

Б.Н. Абрамович, И.С. Бабанова

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЦЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Управление и прогнозирование режимов электропотребления является одной из актуальных проблем для предприятий минерально-сырьевого комплекса. Одной из наиболее весомых затрат является оплата стоимости электроэнергии. Актуальность выбора оптимальной ценовой категории (ЦК) на оплату электроэнергии, а также применение потребителей-регуляторов способствует снижению нагрузки предприятия в часы максимума энергосистемы, обеспечивая снижение потерь как электроэнергии в электрических сетях предприятия и энергосистемы, так и снижению основной платы за электроэнергию, а также созданию благоприятного режима работы энергосистемы в наиболее напряженный период суток. Выполнен анализ эффективности регулировочных мероприятий по снижению потребления электрической энергии и ограничению потребляемой мощности в часы пиковых нагрузок и переносу электропотребления в зону суток с минимальной оплатой; построены совмещенные графики активной и реактивной мощности; проведен расчет одно- и двухставочных тарифов на оплату электроэнергии и показана оценка эффективности по различным ЦК (3—6 ЦК). Предложен алгоритм прогнозирования электропотребления на месяц вперед на основе использования ИНС для выбора оптимальной ЦК, где необходимо выполнять планирование.

Ключевые слова: управление электропотреблением, тариф на электроэнергию, ценовая категория, потребители-регуляторы, искусственные нейронные сети (ИНС), алгоритм обратного распространения ошибки.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-206-213

Проведение регулировочных мероприятий по снижению потребления электрической энергии и ограничению потребляемой мощности в часы пиковых нагрузок в условиях работы предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК) является актуальным вопросом повышения как экономической, так и энергетической эффективности работы ТЭК РФ. На МСК накладываются определенные ограничения, с одной стороны,

являясь участниками рынка электроэнергии и мощности, они должны соблюдать ряд требований, определяемых на основании законодательной базы России [1], и регулирующих рынок электроэнергии, с другой — стремиться к минимизации расходов, связанных с покупкой электроэнергии за счет правильного выбора ЦК и тарифа на электроэнергию. Если для населения, и приравненных к нему категорий потребителей, тарифы на

электроэнергию фиксированы в течение года и имеют в пределе три составляющих (пиковая зона, полупиковая и все остальное время суток), для юридических лиц ситуация существенно более сложная. Согласно законодательству РФ для юридических лиц существует шесть ЦК свободных (нерегулируемых) цен на электроэнергию и мощность [2]. Внутри каждой ЦК оплаты электроэнергии существует разделение потребителей по максимальной мощности энергопринимающих устройств, а также уровню питающего напряжения.

Из анализа работ [3]–[8], можно отметить рост внедрения интеллектуальных систем прогнозирования электропотребления. Эффективность применения прогнозных моделей с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) показана в исследованиях по прогнозированию электропотребления [9]–[11], а также для оценки технического состояния и остаточного ресурса [12]. Применение ИНС в различных задачах перед традиционными методами обусловлено тем, что они позволяют эффективно строить нелинейные зависимости, более точно описывать наборы данных, повышая точность прогнозирования на различных интервалах прогнозирования, выявлять

наборы независимых диагностируемых признаков.

В ходе исследования были поставлены и решены следующие задачи: анализ эффективности совмещения графиков электрических нагрузок НГДП в часы пиковых и внепиковых нагрузок; анализ выбора оптимальной ЦК при формировании графиков электрических нагрузок при управлении потребителями-регуляторами в часы максимальной нагрузки энергосистемы; сравнительный анализ расчета одно- и двухставочных тарифов на оплату электроэнергии для различных ЦК; разработка интеллектуальной системы прогнозирования электропотребления с применением ИНС для выбора рациональной ЦК и тарифа на электроэнергию.

В ходе исследования выделены основные факторы, влияющие на выбор принятия решения по ЦК на электроэнергию для НГДП: определение подгруппы потребителя по мощности (III, мощность от 670 кВт – 10 МВт; исключение из рассмотрения I и II ЦК); анализ нагрузки суточного, недельного и планируемого месячного графика (расчет основных показателей для анализа графиков электрической нагрузки); расчет цены 1 МВт*ч по ЦК (учет особенностей

Показатели для расчетов по ЦК

Input data to calculate price brackets

№	Определение показателей
1	Определение покупки электроэнергии на ОРЭМ (МВт*ч) и ее стоимость (руб.)
2	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости небаланса рынка на сутки вперед (РСВ) (руб.)
3	Отклонение электроэнергии (МВт*ч) (превышение факта над планом, небаланс БР) и ее стоимости (руб.)
4	Расчет сбытовой надбавки ГП (МВт*ч) и ее стоимости (руб.)
5	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости инфраструктурных платежей (руб.) (АТС, СО, ЦФР)
6	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости (руб.) за транспорт электроэнергии (руб) (одноставочный тариф)
7	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости (руб.) покупки мощности на ОРЭМ
8	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости сбытовой надбавки ГП (руб.)
9	Расчет объема (МВт*ч) и стоимости за транспорт (руб.) (ставка за содержание)

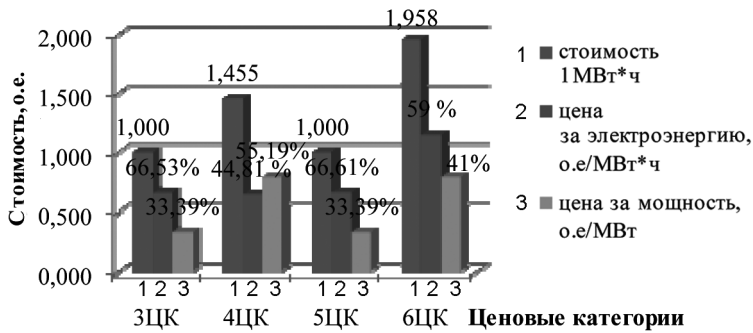


Рис. 1. Расчет ЦК без отключения нагрузки в часы максимума

Fig. 1. Calculation of price brackets without power-cut during maximum demand hours

ЦК и составляющих на электроэнергию: покупка на ОРЭМ, тариф за услуги по передаче; сбытовая надбавка ГП, оплата услуг инфраструктурных организаций), проведение сравнительного анализа стоимости электроэнергии по разным категориям; сравнение одно- (III и V) и двухставочных (IV и VI) тарифов. В таблице приведены основные показатели для расчетов по ЦК.

В исследовании анализировались профили и показатели графиков нагрузок по активной и реактивной мощности (P_{\max} , P_{\min} , $P_{\text{ср}}$, $P_{\text{ср.кв}}$, K_{ϕ} , $K_{\text{зан}}$, $K_{\text{рав}}$). Эффективность совмещения электрических нагрузок электроподстанций в часы пиковых нагрузок энергосистемы можно охарактеризовать величиной снижения совмещенного максимума по сравнению с арифметической суммой контролируемых максимумов. Такой факт объясняется не-

совпадением во времени максимумов нагрузки отдельных ПС и теоретически обосновывается с применением центральной предельной теоремы теории вероятностей. Были получены типичные графики нагрузки для ряда ПС НГДУ.

На уровне НГДУ достигается значительный эффект, в то время как по совмещению максимумов по отдельным подстанциям в большинстве случаев дает незначительный эффект. Найденный совмещенный максимум на 5184 кВт меньше, чем арифметическая сумма максимумов отдельных электроподстанций, что соответственно позволяет уменьшить оплачиваемую НГДУ активную мощность. Координация электрических нагрузок предполагает формирование графиков потребления активной и реактивной мощности и энергии таким образом, чтобы режимное взаимодействие благоприят-

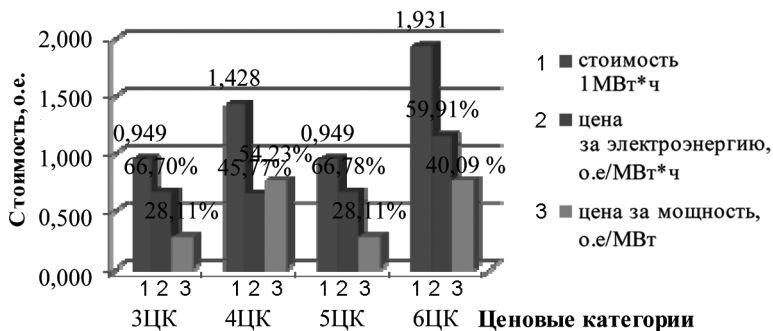


Рис. 2. Расчет ЦК с отключением нагрузки в часы максимума на 10 МВт

Fig. 2. Calculation of price brackets with power-cut during maximum demand hours by 10 MW

но сказывалось на технико-экономических показателях НГДУ. Таким образом, НГДУ вступает в режимное взаимодействие с энергосистемой как по активной, так и по реактивной мощности.

Расчет выбора ЦК для НГДУ рассматривался для нескольких вариантов с учетом использования имеющихся на предприятии потребителей-регуляторов: без отключения нагрузки в часы максимума (рис. 1); снижение P_{\max} в часы максимума на 3 МВт и 10 МВт, 15 МВт (рис. 2). В качестве базисной цены принята стоимость 1 МВт*ч для 3 ЦК. Из данных расчетов можно сделать вывод, что стоимость 1 МВт*ч выше для двухставочных тарифов (IV и VI ЦК), чем для одноставочных (III и V ЦК). При проведении регулировочных мероприятий происходит снижение цены за мощность по ЦК (снижение P_{\max} в часы максимума для III и V ЦК, где объем мощности определяется в зависимости от нагрузки потребителя в пиковые часы) в сравнении с анализом цены за электроэнергию, где наблюдается обратная зависимость — увеличение стоимости на оплату электроэнергии для всех ЦК. На рис. 1, 2 показаны полученные результаты расчетов.

Из сравнительного анализа стоимости оплаты электроэнергии для различных ЦК с учетом четырех вариантов снижения электрической нагрузки в часы максимума, приведенном на рис. 2 видно, что для НГДУ выгоднее оплачивать электроэнергию по III и V ЦК (одноставочный тариф).

Работа многослойного персептрона описывается следующими формулами:

$$NET_{ji} = \sum_l w_{jil} x_{jl}, \quad (1)$$

$$OUT_{ji} = F(NET_{ji} - \theta_{ji}), \quad (2)$$

$$x_{j(i+1)} = OUT_{ji}, \quad (3)$$

где индексом i обозначим номер входа, j — номер нейрона в слое, l — номер слоя; x_{jil} — i -й входной сигнал j -го нейро-

на в слое l ; w_{jil} — весовой коэффициент i -го входа нейрона номер j слоя l ; NET_{ji} — сигнал NET нейрона номер j слоя l ; θ_{ji} — пороговый уровень данного нейрона, F — нелинейная функция, называемая функцией активации.

Работа нейронной сети, строилась следующим образом: на вход сети подавались значения (ежемесячные) нагрузки (нейроны), каждое из соответствующих значений преобразовывались в сигналы, подаваемые в скрытый слой, затем за счет работы функций активаций нейронов (гиперболический тангенс, логистической, синусоидальной) и применения алгоритма обратного распространения ошибки, на выходе были получены прогнозные значения исследуемой величины. Исследование прогнозирования электропотребления с использованием алгоритма обратного распространения ошибки было проведено на примере предприятий МСК с дальнейшим созданием интеллектуальной системы мониторинга учета электроэнергии за счет введения функций прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей, показанного в работах [9]–[11].

Для достижения поставленной цели был использован алгоритм обратного распространения ошибки для тестирования базы данных обучающей и тестовой выборки (прогнозируемый год). Дополнительно сеть проверена на устойчивость, специально искажались входные данные. Точность прогнозирования нагрузки, с применением модели ИНС с логистической функцией активации в скрытом слое, дает лучшие прогнозные значения в сравнении с классическими методами прогнозирования (модель авторегрессии, сезонной декомпозиции временного ряда).

Из рис. 3 видно, что наибольшее снижение оплаты за электроэнергию наблюдается с учетом использования потребителей-регуляторов и выбора 6 ЦК.

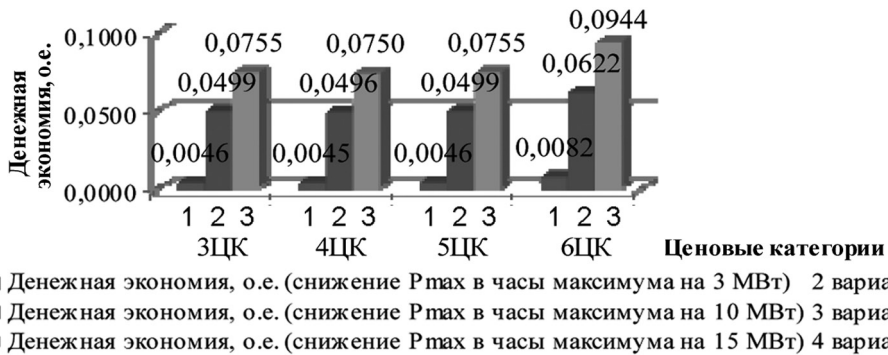


Рис. 3. Денежная экономия для НГДУ для различных ЦК
 Fig. 3. Money saving in oil and gas production with different price brackets

Это объясняется тем, что НГДУ может прогнозировать графики электрической нагрузки, тем самым снижать максимальную мощность в часы максимума.

На рис. 4 показана денежная экономия с учетом выполненного прогноза электропотребления для НГДУ на основе нейросетевых алгоритмов прогнозирования для 5 и 6 ЦК.

Повышение энергоэффективности для НГДУ было достигнуто за счет построения совмещенных максимумов и оценкой возможности глубины регулирования потребителями-регуляторами при координации графиков электрических нагрузок. Эффективное проведение таких регулировочных мероприятий на уровне НГДУ

привело к снижению стоимости оплаты за электроэнергию, а также созданию благоприятного режима работы энергосистемы в часы максимума.

Повышение энергоэффективности для НГДУ возможно с оценкой расчета различных ЦК с применением одноставочных тарифов (III и V ЦК). При этом, наибольшее снижение оплаты за электроэнергию посредством использования потребителей-регуляторов наблюдается при применении двухставочных тарифов (IV и VI ЦК). В зависимости от выбранной НГДУ ЦК на оплату электроэнергии, характера потребления и умения планировать с дальнейшим созданием интеллектуальной системы прог-

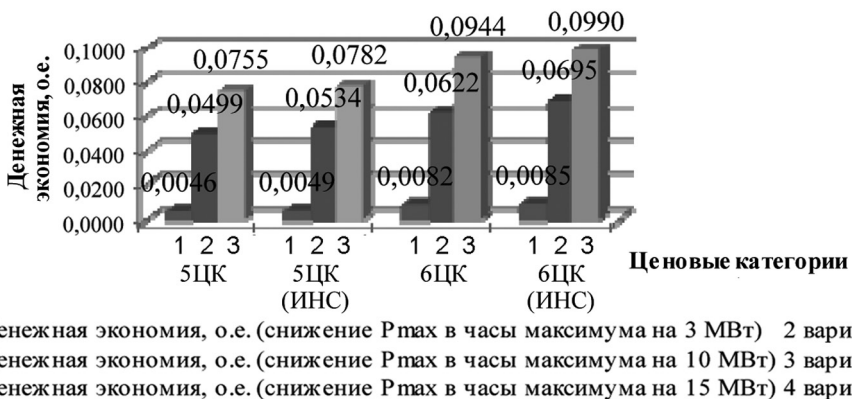


Рис. 4. Денежная экономия для НГДУ с учетом прогнозирования электропотребления на основе ИНС
 Fig. 4. Money saving in oil and gas production in case of power consumption prediction using artificial neural networks

нозирования электропотребления с помощью ИНС, а также использования потребителей-регуляторов конечная стоимость потребленной за месяц электроэнергии может существенно снижена.

Суммарная плата за потребленную электроэнергию для предприятия — участника рынка складывается из платы за фактически потребленный объем электроэнергии и платы за отклонение фактически потребленного ее объема от заявленного (спрогнозированного). Чем выше ошибка прогноза, тем больше

отклонение фактически потребленного объема электроэнергии от заявленного (спрогнозированного) и тем больше дополнительные расходы предприятия на оплату электроэнергии. Таким образом, снижение ошибки прогноза с помощью разработки нейросетевых моделей позволило выполнить прогноз электропотребления для предприятия минерально-сырьевого комплекса, так и уменьшить дополнительную плату за электропотребление, вызванную неточностью прогнозирования для соответствующих ЦК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Постановление* Правительства РФ «Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» (утв. 27.12.2010 г. №1172, ред. от 29.02.2016 г).

2. *Постановление* Правительства РФ «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (утв. 04.05.2012 г. № 442, ред. 22.02.2016 г).

3. *Daut M. A. M.; Hassan M. Y.; Abdullah, H.; Rahman H. A.; Abdullah M. P.; Hussin, F.* Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 70, pp. 1108–1118.

4. *Chengdong Li, Zixiang Ding, Dongbin Zhao, Jianqiang Yi?* *Guiqing Zhang* Building Energy Consumption Prediction: An Extreme Deep Learning Approach *Energies* 2017, 10 (10)

5. *Naji S., Keivani A., Shamshirband S, Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Mansor Z., Lee M.* Estimating building energy consumption using extreme learning machine method. *Energy* 2016, 97, pp. 506–516.

6. *Pérez-Chacón R., Talavera-Llames R. L., Martínez-Alvarez F., Troncoso A.* Finding electric energy consumption patterns in big time series data. In *Proceedings of the 13th International Conference Distributed Computing and Artificial Intelligence, Sevilla, Spain, 1–3 June 2016*; Springer: Cham, Switzerland, 2016; pp. 231–238.

7. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2006. — 781 с.

8. *Шумилова Г. П., Готман Н. Э., Старцева Т. Б.* Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2008

9. *Abramovich B. N., Babanova I. S.* *Mining sciences and technologies* 2016, no 2, pp. 66–77.

10. *Устинов Д. А., Бабанова И. С.* Обоснование выбора ценовой категории оплаты за электроэнергию с учетом потребителей-регуляторов // *Промышленная энергетика.* — 2016. — № 11. — С. 9–16.

11. *Абрамович Б. Н., Бабанова И. С.* Совершенствование алгоритмов управления аппаратами воздушного охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом для компрессорных станций магистрального газопровода // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2017. — СВ 5–2. Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. — С.310–318.

12. *Zhukovskiy Yu. L., Korolev N. A., Babanova I. S., Boikov A. V.* The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 (2017) 032056. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Абрамович Борис Николаевич¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: babaramov@mail.ru,

Бабанова Ирина Сергеевна¹ — аспирант, e-mail: irina_babanova@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 206–213.

B.N. Abramovich, I.S. Babanova

DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORK MODELS TO PREDICT AND CONTROL POWER CONSUMPTION IN MINERAL MINING INDUSTRY

Control and prediction of power consumption regimes is one of the pressing problems in mineral mining industry. One of the heaviest expenditure items is connected with the electricity bills payment. Optimization of price brackets of power to be consumed and application of consumption controllers facilitates reduction in maximum energy consumption in the production rush hours, decreases energy loss in internal and external mains, reduction in electricity bills and creation of favorable operation conditions for electric power systems in the tightest periods of day. Efficiency of the adjustment measures towards electricity reduction and power consumption limitation in the time of peak demand and transfer to electric power consumption to a day time zone when the electricity bills are minimal is evaluated; the compound plots of actual and wattless power are drawn; one-part and two-part electricity tariffs are calculated and performance capability of using different power price brackets (3–6 price brackets) is appraised. The algorithm is put forward for electric energy consumption prediction for a month period based on artificial neural networks to determine optimum price brackets, including planning.

Key words: power consumption control, electricity tariff, consumer–controller, artificial neural networks, backpropagation algorithm.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-206-213

AUTHORS

*Abramovich B.N.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: babaramov@mail.ru,

*Babanova I.S.*¹, Graduate Student, e-mail: irina_babanova@mail.ru,

¹ Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. *Postanovlenie Pravitel'stva RF «Ob utverzhdenii pravil optovogo rynka elektricheskoy energii i moshchnosti i o vnesenii izmeneniy v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii po voprosam organizatsii funktsionirovaniya optovogo rynka elektricheskoy energii i moshchnosti»* (utv. 27.12.2010 g. №1172, red. ot 29.02.2016 g). (Government regulations of wholesale market of electric energy and wattage and amendment of some governmental acts of Russian Federation on functioning of wholesale market of electric energy and wattage (approved as of Dec 27, 2010, No. 1172, edited as of Feb 29, 2016)).

2. *Postanovlenie Pravitel'stva RF «O funktsionirovanii roznichnykh rynkov elektricheskoy energii, polnom i (ili) chastichnom ogranichenii rezhima potrebleniya elektricheskoy energii»* (utv. 04.05.2012 g. № 442, red. 22.02.2016 g) (Functioning of retail markets of electric energy subject to complete and (or) partial limitation of power consumption (approved as of May 04, 2012, No. 442, edited as of Feb 22, 2016)).

3. Daut M.A.M.; Hassan M.Y.; Abdullah, H.; Rahman H.A.; Abdullah M.P.; Hussin, F. Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 70, pp. 1108–1118.

4. Chengdong Li, Zixiang Ding, Dongbin Zhao, Jianqiang Yi, Guiqing Zhang Building Energy Consumption Prediction. *Extreme Deep Learning Approach Energies* 2017, 10 (10)
5. Naji S., Keivani A., Shamshirband S, Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Mansor Z., Lee M. Estimating building energy consumption using extreme learning machine method. *Energy*, 2016, 97, pp. 506–516.
6. Pérez-Chacón R., Talavera-Llames R. L., Martínez-Alvarez F., Troncoso A. Finding electric energy consumption patterns in big time series data. *Proceedings of the 13th International Conference Distributed Computing and Artificial Intelligence, Sevilla, Spain, 1–3 June 2016*; Springer: Cham, Switzerland, 2016, pp. 231–238.
7. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* (Neural networks: Full course), Moscow, Vil'yams, 2006, 781 p.
8. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startseva T. B. *Prognozirovanie elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove neyrosetevykh struktur* (Prediction of electric energy demands under operating control of power systems based on neural network structures), Syktyvkar, KNTs UrO RAN, 2008.
9. Abramovich B. N., Babanova I. S. *Mining sciences and technologies*. 2016, no 2, pp. 66–77.
10. Ustinov D. A., Babanova I. S. *Promyshlennaya energetika*. 2016, no 11, pp. 9–16.
11. Abramovich B. N., Babanova I. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Special edition 5–2, pp. 310–318.
12. Zhukovskiy Yu. L., Korolev N. A., Babanova I. S., Boikov A. V. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 (2017) 032056.



**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)**

**ПРИМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ ПРИ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ
ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

(2017, № 12, СВ 42, 12 с.)

Кобылкин Сергей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, МГИ НИТУ «МИСиС»,
e-mail: sergey@kobylikin.ru.

Проветривание горных предприятий в настоящее время базируется на методиках, в основе которых лежат эмпирические зависимости. Они получены для определённых горно-геологических и технологических условий. Из-за этого применение их для других условий может приводить к ошибкам в проектировании. Математическое описание процессов тепло-массопереноса в горных выработках позволит создать новый подход в проектировании вентиляции шахт, рудников и объектов подземного строительства. В основу математического описания процессов массопереноса в рудничной атмосфере предлагается использовать кинетическую теорию газов, как наиболее полную. Это позволит исключить применение эмпирических формул и коэффициентов, что существенно повысит качество принимаемых проектных решений и уровень аэрологической безопасности.

Ключевые слова: проветривание, горное предприятие, методы проектирования, кинетическая теория газов.

**APPLICATION OF KINETIC THEORY OF GASES IN DESCRIBING THE PROCESSES OF
VENTILATION OF MINING ENTERPRISES**

Kobylikin S.S., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: sergey@kobylikin.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The ventilation of mining is currently based on methods based on empirical formulas. They are obtained for certain geological and technological conditions. Their use for other conditions may lead to errors in the design. Mathematical description of heat and mass transfer processes in mining will create a new approach to the design of ventilation mines and underground construction. The basis of mathematical description of mass transfer processes in the mine atmosphere is proposed to use the kinetic theory of gases as the most complete. This will eliminate the use of empirical formulas and coefficients, which will significantly improve the quality of design decisions and the level of aerological safety.

Key words: ventilation, mine, design methods, kinetic theory of gases.