

## Геозкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 622.831

### ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗДУХОМ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ ДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ВЬЕТНАМА ПРИ УГЛУБЛЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

С.Г.ГЕНДЛЕР<sup>1</sup>, НГУЕН ТХЕ ХА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Горный колледж, провинция Куангнинь, Вьетнам

На основе анализа горно-геологических условий разработки угольных месторождений Вьетнама, существующей нормативной базы по обеспечению безопасности при добыче угля, применения методов расчета воздухопотребности очистных и подготовительных выработок угольных шахт по метановому фактору и современных методов математического моделирования вентиляции горных выработок шахт и рудников, разработана процедура анализа эффективности управления воздухом по предложенному показателю – коэффициенту энергетической эффективности вентиляционной системы, определяемого коэффициентами полезного использования воздуха и энергетической эффективности. Получены соотношения, определяющие связь между аэродинамическим сопротивлением отрицательных регуляторов, количеством одновременно разрабатываемых очистных и подготовительных забоев, производительностью вентиляторов главного проветривания и потребляемой электрической мощностью.

**Ключевые слова:** угольная шахта; метан; метаноносность; метановыделение; вентиляция; газовый режим; категория по метану; прогноз метаноносности

**Как цитировать эту статью:** Гендлер С.Г. Обоснование рациональных способов обеспечения воздухом выемочных участков действующих угольных шахт Вьетнама при углублении горных работ / С.Г.Гендлер, Нгуен Тхе Ха // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 652-657. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.652

**Введение.** План развития угольной промышленности Вьетнама предусматривает увеличение добычи угля в 2015 и в 2020 годах соответственно до 60 и 70 млн т при 60 % общего объема, добываемого с помощью подземного способа разработки [10]. Реализация перспективных планов добычи угля во Вьетнаме (рис.1) возможна только при максимально полной реализации имеющегося потенциала угольных месторождений и действующих шахт [4]. При этом основным направлением повышения добычи является разработка угольных пластов на более глубоких горизонтах существующих шахт.

Рост глубины приводит к усложнению условий добычи, одним из факторов которой является метаноносность угольных пластов и, как следствие, необходимость увеличения подаваемого на рабочие места количества воздуха. Как показали результаты воздушных съемок, обеспечение воздухом действующих очистных и подготовительных забоев в настоящее время нельзя признать удовлетворительным. Причинами этого являются использование вентиляторов главного проветривания (ВГП), аэродинамические характеристики которых не соответствуют аэродинамическим характеристикам вентиляционных сетей действующих шахт, значительное количество очистных и подготовительных забоев, находящихся в одновременной отработке, в каждый из которых, в связи с отличающимися значениями природной метаноносности, необходимо подавать разные количества воздуха и т.п.

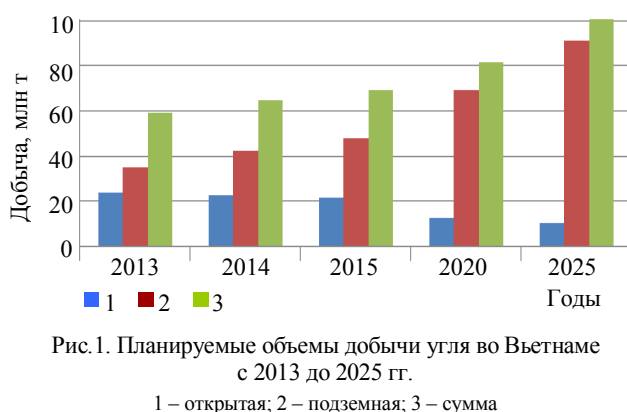


Рис. 1. Планируемые объемы добычи угля во Вьетнаме с 2013 до 2025 гг.

1 – открытая; 2 – подземная; 3 – сумма

Подача к значительному количеству мест потребления необходимых количеств воздуха, определяемых прогнозируемыми значениями природной метаноносности угольных пластов, применяемыми системами разработки и производительностью очистных забоев, при одновременном обеспечении приемлемых значений коэффициентов полезного действия вентиляторов главного проветривания и рационального использования подаваемого в выработки воздуха, возможна только при обеспечении его заданного распределения.



Несмотря на то, что вопросы управления воздухораспределением в сложных вентиляционных сетях были рассмотрены в ряде работ [1, 6, 7, 11-13, 15, 17-22], вопросы последующего анализа результатов математического моделирования, позволяющего обосновать рациональные способы управления воздухораспределением, характеризующиеся приемлемым уровнем эффективности, разработаны недостаточно. Необходимость решения этих вопросов и определяет актуальность данной работы.

**Анализ и прогноз метаноносности пластов шахты Мао Хе при увеличении глубины разработки.** На шахте Мао Хе в настоящее время завершена добыча угля на гор. +30/–25 м и продолжается одновременная добыча на двух гор. –80/–25 и –150/–80 м. В перспективе до 2020 г. планируется добыча угля с гор. –400 м. Горизонты –230, –320, –400 м вскрываются вертикальными стволами и квершлагами [10].

Анализ результатов исследований природной метаноносности, выполненных Центром горной безопасности (Вьетнам) совместно с шахтой Мао Хе в 2004-2013 гг., показал, что при увеличении глубины разработки метаноносность угольных пластов повышается. Для установления прогнозных значений метаноносности на горизонте –400, который планируется к разработке в 2020 г., данные, полученные в результате измерений, аппроксимировались зависимостями различного вида (линейными, гиперболическими, параболическими). Сопоставительный анализ показал, что использование зависимостей параболического типа приводит к наибольшей величине корреляционного соотношения, равного практически единице (рис.2) [5, 8, 20].

При этом наибольшую метаноносность имеют пласты D7 и D9 [3], для которых формулы вычисления природной метаноносности имеют вид:

$$H = -8,1X^2 - 8,8X + 27,4, \quad (1)$$

$$H = -3,25X^2 + 2,45X + 34,8, \quad (2)$$

где  $H$  – глубина залегания угольного пласта, м;  $X$  – метаноносность угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ .

**Определение необходимых расходов воздуха для проветривания очистных забоев действующего и проектируемого горизонтов шахты Мао Хе.** Данные исследований по метаноносности угольных пластов были использованы для прогноза метановыделения и расчета необходимых для проветривания количеств воздуха по фактуру метановыделения. Для их вычисления было использовано программное обеспечение, разработанное в Санкт-Петербургском горном университете на основе руководства по проектированию вентиляции угольных шахт [2, 14].

Результаты расчета необходимого количества воздуха в зависимости от производительности лавы и природной метаноносности представлены на рис.3. На рис.3 приведены значения необходимых количеств воздуха, рассчитанных по величине удельного количества воздуха, принятой в стандарте Вьетнама (QCVN01-2011, Министерство промышленности и торговли Вьетнама) и равной  $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$  для сверхкатегорийных шахт.

Анализ рис.3 показывает, что использование принятой во Вьетнаме величины

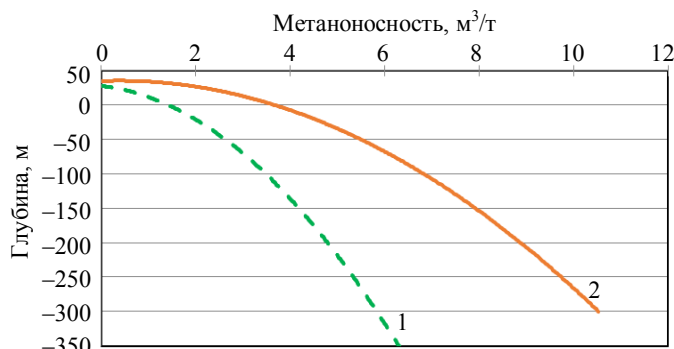


Рис.2. Результаты прогноза метаноносности пластов D7 (1) и D9 (2)

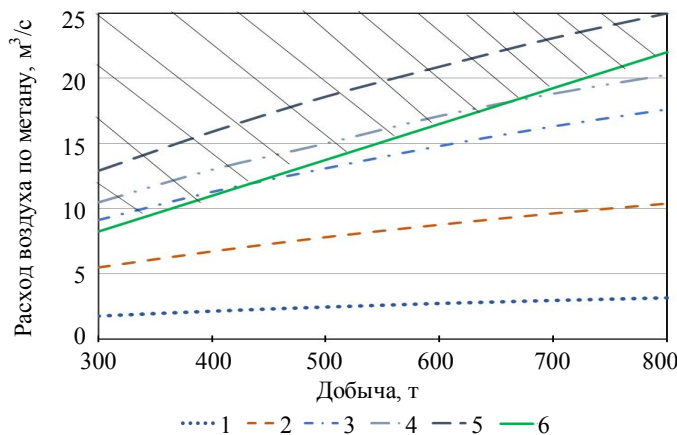


Рис.3. Зависимость необходимого количества воздуха по метану от метаноносности угольных пластов и производительности лавы  
1-5 – метаноносность равна соответственно 2; 6; 10; 12; 15  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  
6 – расчет по стандарту

удельного количества воздуха  $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , в одних случаях может привести к существенному превышению необходимых количеств воздуха, определенных с помощью руководства по проектированию вентиляции угольных шахт, а в других при метаноносности пластов, превышающей  $12 \text{ м}^3/\text{т}$ , наоборот, к более низким величинам. Это свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к определению необходимых количеств воздуха, учитывающих не только производительность очистных выработок, но и природную метаноносность угля.

**Математическое моделирование воздухораспределения в вентиляционной сети шахты Мао Хе.** Эффективность проветривания очистных выработок в значительной степени зависит от выбранной схемы вентиляции, параметров вентиляционного оборудования, в том числе вентиляторов главного проветривания, используемых для осуществления необходимого распределения воздуха регулирующих устройств [9, 16].

На шахте Мао Хе для обеспечения к 2020 г. планируемой годовой производительности 2 млн т необходима одновременная работа 11 лав и 15 подготовительных забоев. Для заданного распределения воздуха между очистными выработками предлагается использовать один из способов отрицательного регулирования, предполагающий установку в каждой воздухоподающей выработке выемочных участков вентиляционных регуляторов с изменяющимся аэродинамическим сопротивлением [16].

Для оценки целесообразности использования предлагаемого технического решения с помощью программного пакета «Вентиляция 2» [12] были разработаны математические модели вентиляционной сети шахты Мао Хе для условий ее эксплуатации в 2014 и 2020 годах.

На основании результатов математического моделирования показана возможность достижения заданного распределения воздуха по очистным выработкам как в настоящий момент времени, так и на период 2020 г.

Обработка данных математического моделирования дала возможность выявить функциональные связи между общим расходом воздуха, подаваемого в шахту, потребляемой ВГП мощностью и общим аэродинамическим сопротивлением (рис.4). Использование полученных зависимостей позволяет осуществить выбор рациональных режимов работы ВГП, при которых коэффициент полезного действия вентиляционной системы стремится к максимальному значению.

**Выбор рациональных способов управления вентиляционными режимами шахты Мао Хе.** Обобщение опыта проветривания угольных шахт Вьетнама показало, что при значительном числе очистных и подготовительных забоев и их обеспечении необходимым количеством воздуха вентиляторы главного проветривания имеют низкий коэффициент полезного действия, величина которого не превышает 0,3. Эти выводы подтверждены компьютерным моделированием системы вентиляции шахты.

В качестве показателя для характеристики эффективности вентиляционной системы шахты при значительном количестве источников потребления воздуха (большое количество очистных и подготовительных забоев) и необходимости продолжения эксплуатации имеющихся вентиляторов

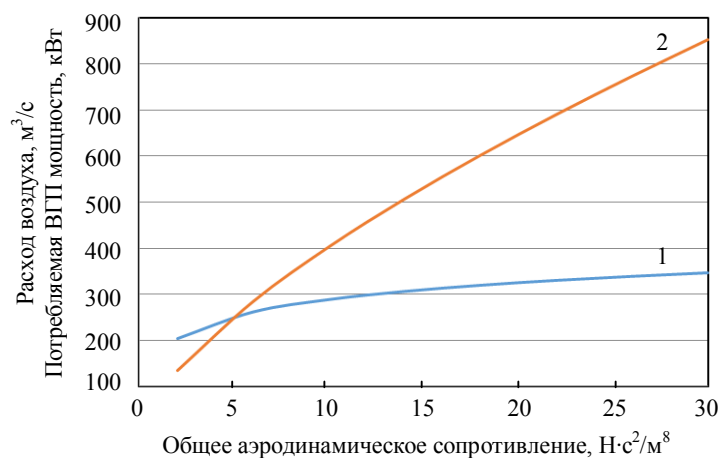


Рис.4. Зависимость расхода воздуха (1) и потребляемой ВГП мощности (2) от аэродинамического сопротивления вентиляционной сети для условий гор. –80/–150

главного проветривания предложен коэффициент, вычисляемый в результате суммирования коэффициента энергетической эффективности, определяемого делением мощности потребляемой вентиляторами главного проветривания на установленную мощность их двигателей и коэффициента полезного использования воздуха, равного отношению потребного количества воздуха к количеству воздуха, подаваемого в шахту вентиляторами главного проветривания.

При данном способе управления вентиляционным режимом одновременно с повышением коэффициента полезного действия вентиляторов, расход воздуха, поступающего в шахту, увеличивается и,



начиная с определенного значения, начинает превышать величину необходимого количества воздуха, т.е. снижается его полезное использование.

Оценку общей эффективности вентиляционных систем угольных шахт, на которых планируется использовать ранее установленное вентиляционное оборудование, предлагается осуществлять с помощью коэффициента эффективности вентиляционной системы, величина которого определяется зависимостью

$$K_{\text{эф.в.с}} = K_{\text{п.и}} + K_{\text{эф.эн}}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{п.и}}$  – коэффициент полезного использования воздуха;  $K_{\text{эф.эн}}$  – коэффициент энергетической эффективности;

$$K_{\text{п.и}} = Q_{\text{н}}/Q_{\text{п.в}}; \quad (4)$$

$Q_{\text{н}}$  – необходимое для проветривания шахты количество воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{\text{п.в}}$  – количество воздуха, подаваемое в шахту вентиляторами главного проветривания,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$$K_{\text{эф.эн}} = F(Q_{\text{п.в}}). \quad (5)$$

Поставив соотношения (4)-(5) в зависимость (3) и вычислив  $dK_{\text{эф.в.с}}/dQ_{\text{п.в}}$ , получим уравнение для определения  $Q_{\text{п.в}}$ , при котором значение  $K_{\text{эф.в.с}}$  достигает минимальной величины:

$$Q_{\text{н}}/Q_{\text{п.в}}^2 + dF(Q_{\text{п.в}})/dQ_{\text{п.в}} = 0. \quad (6)$$

Предложенная последовательность использована для вычисления расхода воздуха  $Q_{\text{п.в}}$ , при котором  $K_{\text{эф.в.с}}$  принимает минимальное значение для условий гор. –150 и –230 м шахты Мао Хе.

Графики зависимостей  $K_{\text{эф.эн}}(Q_{\text{п.в}})$  для вентиляционных систем гор. –150 и –230 м найдены в результате обработки данных математического моделирования вентиляционных систем этих рабочих горизонтов, осуществленных по программе «Вентиляция 2». Для гор. –150 и –230 м зависимости для расчета  $K_{\text{эф.эн}}$  могут быть представлены в виде (рис.5):

$$K_{\text{эф.эн}} = 10^{-9} \cdot Q_{\text{п.в}}^{3,48}; \quad K_{\text{эф.эн}} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot Q_{\text{п.в}}^{4,17}. \quad (7)$$

Решение уравнения (6) с учетом формул (7) дает следующие значения для  $Q_{\text{п.в.кр}}$ , при которых  $K_{\text{эф.в.с}}$  принимают минимальные значения для гор. –150 и –230 м:  $Q_{\text{п.в.кр}} = 264 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_{\text{п.в.кр}} = 257 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом необходимые расходы воздуха для этих горизонтов соответственно равны 225 и 256  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Таким образом, из анализа графиков на рис.5 следует, что для повышения эффективности системы вентиляции гор. –150 м и –230 м (увеличение коэффициента  $K_{\text{эф.в.с}}$ ) необходимо повысить производительность вентиляторов главного проветривания, т.е. увеличить количество воздуха, подаваемого в горные выработки, в пределах технических возможностей существующих ВГП.

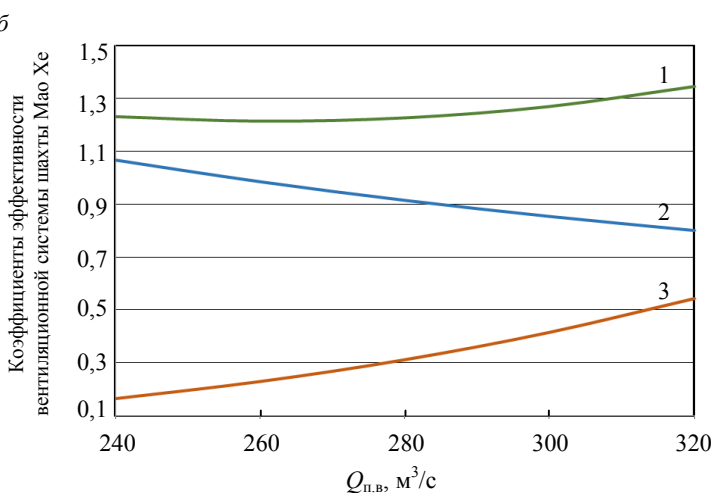
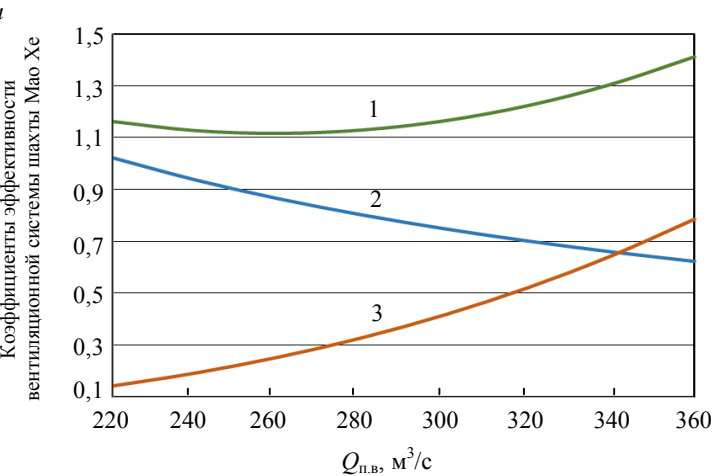


Рис.5. Значения эффективности вентиляционной системы при проветривании гор. –150 м (а) и гор. –230 м (б) для различного сочетания режимов работы вентиляторов главного проветривания  
1 –  $K_{\text{эф.в.с}}$ ; 2 –  $K_{\text{п.и}}$ ; 3 –  $K_{\text{эф.эн}}$

## Выводы

1. Особенностью подземной разработки угольных месторождений Вьетнама на ближайшую перспективу является повышение добычи не за счет сооружения новых шахт, а в результате уве-



личения глубины горных работ на действующих предприятиях, что приводит к увеличению количества очистных и подготовительных забоев, находящихся в одновременной работе.

2. Прогноз природной метаноносности угольных пластов, разрабатываемых шахтой Мао Хе, с увеличением глубины горных работ при корреляционном соотношении, соответствующим 0,99, может быть осуществлен на основе зависимостей параболического типа.

3. Величина необходимых количеств воздуха, рассчитанная по принятой в действующем стандарте Вьетнама величине относительной метанообильности, характеризующей категорию шахты по метану, должна уточняться с учетом различной природной метаноносности разрабатываемых угольных пластов, особенностей применяемых систем разработки, технологии и производительности очистных выработок.

4. Для математического моделирования аэродинамических процессов в сложных вентиляционных сетях шахты Мао Хе наиболее приемлемым является программный пакет «Вентиляция 2», рекомендованный для применения на угольных шахтах России.

5. Управление распределением воздуха в угольных шахтах Вьетнама со значительным количеством очистных забоев, находящихся в одновременной работе, может быть реализовано за счет изменения режимов работы вентиляторов главного проветривания и использования метода отрицательного регулирования, осуществляемого путем установки вентиляционных перемычек.

6. Для оценки эффективности вентиляционной системы шахты Мао Хе предложен коэффициент эффективности вентиляционной системы, определяемый суммированием коэффициентов полезного действия ВГП и полноты использования подаваемого воздуха для проветривания очистных забоев, на основании которого показано, что повышение эффективности проветривания связано с увеличением производительности ВГП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Ф.А.* Методы и алгоритмы централизованного контроля и управления проветриванием шахт / Ф.А.Абрамов, Р.Б.Тян. Киев: Наукова думка, 1973. 184 с.
2. *Васильев А.В.* Задачник по подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых / А.В.Васильев, В.П.Зубов, К.Г.Синопальников // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. 377 с.
3. *Гендлер С.Г.* Исследование природной метаноносности угольной толщи и метанообильности шахты Мао Хе (Вьетнам) / С.Г.Гендлер, Нгуен Тхе Ха // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. Специальный выпуск № 7. С. 39-46.
4. *Зубов В.П.* Практический опыт использования систем разработки мощных крутых пластов в условиях бассейна Куанг Нинь / В.П.Зубов, К.К.Вьет // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 10-14.
5. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М.: Недра, 1977. 96 с.
6. *Круглов Ю.В.* Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей / Ю.В.Круглов, А.Г.Исаевич, Л.Ю.Левин // Изв. вузов. Горный журнал. 2006. № 5. С. 32-37.
7. *Левин Л.Ю.* Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность / Л.Ю.Левин, Ю.В.Круглов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 39-48.
8. *Мальшев Ю.Н.* Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н.Мальшев, К.Н.Трубецкой, А.Т.Айруни. М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. 535 с.
9. *Милетич А.Ф.* Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт. М.: Недра, 1968. 146 с.
10. *Нгуен Тхе Ха.* Основные направления совершенствования проветривания угольных шахт Вьетнама (на примере шахты Мао Хе) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 11. С. 403-407.
11. *Осинцева А.В.* Оптимизация регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника // Сб. трудов XI межрегиональной научно-практ. конф. Апатиты: Изд-во КФ ПетрГУ. 2008. С. 90-91.
12. *Палеев Д.Ю.* Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д.Ю.Палеев, О.Ю.Лукашов, В.Н.Костеренко. М.: Изд-во «Горное дело», 2011. 160 с.
13. *Потемкин В.Я.* Метод декомпозиции сетевых законов для оптимизации потокораспределения в шахтных вентиляционных сетях / В.Я.Потемкин, М.П.Комаров // Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах: Сб. научных трудов ИГД СО АН СССР. Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1977. С. 50-52.
14. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Макеевка-Донбасс, 1989. 320 с.
15. *Тян Р.Б.* Управление проветриванием шахт / Р.Б.Тян, В.Я.Потемкин. Киев: Наукова думка, 1977. 200 с.
16. *Шепелев С.Ф.* Современный комплекс рудничных воздухорегулирующих средств. Алма-Ата: Наука, 1971. 166 с.
17. *Цой С.* Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, 1975. 335 с.
18. *Saras S.A.* combined method for the analysis of mine ventilation network // The Journal of the SAIMM, 2000. № 4. P. 371-374. URL: [www.saimm.co.za/Journal/v100n06p371.pdf](http://www.saimm.co.za/Journal/v100n06p371.pdf). (дата обращения 8.03.16).
19. The practical handbook of genetic algorithms: applications / Ed. by Lance D.Chambers. London, New York : CRC Press, 2001. 520 p.



20. Viet C.Q. Need of development of technological mining in the coalseams with backfill in Vietnam // Scientific reports on resource issues. 2013. Vol. 1. Part I (International University of Resources). P. 126-129.
21. Whitley D.A. A genetic algorithm tutorial // Comp. science dep. Colorado State University, 1995. 37 p. URL: [www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf](http://www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf). (дата обращения: 09.05.17).
22. Yang Z.A. The optimal design and operation of multi-level fan ventilation systems / Z.A.Yang, I.S.Lowndes, B.Denby // Proc. of the 7-th International Mine Ventilation Congress. Cracow: EMAG, 2001. p. 739-745. URL: <http://www.immagine.org/abstract1000.asp?Line1=7600077002>. (дата обращения 12.04.2017).

**Авторы:** **С.Г.Гендлер**, *д-р техн. наук, профессор, [sgendler@mail.ru](mailto:sgendler@mail.ru) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)*, **Нгуен Тхе Ха**, *канд. техн. наук, заведующий кафедрой, [haxdmhn@gmail.com](mailto:haxdmhn@gmail.com) (Горный колледж, провинция Куангнинь, Вьетнам)*.

*Статья поступила в редакцию 17.01.2018.*

*Статья принята к публикации 22.05.2018.*