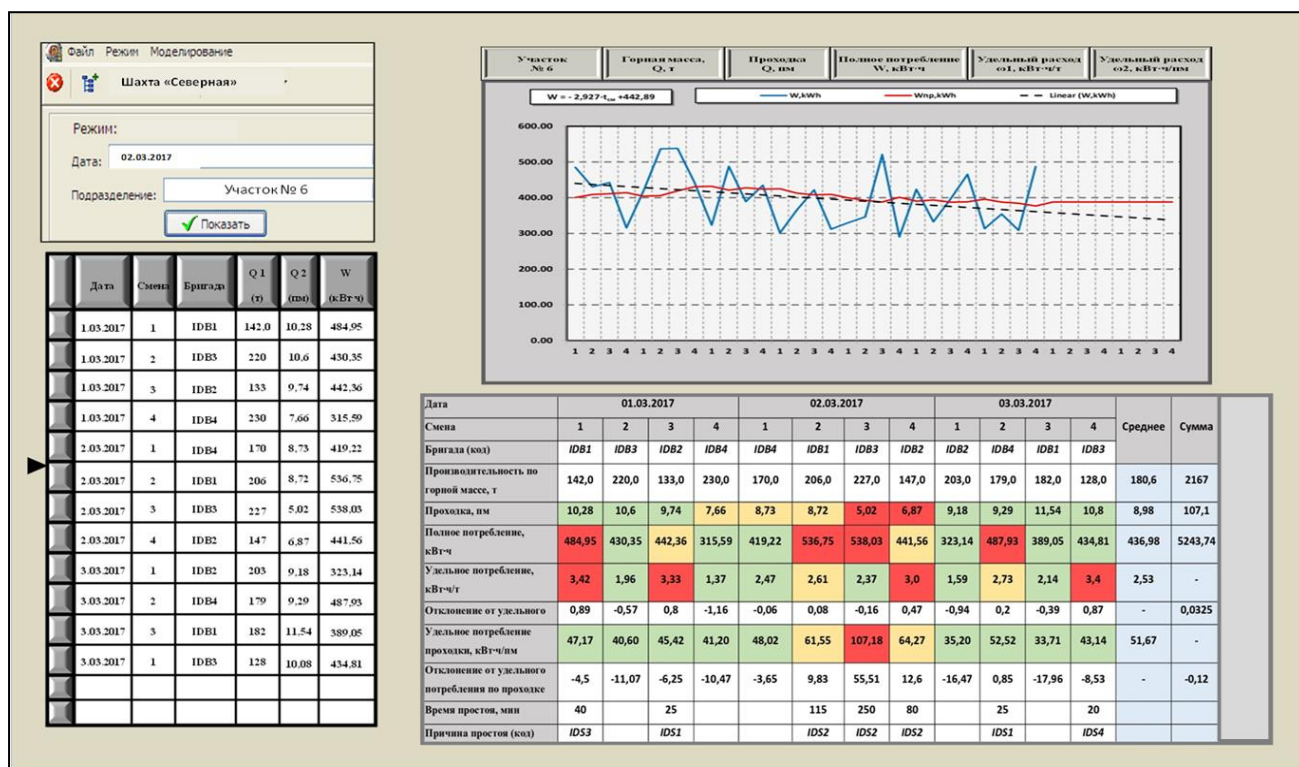


Рисунок 8. – Интерактивная система мониторинга эффективности электропотребления и производительности проходческих участков

Разработаны рекомендации по повышению энергоэффективности с учетом технических условий ведения горнопроходческих работ угольных шахт, заключающиеся в следующем.

1. Для повышения энергоэффективности ведения ГПР целесообразно использовать разработанный программный комплекс, позволяющий выполнить анализ сменного и суточного электропотребления и производительности проходческих участков.

2. Для обеспечения энергоэффективности ГПР предлагается использовать разработанные модели электропотребления, позволяющие определить энерготехнологические показатели, соответствующие плановым показателям производительности проходческих участков.

3. Для снижения удельного расхода электроэнергии за счет повышения производительности участков необходимо обеспечение заданного темпа проходки и сокращение потерь времени при устранении отказов, а также сокращении простоев по эксплуатационным, организационным и техническим причинам.

4. Для повышения уровня энергетического планирования ГПР целесообразно применять энерготехнологические параметры, полученные на основе прогнозных моделей электропотребления.

5. Мониторинг энергоэффективности ГПР целесообразно проводить соответствующими алгоритмами комплексной программы эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи, заключающейся в повышении энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе энерготехнологических параметров для управления электропотреблением.

**На основании проведенных исследований лично автором получены следующие результаты.**

1. Обоснованы методические принципы энерготехнологического анализа электропотребления для управления энергоэффективностью проведения горнопроходческих работ (ГПР) в угольных шахтах.

В основу методики положен алгоритм обработки экспериментальных данных, а также модели электропотребления, позволяющие определить значения общего и удельного расхода электроэнергии. Для определения уровней электропотребления предложено использовать корреляционные эллипсы, определяющие зону эффективной работы проходческих участков.

2. Установлены статистические параметры и законы распределения вероятностей электропотребления проходческих участков в условиях угольных шахт.

В результате проведения исследований установлено, что общий расход электроэнергии подчиняется равномерному закону распределения вероятностей, а удельный расход электроэнергии по пройденным погонным метрам выработки – логнормальному закону распределения вероятностей.

3. Разработаны математические энерготехнологические модели, позволяющие проводить анализ электропотребления для повышения энергоэффективности ГПР.

В основу моделей положены энерготехнологические характеристики, позволяющие определить их рациональные значения в соответствии с показателями сменной производительности проходческих участков.

4. Разработаны прогнозные модели на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих, обеспечивающие управление энергоэффективностью ГПР.

5. Разработаны рекомендации, направленные на повышение энергоэффективности с учетом технических условий проведения ГПР угольных шахт.

6. Разработаны и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» учебно-методическое пособие, интерактивный электронный образовательный ресурс, а также модуль Программы дополнительного профессионального образования для повышения квалификации специалистов отраслевых предприятий.

**Основное положение работы отражено в следующих публикациях.**

**Научные работы, объекты авторского права, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК**

**1. Садридинов, А.Б.** Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2020661811 РФ. «Программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении горнопроходческих работ на угольных шахтах» / В.Л. Петров, А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2020661064. Заявл. 25.09.2020. Оpubл. 01.10.2020.

**2. Садридинов, А.Б.** Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2020662067 РФ. «Комплексная программа эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт» / В.Л. Петров, А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2020661054. Заявл. 25.09.2020. Оpubл. 07.10.2020.

**3. Садридинов, А.Б.** Комплексный анализ показателей энергоэффективности промышленных предприятий / А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев, С.М. Карпенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. – № 2. – С. 15 – 17.

**4. Садридинов, А.Б.** Сравнительный анализ энергетических характеристик проходческих комбайнов, представленных на мировом рынке / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 297 – 300.

**5. Садридинов, А.Б.** Энергетическая оценка горнопроходческих работ с учетом их влияния на техногенную среду в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 2. – С. 303 – 306.

**6. Садридинов, А.Б.** Оценка энергоэффективности горнопроходческих работ по энергетическим эквивалентам затрат энергии / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 12. – С. 320 – 323.

**7. Садридинов, А.Б.** Энергетические характеристики проходческих комбайнов с исполнительными органами избирательного действия / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 9. – С. 348 – 350.

**Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых международными базами цитирования SCOPUS:**

**8. Садридинов, А.Б.** *Mathematical Simulation of Electrotechnology Characteristics of Mining Complexes* (Математическое моделирование энерготехнологических характеристик горнопроходческих комплексов) / Petrov, V.L., Sadridinov, A.B., Pichuev, A.V. (2021) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1031 (1), DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012045.

**9. Садридинов, А.Б.** *Analysis and Modeling of Power Consumption Modes of Tunnelling Complexes in Coal Mines* (Анализ и моделирование режимов энергопотребления проходческих комплексов в угольных шахтах) / Petrov, V., Sadridinov, A., Pichuev, A. (2020) *E3S Web of Conferences*, 174, DOI: 10.1051/e3sconf/202017401006.

**Научные труды, индексируемые РИНЦ:**

**10. Садридинов, А.Б.** Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты // Горные науки и технологии. 2020;5(4):367-375. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-367-375>.

**11. Садридинов, А.Б.** Повышение энергоэффективности горнопроходческих работ / А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев, В.И. Петуров // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: ИГУПС. – 2016. Т 1. – С. 641 – 645.

**12. Садридинов, А.Б.** Моделирование графиков электрических нагрузок при ведении проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.Б. Садридинов // Всероссийская молодёжная научная школа-конференция «Состояние и пути развития российской энергетики». – Томск. – НИТПУ, Изд-во ООО «СКАН». – Т2. – 2014. – С. 351 - 354.

**13. Садридинов, А.Б.** Оценка энергозатрат на создание, техническое обслуживание и ремонт проходческих комбайнов / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // В сб. докл. XX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск. – НИТПУ, Изд-во ООО «СКАН». – Т2. – 2014. – С. 355 – 357.

**14. Садридинов, А.Б.** Оценка энергоэффективности технологических процессов при строительстве подземных коллекторов / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск. – 2012. – С. 145 – 147.

**15. Садридинов, А.Б.** Энергоэффективность проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск. – 2012. – С. 142 – 143.

**16. Садридинов, А.Б.** Методы оценки энергоэффективности проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Сб. научн. трудов Международной научно-технической конференции «Совершенствование технологии строительства шахт и сооружений». – Выпуск № 18. – Донецк, Украина. – 2012. – С. 25 – 27.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения диссертации получены лично автором. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора заключается в следующем: установлены закономерности электропотребления для показателей общего и удельного расхода электроэнергии проходческих участков; энерготехнологические и прогнозные модели электропотребления; методические принципы оценки энергоэффективности, даны рекомендации, направленные на повышение энергоэффективности с учетом технических условий ведения горнопроходческих работ угольных шахт.