

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-367-375

Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты

А. Б. Садридинов

ООО «Энергоблок-М», г. Москва, Россия

Аннотация: Рост интенсивности ведения проходческих работ, энерговооруженности труда и затрат топливно-энергетических ресурсов обуславливает необходимость не только повышать энергоэффективность производственных процессов производства, но и снижать неизбежно возникающие потери энергии. Условия ведения горнопроходческих работ определяются сочетанием комплекса взаимно воздействующих факторов (геологических, технологических и организационных), а оценка степени их влияния на энергоэффективность технологических процессов требует глубокого детального исследования. Для критериальной оценки эффективности ведения горнопроходческих работ предлагается использование показателей уровня энергопотребления, эффективности и качества прохождения горной выработки сменными бригадами, позволяющими объективно оценить их работу. Показатели технологического и удельного расхода электроэнергии при ведении проходческих работ изменяются в широком диапазоне, поэтому для обеспечения устойчивой работы сменным бригадам необходимо придерживаться рекомендуемых показателей, определяющих оптимальные темпы проходки и ограничения выхода за допустимые или предельные режимы. Исследованы статистические модели показателей, определяющих энергоэффективность работы горнопроходческих комплексов, на примере угольной шахты «Северная». Предложены показатели уровня энергопотребления, эффективности и качества прохождения горной выработки сменными бригадами. Определены законы распределения для основных показателей, характеризующих энергоэффективность ведения горнопроходческих работ. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивой работы горнопроходческих комплексов в течение всего периода проходки участков. С точки зрения организации ведения горнопроходческих работ необходимо осуществление постоянного контроля параметров и темпов проходки, качества подготовки забоя, своевременного технического обслуживания и ремонта машин и оборудования, управления технологическим процессом путем обеспечения оптимальных режимов работы горнопроходческого комплекса.

Ключевые слова: горнопроходческие работы; электроснабжение, угольная шахта, энергоэффективность, горнопроходческие комплексы; модели

Для цитирования: Садридинов А. Б. Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты. *Горные науки и технологии*. 2020;5(4):367-375. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-367-375

Analysis of energy performance of heading sets of equipment at a coal mine

A. B. Sadridinov

Energoblok-M LLC, Moscow, Russia

Abstract: The growth of volume of tunneling, power supplied per job, and consumption of fuel and energy resources makes it necessary to increase energy performance of production processes with reducing energy losses. Tunneling conditions are determined by a combination of mutually influencing factors (geological, technological and organizational), and assessing their impact on tunneling energy performance requires a deep detailed study. For criterion assessment of tunneling performance, indicators of energy consumption, performance, and quality of tunneling performed by shift crews, allowing to objectively assess their work, were proposed. Indicators of process and specific power consumption in the process of tunneling vary over a wide range, therefore, to ensure smooth equipment operation, shift crews must adhere to the recommended indicators that determine the optimum rates of tunneling and enables adherence to permissible operation modes. Statistical models of energy performance indicators of heading sets of equipment operation were investigated using the example of the Severnaya coal mine. Indicators of energy consumption, energy performance, and tunneling (on shift basis) were proposed. Distribution laws have been determined for the main indicators characterizing tunneling energy performance. Recommendations have been developed to ensure sustainable operation of heading sets of equipment throughout the entire period of tunneling. Tunneling requires permanent monitoring its parameters and rates of advance, the quality of

face preparation, timely maintenance and repair of machinery and equipment, control of the process through ensuring optimal operating modes of the heading sets of equipment.

Keywords: tunneling; power supply, coal mine, energy performance, heading set of equipment; models

For citation: Sadridinov A. B. Analysis of energy performance of heading sets of equipment at a coal mine. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(4):367-375. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-367-375

Введение

Повышение энергоэффективности горных предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых подземным способом, является актуальной научной и практической задачей, стоящей в области эффективного освоения природных ресурсов и подземного пространства. При осуществлении мероприятий по энергосбережению на горном производстве необходимо обладать информацией о количестве прямых затрат энергии на основные технологические процессы, включая работу вспомогательных установок. Для производственных процессов в области строительства подземных сооружений и шахт такая информация необходима, т.к. в реальности может оказаться, что снижение прямых затрат энергии будет сопровождаться ростом совокупных затрат, и общие затраты энергии превысят первоначальный базовый уровень. Рост интенсивности ведения проходческих работ, энерговооруженности труда и затрат топливно-энергетических ресурсов обуславливает необходимость не только повышать энергоэффективность производственных процессов производства, но и снижать неизбежно возникающие потери энергии [1, 2]. Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что анализ энергетических показателей горнопроходческих работ на основе построенных математических моделей открывает путь к разработке специализированного обеспечения для контроля качества ведения горнопроходческих работ, а также выработки организационных мероприятий по улучшению этого качества на основе решения так называемых обратных задач [10–14].

Электропотребление горнопроходческих комплексов является предметом более

ранних исследований, среди которых есть достаточно оригинальные работы [3–8]. Но в большинстве случаев разработка моделей осуществлялась не для целей оценки эффективности горнопроходческих работ, а для определения параметров и режимов работы горнопроходческих комплексов, что тоже очень важно, но это только одно из возможных направлений решаемых задач.

Описание экспериментальной площадки

Экспериментальные исследования, реализуемые в работе, проводились на базе проходческих участков шахты «Северная», г. Воркута, где ведение горнопроходческих работ осуществляется с использованием проходческих комбайнов MB670, JOYR75, 12CM30 и КП-21. Конечно, в каждом случае схемы электроснабжения проходческих участков угольных шахт отражают специфику технологических решений конкретного предприятия, но известны также общие подходы к их проектированию, характеристики, режимы работы, методы выбора оборудования и т.д. [9].

Работы на шахте «Северная» ведутся по породе, по углю, по углю с присечкой. Транспортная схема включает в себя скребковые конвейеры 2СР75 и ленточные конвейеры 3Л-1200. Проходческие работы также ведутся без применения буровзрывных работ, но по грунтам, при осевых усилиях сжатия $\sigma_{сж}$ в пределах от 20 до 70 МПа. Стандартное сечение горной выработки 9 м². Нарезка вентиляционных и откаточных штреков в зависимости от мощности пласта (от 1,5 до 1,9 м) обеспечивает попутную добычу полезного ископаемого. Плановые показатели проходки для различных участков составляют от 2300 до 9500 п.м.

Анализ электропотребления на горно-проходческом участке

Разность по суммарному годовому расходу электроэнергии между сменами ΔW 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 сменами участков).

Одним из критериев оценки уровня энергопотребления при анализе эффективности проходческих работ с точки зрения рационального использования электроэнергии сменными бригадами предлагается использовать показатель

$$k_{W_{см}} = \frac{\bar{W}_{см} - W_{смi}}{\bar{W}_{см}} \cdot 100, \%$$

где $W_{смi}$ – расход электроэнергии за i -ю смену на проходческом участке, кВт·ч; $\bar{W}_{см}$ – среднесменный расход электроэнергии по совокупному потреблению всеми сменами проходческого участка, кВт·ч.

Разность по годовой суммарной массе извлекаемой из горной выработки породы между сменами ΔQ_T для каждого из участков колеблется от 87 до 2301 т ($\Delta Q_T\% = 1,1-4,41$). При этом абсолютные и относительные показатели по годовой суммарной массе извлекаемой породы как для участков, так и между сменами внутри участков, практически не зависят от их энерговооруженности.

Этот факт свидетельствует о том, что при прохождении горных выработок постоянного сечения объем и масса извлекаемой породы зависят от ее характеристик, а также технических характеристик проходческих комплексов и режима их работы.

При оценке эффективности проходческих работ с точки зрения рационального использования электроэнергии сменными бригадами и качества прохождения горных выработок предлагается использовать коэффициент

$$k_{Q_T} = \frac{\bar{Q}_T - Q_{Ti}}{\bar{Q}_T} \cdot 100, \%$$

где Q_{Ti} – производительность i -й смены проходческого участка по горной массе, т; \bar{Q}_T – среднесменный объем извлекаемой горной массы на проходческом участке, т.

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

При пересчете итоговых показателей $\Delta Q_{пм}$ по отношению к величине среднесменной проходки $\bar{Q}_{пм}$ для каждого участка разница в затраченном времени между сменными бригадами составляет от 4 до 35 смен (24–210 ч в год).

Этот факт свидетельствует о том, что при прохождении горных выработок показатель проходки $Q_{пм}$ зависит не только от горно-геологических и технологических факторов, но и правильной (рациональной) организации работы бригады в течение смены.

При оценке эффективности проходческих работ с точки зрения рационального использования электроэнергии сменными бригадами предлагается использовать в качестве критерия оценки эффективности прохождения горных выработок показатель

$$k_{Q_{пм}} = \frac{\bar{Q}_{пм} - Q_{пмi}}{\bar{Q}_{пм}} \cdot 100, \%$$

где $\bar{Q}_{пмi}$ – средняя производительность i -й смены проходческого участка по погонным метрам горной выработки, п.м; $\bar{Q}_{пм}$ – среднесменное значение протяженности пройденной горной выработки на проходческом участке, п.м.

Статистические модели показателей энергоэффективности проходческих участков

В работе была поставлена задача на основании статистических данных технологического расхода электроэнергии и объема выполненных проходческих работ установить законы распределения для показателей, характеризующих энергоэффективность проходческих участков.

В соответствии с известной методикой аналитических исследований выполнен анализ производительности и режимов потребления электрической энергии на проходческих участках шахты «Северная» [1, 2].

Среднесменные показатели производительности участков по объему извлекаемой горной массы Q_1 (т), пройденным погонным метрам горной выработки Q_2 (пм), а также по сменному потреблению электрической энергии W (кВт·ч) и ее удельному расходу ω_1 (кВт·ч/т) и ω_2 (кВт·ч/пм) приведены в табл. 2.

Диапазон изменения показателей по удельному расходу электроэнергии относительно горной массы на участках составляет $\omega_1 = 2,4\text{--}2,57$ кВт·ч/т ($\Delta\epsilon = 6,6\%$), относительно проходки $\omega_2 = 51,9\text{--}65,8$ кВт·ч/пм ($\Delta\epsilon = 21\%$). Такой разброс значений можно объяснить тем, что непосредственное извлечение горной массы в рамках технологического процесса обусловлено её объемом, плотностью породы, степенью разрыхления и полноты загрузки ковша или стола питания погрузочной машины. При этом удельный расход электроэнергии на проходку одного погонного метра выработки в значительной степени зависит от крепости проходимых горных пород f , их сопротивляемости усилию резания $q_{сж}$ исполнительного органа проходческого комбайна или осевого усилия подачи буровой установки $P_{ос}$.

Диапазон изменения средних показателей между сменами в пределах участков не превышает 2 %, что свидетельствует о достаточно устойчивой работе в течение года.

На следующем этапе ставилась задача установления законов распределения, которым подчиняются среднесменные показатели работы проходческих участков с целью определения их устойчивых уровней и диапазона допустимых отклонений. Это позволяет обосновать нормативные (плановые) показатели для проходческих участков и оценить потенциал повышения эффективности производства проходческих работ. Для установления законов распределения анализируемых величин в зависимости от частотного распределения определяются абсолютные и относительные показатели вариационных рядов.

На основании свойства мажорантности средних величин (когда сумма положительных отклонений от среднего равна сумме отрицательных отклонений) распределение вероятности $P(\omega)$ близко к нормальному закону при условии $\sigma > 1,25\bar{d}$.

В случае если коэффициент вариации v меньше 33%, то совокупность $[\omega]$ является однородной (для распределений, близких к нормальному закону).

Результатом анализа статистических показателей энерготехнологических параметров проходческих участков является следующее:

1. Для представленных показателей характерен достаточно большой размах вариации относительно средней величины. Характеризующий его коэффициент осцилляции изменяется в диапазоне $k_R = 30\text{--}170\%$. Наибольший размах вариации относительно среднего значения приходится на показатели удельного расхода электроэнергии ω_1 (кВт·ч/т), ω_2 (кВт·ч/пм) и производительности Q_2 (пм).

Таблица 2

Среднесменные показатели для проходческих участков (по итогам года)
 Average shift performance indicators for drifting areas (at year-end)

Показатель	Размерность	Проходческие участки					
		№ 1	№ 5	№ 6	№ 8	№ 9	№ 10
Q_1	т	45,94	76,24	19,57	87,31	173,28	45,02
Q_2	пм	1,99	3,45	2,02	3,53	8,47	2,03
W	кВт·ч	109,6	182,1	49,35	207,6	415,4	107,6
ω_1	кВт·ч/т	2,41	2,47	2,57	2,49	2,5	2,47
ω_2	кВт·ч/пм	59,95	56,5	26,8	62,6	51,92	57,87

1. Средние и медианные значения показателей производительности практически совпадают: относительная погрешность $\Delta\varepsilon = +0,01\%$, для технологического расхода электроэнергии – $\Delta\varepsilon = +2,6\%$. Однако для удельного расхода электроэнергии относительная погрешность $\Delta\varepsilon = -9\%$. Последнее свидетельствует о необходимости установления причин такого несоответствия.

2. Коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации указывают на соответствие показателей производительности и технологического расхода электроэнергии нормальному закону распределения.

3. Для показателей удельного расхода электроэнергии характерна положительная асимметрия и малый эксцесс, что, с учетом однородности выборки, характерно для логнормального закона или гамма-распределения.

Установление законов распределения среднесменных показателей выполнялось для

четырёх проходческих участков в соответствии с [3, 4]. Гистограммы и функции плотности распределения на примере проходческого участка № 1 шахты «Северная» представлены на рис. 1–3.

Статистический анализ показал, что изменение технологического расхода электроэнергии W подчиняется равномерному закону распределения, удельный расход электроэнергии на тонну извлекаемой горной породы ω_1 – гамма-распределению, удельный расход электроэнергии на один погонный метр горной выработки ω_2 – логнормальному закону.

В результате проверки достоверности по критериям согласия Пирсона χ^2 , Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Вилка было установлено, что характер изменения случайных величин исследуемых параметров соответствуют принятым гипотезам о законах распределения [15–18].

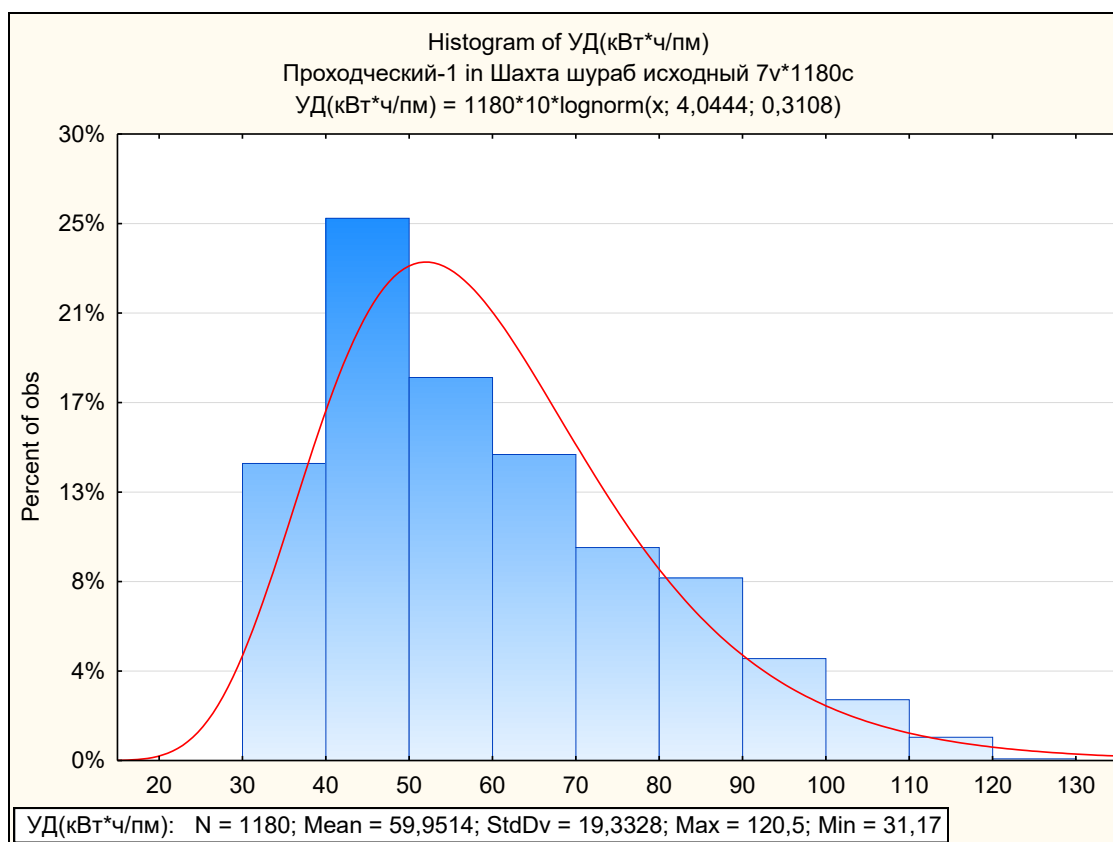


Рис. 1. Гистограмма функции плотности распределения $f^*(\omega_2)$

Fig. 1. Density function histogram $f^*(\omega_2)$

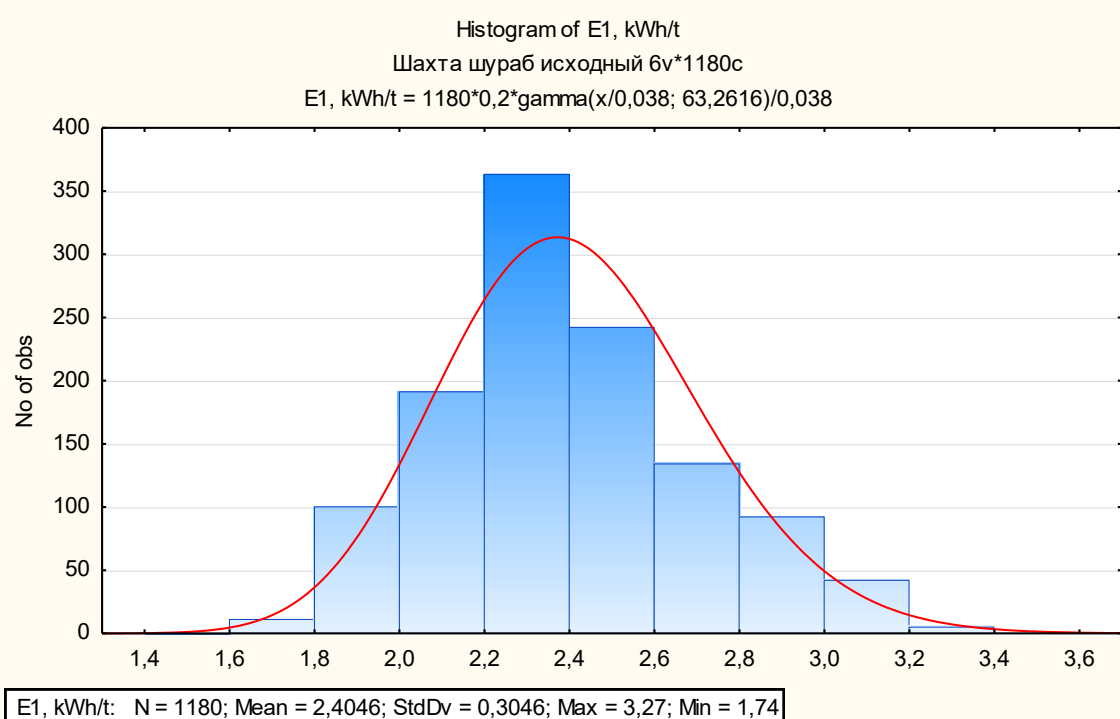


Рис. 2. Гистограмма функции плотности распределения $f^*(\omega_1)$

Fig. 2. Density function histogram $f^*(\omega_1)$

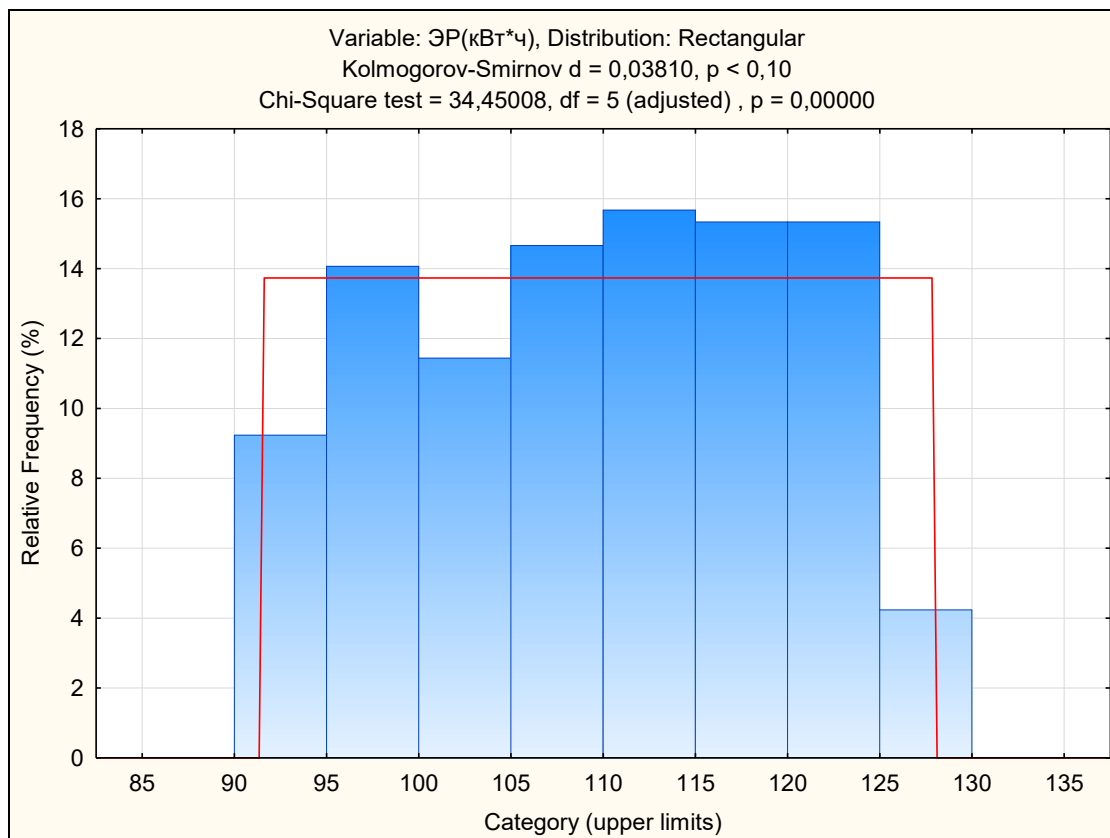


Рис. 3. Гистограмма функции плотности распределения $f^*(W)$

Fig. 3. Density function histogram $f^*(W)$

Для распределения частот $f(W)$ характерна симметрия относительно \bar{W} , т.е. его среднее значение M практически совпадает с медианным M_e . С учетом среднеквадратического отклонения устойчивый уровень электропотребления проходческого участка определится в диапазоне $\bar{W} \pm \sigma_W$.

Для распределения частот $f(\omega_2)$ характерна незначительная асимметрия относительно $\bar{\omega}_2$, т.е. его среднее значение M практически совпадает с медианным M_e .

С учетом среднеквадратического отклонения устойчивый уровень электропотребления проходческого участка определится в диапазоне $\bar{\omega}_2 \pm \sigma_{\omega_2}$.

Таким образом, статистические модели показателей энергоэффективности проходческих участков можно считать сформированными.

Выводы:

1. Условия ведения горнопроходческих работ определяются сочетанием комплекса взаимно воздействующих факторов (геологических, технологических и организационных), а оценка степени их влияния на энергоэффективность технологических процессов требует глубокого детального исследования.

2. В качестве критериев оценки эффективности ведения горнопроходческих работ

предлагается использование показателей уровня энергопотребления, эффективности и качества прохождения горной выработки сменными бригадами, позволяющими объективно оценить их работу.

3. Показатели технологического и удельного расхода электроэнергии при ведении проходческих работ изменяются в широком диапазоне, поэтому для обеспечения устойчивой работы сменным бригадам необходимо придерживаться рекомендуемых показателей, определяющих оптимальные темпы проходки, и ограничений выхода за допустимые или предельные режимы.

4. При планировании показателей энергоэффективности необходимо учитывать горно-геологические условия, технические характеристики проходческих комплексов и режимы их работы.

С точки зрения организации ведения горнопроходческих работ необходимо осуществление постоянного контроля параметров и темпов проходки, качества подготовки забоя, своевременного технического обслуживания и ремонта машин и оборудования, управления технологическим процессом путем обеспечения оптимальных режимов работы горнопроходческого комплекса.

Библиографический список

1. Пичуев А. В., Садридинов А. Б. Методы оценки энергоэффективности проходческих работ в условиях городского подземного строительства. Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование технологий строительства шахт и сооружений». Донецк, Украина. 2012;18:25-27.

2. Пичуев А. В., Садридинов А. Б. Энергетические характеристики проходческих комбайнов с исполнительными органами избирательного действия. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(9):348-350.

3. Liu X., Zhang Y., Zhang K. Optimization control of energy consumption in tunneling system of earth pressure balance shield tunneling machine. *Engineering Letters*. 2020;28(2):551-558.

4. Liu X., Zhao Z. Coordinated optimization control of shield tunneling machine based on predictive function control. *Engineering Letters*. 2020;28(3):281-287.

5. Liu X., Shao C. Present status and prospect of shield machine automatic control technology. *Jixie Gongcheng Xuebao. Journal of Mechanical Engineering*. 2010;46(20):152-160. DOI: [10.3901/JME.2010.20.152](https://doi.org/10.3901/JME.2010.20.152)

6. Zhang Q., Qu C., Kang Y., Huang G., Cai Z., Zhao Y., Zhao H., Su P. Identification and optimization of energy consumption by shield tunnel machines using a combined mechanical and regression analysis *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;28(1):350-354. DOI: [10.1016/j.tust.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.12.003)

7. Yang X., Gong G.-F., Yang H.-Y., Jia L.-H., Ying Q.-W. A cutterhead energy-saving technique for shield tunneling machines based on load characteristic prediction. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2015;16(5):418-426. DOI: [10.1631/jzus.A1400323](https://doi.org/10.1631/jzus.A1400323)

8. Lyakhomskiy A., Perfilieva E., Petrochenkov A., Bochkarev S. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises research, technologies and personnel. In: *Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovation 2015 4th)*. 2015. P. 44-47.
9. Дзюбан В. С., Ширин И. Г., Ванеев Б. Н., Гостищев В. М. Справочник энергетика угольной шахты. Под общей ред. Б. Н. Ванеева. Донецк: «ООО Юго-Восток ЛТД.»; 2001.
10. Lyakhomskiy A., Perfilieva E., Kychkin A., Genrikh N. A software-hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data. *Russian Electrical Engineering*. 2015;86(6):314-319.
11. Zhang T., Neil Taylor R., Zheng G., Sun J., Fan Q., Diao Y., Zhou H. Modelling ground movements near a pressurised tunnel heading in drained granular soil. *Computers and Geotechnics*. 2018;104:152-166. DOI: [10.1016/j.compgeo.2018.08.015](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.08.015)
12. Gabov V. V., Zadkov D. A. Energy-saving modular units for selective coal cutting. *Eurasian Mining*, 2016;(1):37-40. DOI: [10.17580/em.2016.01.06](https://doi.org/10.17580/em.2016.01.06)
13. Fashilenko V., Reshetnyak S. Improving the energy performance of industrial enterprises. In: *Miner's week – 2015. Reports of the XXIII international scientific*. 2015. P. 570-573.
14. Dias D., Kastner R. Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields - Analysis of monitoring and numerical modeling results. *Engineering Geology*. 2013;152(1):17-25. DOI: [10.1016/j.enggeo.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.002)
15. Lu S. Coal mining industrial robots the institutions of the modeling and simulation. *Advanced Materials Research*. 2012;482-484:1490-1494. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1490](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1490)
16. Ръжов П. А. *Математическая статистика в горном деле*: Учеб. пособие для вузов по специальности «Маркшейдерское дело». М.: Высш. шк.; 1973. 287 с.
17. Мацкевич И. П., Свирид Г. П. *Высшая математика. Теория вероятностей и математическая статистика*. Минск: Высшая школа; 1993.
18. Бегляков В. Ю., Аксенов В. В., Костинцев И. К., Хорешок А. А. Определение сил взаимодействия основных систем геолога с геосредой и между собой. *Горные науки и технологии*. 2017;(4):23-30 2017;(4):23-30. DOI: [10.17073/2500-0632-2017-4-23-28](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-4-23-28)

References

1. Pichuev A. V., Sadridinov A. B. Methods for assessing energy performance of tunneling in urban underground construction. In: Proc. of international scientific and technical conf. "*Improving techniques of construction of mines and structures*." Donetsk, Ukraine. 2012;18:25-27. (In Russ.)
2. Pichuev A. V., Sadridinov A. B. Energy characteristics of selective tunneling machines. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(9):348-350. (In Russ.)
3. Liu X., Zhang Y., Zhang K. Optimization control of energy consumption in tunneling system of earth pressure balance shield tunneling machine. *Engineering Letters*. 2020;28(2):551-558.
4. Liu X., Zhao Z. Coordinated optimization control of shield tunneling machine based on predictive function control. *Engineering Letters*. 2020;28(3):281-287.
5. Liu X., Shao C. Present status and prospect of shield machine automatic control technology. *Jixie Gongcheng Xuebao. Journal of Mechanical Engineering*. 2010;46(20):152-160. DOI: [10.3901/JME.2010.20.152](https://doi.org/10.3901/JME.2010.20.152)
6. Zhang Q., Qu C., Kang Y., Huang G., Cai Z., Zhao Y., Zhao H., Su P. Identification and optimization of energy consumption by shield tunnel machines using a combined mechanical and regression analysis *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;28(1):350-354. DOI: [10.1016/j.tust.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.12.003)
7. Yang X., Gong G.-F., Yang H.-Y., Jia L.-H., Ying Q.-W. A cutterhead energy-saving technique for shield tunneling machines based on load characteristic prediction. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2015;16(5):418-426. DOI: [10.1631/jzus.A1400323](https://doi.org/10.1631/jzus.A1400323)
8. Lyakhomskiy A., Perfilieva E., Petrochenkov A., Bochkarev S. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises research, technologies and personnel. In: *Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovation 2015 4th)*. 2015. P. 44-47.
9. Dzyuban V. S., Shirin I. G., Vaneev B. N., Gostishchev V. M. Coal Mine Power Engineer Handbook. Ed. B. N. Vaneev Donetsk: Yugo-Vostok LTD Publ.; 2001. (In Russ.)
10. Lyakhomskiy A., Perfilieva E., Kychkin A., Genrikh N. A software-hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data. *Russian Electrical Engineering*. 2015;86(6):314-319.
11. Zhang T., Neil Taylor R., Zheng G., Sun J., Fan Q., Diao Y., Zhou H. Modelling ground movements near a pressurised tunnel heading in drained granular soil. *Computers and Geotechnics*. 2018;104:152-166. DOI: [10.1016/j.compgeo.2018.08.015](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.08.015)
12. Gabov V. V., Zadkov D. A. Energy-saving modular units for selective coal cutting. *Eurasian Mining*, 2016;(1):37-40. DOI: [10.17580/em.2016.01.06](https://doi.org/10.17580/em.2016.01.06)

13. Fashilenko V., Reshetnyak S. Improving the energy performance of industrial enterprises. In: *Miner's week – 2015. Reports of the XXIII international scientific.* 2015. P. 570-573.
14. Dias D., Kastner R. Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields - Analysis of monitoring and numerical modeling results. *Engineering Geology.* 2013;152(1):17-25. DOI: [10.1016/j.enggeo.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.002)
15. Lu S. Coal mining industrial robots the institutions of the modeling and simulation. *Advanced Materials Research.* 2012;482-484:1490-1494. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1490](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1490)
16. Ryzhov P. A. *Mathematical statistics in mining*: Manual for graduate students with specialization in Mine Surveying. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1973. 287 p. (In Russ.)
17. Matskevich I. P., Svirid G. P. Higher mathematics. Probability theory and mathematical statistics. Minsk: Vysshaya Shkola Publ.; 1993. (In Russ.)
18. Beglyakov V. Y., Aksenov V. V., Kostinets I. K., Khoreshok A. A. Determining the forces of geokhod main systems interaction with geoenvironment and each other. 2017;(4):23-30 2017;(4):23-30. DOI: [10.17073/2500-0632-2017-4-23-28](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-4-23-28) (In Russ.)