Кубрин С.С.
Kubrin S.S.

профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией 2.3 «Геотехнологические риски при освоении газонасыщенных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры «Автоматизированные системы управления», г. Москва, Российская Федерация

Решетняк С.Н.
Reshetnyak S.N.

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории 2.3 «Геотехнологические риски при освоении газонасыщенных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», г. Москва, Российская Федерация

Бондаренко А.М.
Bondarenko A.M.

заместитель главного энергетика АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация

УДК 622:621.31

DOI:

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДЕЛЬНЫХ НОРМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В настоящее время угольная промышленность России является одним из локомотивов технологического развития. Модернизация оборудования, разработка новых технологических решений являются основой для уверенного технологического развития страны, в том числе, в минерально-сырьевом кластере России. В представленной публикации рассматриваются вопросы нормирования электропотребления применительно к выемочным участкам высокопроизводительных угольных шахт на основе разработанного факторного пространства. Также рассматривается возможность применения технологии бенчмаркинга в специфических условиях угольных шахт.

Анализ факторного пространства позволил получить математическую модель процесса электропотребления высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты. Также разработана структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа, с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности. Данная математическая модель и структурная схема позволят проанализировать процессы и взаимосвязи, возникающие при добыче угля подземным способом. А также определить основные и косвенные элементы факторного пространства, процесса добычи высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, что в конечном итоге позволит оптимизировать параметры электропотребления и снизить себестоимость добычи продукции.

Ключевые слова: нормирование, электрическая энергия, угольная шахта, выемочный участок, факторное пространство, энергетическая эффективность, бенчмаркинг.

MATHEMATICAL MODELLING OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION NORMS OF COAL EXTRACTION SECTIONS OF COAL MINES

Currently, the coal industry in Russia is one of the locomotives of technological development. Modernization of equipment, development of new technological solutions are the basis for the confident technological development of the country, including in the mineral resource cluster of Russia. The article deals with the regulation of power consumption in relation to the excavation sites of high-performance coal mines on the basis of the developed factor space. The possibility of using benchmarking technology in specific conditions of coal mines is also considered.

The analysis of the factor space allowed us to obtain a mathematical model of the process of power consumption of a high-performance excavation site of a coal mine. And also developed a block diagram of the excavation site, based on cluster analysis, taking into account the factor space for coal mines of high performance. This mathematical model and structural scheme will allow to analyze the processes and relationships arising in the underground coal mining. And also to determine the main and indirect elements of the factor space, the production process of a high-performance excavation site of the coal mine, which ultimately will optimize the parameters of power consumption and reduce the cost of production.

Key words: rationing, electric energy, coal mine, excavation site, factor space, energy efficiency, benchmarking.

В настоящее время угольная промышленность России является одним из локомотивов технологического развития. Модернизация оборудования, разработка новых технологических решений являются основой для уверенного технологического развития страны, в том числе, в минерально-сырьевом кластере России. Министерство энергетики России в достаточно сложных макроэкономических условиях разработало ряд документов по внедрению инновационных технологий и современных материалов в отраслях топливно-энергетического комплекса [1].

Рядом ученых проводятся научные исследования по повышению уровня эффективности добычи угля подземным способом за счет внедрения ряда современных технологических решений. В частности, в публикации [2, 3] представлен критериальный анализ угледобывающего предприятия на примере угольной шахты с целью повышения ее эффективности. Также имеется ряд научных исследований по построению системы контрольных показателей эффективности при добыче угля на основе технологии бенчмаркинга (от англ. benchmarking) [4]. Данная тех-

нология включает в себя два равнозначных процесса: «оценивание» и «сопоставление», как внешнее, так и внутреннее [5]. Данная технология предусматривает введение в технологический процесс выемки угля этапов определения, понимания и адаптации, имеющих эталонные примеры функционирования угольной шахты, с существующими угледобывающими предприятиями, работающими в схожих геотехнологических и производственных условиях.

В частности, представлен сравнительный анализ на основе технологии бенчмаркинга, восемь китайских угольных шахт, принадлежащих группе Yankuang [6].

Однако в настоящее время большое число предприятий по добыче и переработке угля в Российской Федерации работают в сложных горно-геологических и технологических условиях и внедрение технологии бенчмаркинга весьма затруднительно. Это особенно заметно при отработке высокопроизводительных забоев в метанообильных шахтах [7, 8].

Модернизация оборудования, участвующего в технологической цепочке выемки

угля, вызывает необходимость в корректировке технологических показателей работы, что в значительной степени влияет на нормативные и нормируемые величины, участвующие в расчетах при определении себестоимости продукции и плановых показателях угледобывающего предприятия. Данный аспект также приведет к корректировке технологических параметров угольной шахты, что, в свою очередь, вызовет значительное изменение нормативных показателей работы как отдельных элементов технологической цепочки выемки угля, так и угледобывающего предприятия в целом.

Основной энергетический ресурс, участвующий в технологическом процессе выемки угля, — электрическая энергия. Объемы используемых энергоресурсов на единицу продукции велики, что в значительной степени влияет на себестоимость добытой продукции, снижая её конкурентоспособность [9-11]. Поэтому для снижения энергозатрат необходимо провести исследования по разработке математической модели факторного пространства для определения удельных норм электропотребления выемочных участков угольных шахт. Это научная задача становится всё более значимой и актуальной ввиду нестабильности стоимости угля на мировых торговых площадках.

Под факторным пространством следует понимать совокупность внешних и внутренних параметров высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт [12]. Для определения факторного пространства выемочного участка угольной шахты необходимо провести факторный анализ, под которым следует понимать многомерную методику, позволяющую изучить взаимосвязи между параметрами переменных факторов, влияющих на выемку угля.

В настоящее время факторный анализ для определения факторного поля высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты возможно провести с помощью двух основных методов, а именно детерминированного и стохастического. Методы факторного анализа могут использоваться как совместно, так и раздельно. Под детерминированным методом следует понимать воз-

можность выявить ряд основных факторов, влияющих на выемку угля, относительно критерия повышенной эффективности. Под стохастическим методом следует понимать возможность определения ряда косвенных факторов, влияющих на выемку угля, относительно критерия повышенной эффективности. Однако, с точки зрения построения факторного поля высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, учет только лишь основных факторов, влияющих на выемку угля по критерию повышенной эффективности, явно недостаточен ввиду большого количества косвенных связей. Поэтому для получения качественного факторного пространства выемочного участка угольной шахты необходимо совместное использование обоих методов факторного анализа.

Для применения факторного анализа в условиях высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт необходимо решение ряда задач:

- обнаружение существующих значений факторов, влияющих на выемку угля;
- подбор факторов для полноценного анализа значений, влияющих на выемку угля;
- классификация факторов, влияющих на выемку угля для системной работы;
- обнаружение взаимосвязей между результативными и факторными значениями;
- определение степени влияния каждого из факторов, влияющих на выемку угля;
- анализ роли каждого из факторов, влияющих на выемку угля;
- применение факторной модели высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты.

Следует отметить, что все факторы, влияющие на выемку угля, возможно классифицировать по трем основным видам:

- нерегулируемые (природные) факторы;
- регулируемые технологические факторы на стадии проектирования;
- регулируемые технологические факторы на стадии ведения горных работ.

Классификационный анализ факторов, влияющих на выемку угля, представлен на рисунке 1.

Рисунок 1. Классификационный анализ факторов, влияющих на выемку угля

К нерегулируемым (природным) факторам следует отнести: тип кровли по устойчивости; тип кровли по обрушаемости; тип кровли по трещиноватости; тип кровли по коэффициенту крепости; тип кровли по мощности; тип кровли по метанообильности; мощность пласта; угол падения пласта; строение пласта; глубина залегания пласта; степень метаморфизма пласта; прочностные свойства пласта; метанноносность пласта; тип почвы по мощности; тип почвы по коэффициенту крепости; тип почвы по устойчивости.

К регулируемым технологическим факторам на стадии проектирования угледобывающего предприятия следует отнести следующие: схема подготовки выемочного пласта; схема разработки выемочного пласта; схема проветривания угольной шахты; схема транспортировки отбитого угля; длина лавы; система предварительной дегазации; выемочный комплекс.

К регулируемым технологическим факторам на стадии ведения горных работ следует отнести следующие: система текущей дегазации; скорость передвижения крепи; производительность транспортного кластера; ско-

рость выемочного комбайна; длительность цикла выемки.

Классификационный анализ факторов, представленный на рисунке 1, позволил выявить ряд основных элементов факторного пространства высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, которые поддаются регулированию на стадии ведения выемки угля.

К влияющим факторам следует отнести горно-технологические и горно-геологические факторы, которые действуют на технологию добычи угля в совокупности. Основными технологическими процессами при добыче угля подземным способом являются: скорость подачи комбайна; производительность транспортной цепочки; скорость подвигания забоя; численность персонала; текущая газоносность пласта; объем добытой продукции.

В результате проведенных исследований была построена структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности (рис. 2).

Рисунок 2. Структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности

Согласно представленной структурной схеме, на выемочном участке угольной шахты имеется три основных кластера: кластер извлечения; кластер крепи; транспортный кластер. Кластер извлечения включает в себя выемочный комбайн и станцию орошения. Кластер крепи включает в себя механизированную крепь и маслостанцию.

Транспортный кластер включает в себя лавный конвейер, дробилку и перегружатель.

На основе представленной структурной схемы разработана математическая модель электропотребления высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт с учетом факторного пространства. Данная математическая модель представлена в матричной форме:

$$\begin{aligned} \omega_{в.у.} = & A + B_1 \cdot x_1 + B_1 \cdot x_2 + B_1 \cdot x_3 + B_1 \cdot x_4 + B_1 \cdot x_5 + B_1 \cdot x_6 + \\ & + B_2 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_2 \cdot x_3 + B_2 \cdot x_4 + B_2 \cdot x_5 + B_2 \cdot x_6 + \\ & + B_3 \cdot x_1 + B_3 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + B_3 \cdot x_4 + B_3 \cdot x_5 + B_3 \cdot x_6 + \\ & + B_4 \cdot x_1 + B_4 \cdot x_2 + B_4 \cdot x_3 + B_4 \cdot x_4 + B_4 \cdot x_5 + B_4 \cdot x_6 + \delta \end{aligned}$$

где $\omega_{в.у.}$ – удельное электропотребление выемочного участка;

A – объем потребленной электроэнергии не зависящий от объемов добычи;

B_1 – электропотребление выемочного комбайна;

B_2 – электропотребление лавного конвейера;

B_3 – электропотребление дробилки;

B_4 – электропотребление перегружателя;

x_1 – скорость подачи комбайна;

x_2 – производительность транспортной цепочки;

x_3 – скорость подвигания забоя;

x_4 – численность персонала;

x_5 – текущая газоносность пласта;

x_6 – объем добытой продукции;

δ – погрешность.

Анализ факторного пространства угольной шахты позволил сделать следующие

заклучения: к основному элементу факторного пространства относятся скорость подачи выемочного комбайна и производительность транспортного кластера угольной шахты. К элементам транспортного кластера относятся как оборудование выемочного участка – скребковый (лавный) конвейер, дробилки и перегружатель, а также элементы магистрального транспорта угольной шахты (магистральный конвейерный транспорт, электровозная откатка, подъемные установки и т.д.). Такие элементы факторного пространства, как длительность цикла выемки, система текущей дегазации, скорость пере-

движки крепи, относятся к косвенным элементам факторного пространства высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты.

В заключение следует отметить, что представленная математическая модель электропотребления выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства позволит проанализировать процессы и взаимосвязи, возникающие при добыче угля подземным способом, и оптимизировать параметры электропотребления.

Список литературы

1. <http://economicdata.ru> (дата обращения 13.01.2019)
2. Bogacka M. Multicriteria analysis of coal mine. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2015. – P. 493-500.
3. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the polish hard coal mining industry. *Energies*. – 2017. - № 10. <https://doi.org/10.3390/en10101480> (дата обращения 13.01.2019)
4. Topno S.A., Sahoo L.K., Junghare A.S., Umre B.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. *30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS*, 2017. http://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/ECOS_2017 (дата обращения 13.01.2019)
5. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy* 169, 2016. – P. 301–308.
6. Овакимян Г.С., Шибина М.А. Современные методы повышения конкурентоспособности предприятия: бенчмаркинг и аутсорсинг // *Экономика и управление: проблемы, решения*. – 2015. - № 7. – С. 119-123.
7. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. – М.: Московский издательский дом, 2009. – 396 с.
8. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Актуальные аспекты повышения уровня нормирования электропотребления угольных шахт // *Вестник кузбасского государственного технического университета*. – 2017. - № 5. – С. 97-101. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-97-100
9. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analysis of methods of rationing of electricity consumption in coal mines // *Горный информационный аналитический бюллетень*. – 2017. - № 12. Отдельный сборник № 29 г. М.: Горная книга Горный информационный аналитический бюллетень. – 2017. - № 12. Отдельный сборник № 29. – М.: Горная книга. – С. 3-8. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-29-3-8
10. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: монография. – Кемерово. – Кузбас. гос. техн. ун-т, 2002. – 198 с.
11. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Закоршменный И.М., Решетняк С.Н. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи // *Горный информационный аналитический бюллетень*. – 2017. - № 12. Отдельный сборник № 29. – М.: Горная книга. – С. 48-56.
12. Агафонов В.В., Воропаева Е.В. Выявление диспропорций в технологических системах угольных шахт на основе факторного анализа. *Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал*. – 2018. - № S9. – С. 8-13.

References

1. <http://economicdata.ru> (дата обращения 13.01.2019)
2. Bogacka M. Multicriteria analysis of coal mine. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2015. – P. 493-500.
3. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the polish hard coal mining industry. *Energies*. – 2017. - № 10. <https://doi.org/10.3390/en10101480> (дата обращения 13.01.2019)
4. Topno S.A., Sahoo L.K., Junghare A.S., Umre B.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. *30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS*, 2017. http://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/ECOS_2017 (дата обращения 13.01.2019)
5. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy* 169, 2016. – P. 301–308.
6. Ovakimjan G.S., Shibina M.A. Sovremennyye metody povyshenija konkurentosposobnosti predpriyatija: benchmarking i autorsoring // *Ekonomika i upravlenije: problemy, reshenija*. – 2015. - № 7. – P. 119-123.
7. Ruban A.D., Artem'jev V.B., Zaburdjajev V.S., Zaburdjajev G.S., Rudenko Ju.F. Problemy obespechenija vysokoj proizvoditel'nosti ochistnyh zabojev v metanoobil'nyh shahtah. – M.: Moskovskij izdatel'skij dom, 2009. – 396 p.
8. Kubrin S.S., Reshetnjak S.N., Bondarenko A.M. Aktual'nyje aspekty povyshenija urovnja normirovanija elektropotreblenija ugol'nyh shaht // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. – 2017. - № 5. – P. 97-101. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-97-100
9. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analysis of methods of rationing of electricity consumption in coal mines. *Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'*. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik № 29. – M.: Gornaja kniga. *Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'*. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik. № 29. – M.: Gornaja kniga. – P. 3-8. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-29-3-8
10. Zaharova A.G. Zakonomernosti elektropotreblenija na ugol'nyh shahtah Kuzbassa: monografija. – Kemerovo: Kuzbas. gos. tehn. un-t. – 2002. – 198 z.
11. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Zakorshmennij I.M., Reshetnjak S.N. Eksperimental'nyje issledovanija parametrov raboty ochistnogo kombajna ugol'noj shahty pri razlichnyh skorostjah podachi // *Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'*. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik. № 29. – M.: Gornaja kniga. – P. 48-56.
12. Agafonov V.V., Voropajeva E.V. Vyjavlenije disproporcij v tehnologicheskix sistemah ugol'nyh shaht na osnove faktornogo analiza // *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal)*. – 2018. - № S9. – P. 8-13.