

# Метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности шахтных вентиляционных систем

В.К. Ушаков✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». г. Москва, Российская Федерация

✉vk.ushakov@isis.ru

**Резюме:** Повышение надежности и эффективности функционирования шахтных вентиляционных систем представляет собой одну из наиболее актуальных и сложных проблем при обеспечении безопасности горного производства. На первом этапе повышения надежности и эффективности функционирования шахтной вентиляционной системы применяется разработанный метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности системы («тактический метод»), позволяющий повысить восстанавливаемость системы без корректировки ее базового варианта. В результате повышаются как коэффициент готовности шахтной вентиляционной системы (вследствие уменьшения средней продолжительности восстановления), так и добыча из лав (вследствие снижения их простоев по фактору вентиляции). Тактический метод применяется в процессе моделирования базового варианта шахтной вентиляционной системы для выбора мероприятий, обеспечивающих рациональную тактику устранения текущих отказов системы, т.е. периодических нарушений требуемого воздухораспределения.

Алгоритм тактического метода базируется на оптимальном регулировании воздухораспределения с помощью динамически выбираемых тактических мероприятий и с учетом продолжительности их проведения. На этапе повышения надежности и эффективности функционирования шахтных вентиляционных систем путем применения тактического метода реализуется тактика рационального выбора мест и приоритета проведения мероприятий по устранению отказов, основанная на сегментации шахтной вентиляционной системы и использовании тактических правил. Списки предполагаемых тактических мероприятий задаются в виде матриц влияющих ветвей. Сначала выбираются самые короткие из предполагаемых мероприятий и осуществляется регулирование воздухораспределения с имитацией этих мероприятий. Для тех из выбранных мероприятий, которые потребовались при регулировании, подсчитываются затраты на их проведение, а недействующие исключаются из списка предполагаемых мероприятий. Выполнение алгоритма тактического метода завершается либо при восстановлении работоспособности шахтной вентиляционной системы, либо по исчерпанию списка предполагаемых тактических мероприятий, выбираемых при неизменной структуре шахтной вентиляционной системы.

Результатом повышения восстанавливаемости шахтных вентиляционных систем является как повышение безопасности горного производства по фактору вентиляции, так и обеспечение комфортных условий труда шахтеров.

**Ключевые слова:** безопасность горного производства по фактору вентиляции, комфортные условия труда шахтеров, шахтная вентиляционная система, надежность и эффективность вентиляции, оптимальное регулирование воздухораспределения

**Для цитирования:** Ушаков В.К. Метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности шахтных вентиляционных систем. *Горная промышленность*. 2023;(5):114–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-114-118>

## A method for selecting a rational approach to restoring the performance of mine ventilation systems

V.K. Ushakov✉

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉vk.ushakov@isis.ru

**Abstract:** Enhancing the reliability and efficiency of mine ventilation systems is one of the most urgent and complex tasks in ensuring the safety of mining operations. During the first stage of improving the reliability and efficiency of mine ventilation systems the developed method of selecting a rational approach to restoring the system performance (the 'tactical' method) is used, which allows to increase the recoverability of the system without changing its baseline configuration. This results in improving of both the availability ratio of the mine ventilation systems due to a decrease in the average recovery time, and the longwall production rates because of decreasing downtime due to the ventilation factor. The 'tactical' method is used in the process of modeling the base case of mine ventilation systems to select measures that would ensure rational strategies to address current failures of the system, i.e. recurrent disturbances of the required air distribution modes.

The algorithm of the 'tactical' method is based on the optimal control of air distribution with the help of dynamically selected tactical measures with due account for the duration of their implementation. The stage of improving the reliability and efficiency of mine ventilation systems by applying the 'tactical' method involves implementation of the approach to rationally select the locations and priorities of measures to address the failures based on segmentation of the mine ventilation systems and the use

of tactical rules. The lists of proposed tactical measures are designed as influence matrices. Initially, the shortest of the proposed measures are selected and the air distribution is controlled using simulation of these measures. For those of the selected measures that were required for regulation, the costs of their implementation are calculated, and those that were not used are excluded from the list of the proposed measures. Execution of the 'tactical' method algorithm is completed either when the operation of the mine ventilation systems is restored, or when the list of suggested tactical measures, selected with the unchanged structure of the mine ventilation systems, is exhausted.

Enhanced recoverability of the mine ventilation systems results in both increased safety of mining operations in terms of the ventilation factor and ensuring comfortable working conditions for the miners.

**Keywords:** safety of mining production by ventilation factor, comfortable working conditions of miners, mine ventilation system, reliability and efficiency of ventilation, optimal regulation of air distribution

**For citation:** Ushakov V.K. A method for selecting a rational approach to restoring the performance of mine ventilation systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):114–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-114-118>

## Введение

Обеспечение безопасных и комфортных условий труда шахтеров по фактору вентиляции основывается на системном подходе с учетом всех рисков [1] в условиях современных требований к риск-ориентированному подходу [2; 3]. Исследования по данному направлению являются приоритетными в Московском горном институте и являются продолжением работ К.З. Ушакова [4]. Аэрологическая безопасность горного производства достигается в первую очередь надежностью и эффективностью функционирования (НЭФ) шахтной вентиляционной системы (ШВС) [5] с учетом правил по устранению отказов [6].

Методы повышения надежности и эффективности любой сложной иерархической технической системы базируются на принципах рациональной тактики восстановления системы и ее стратегической модификации [7].

Актуальность проблемы повышения надежности и эффективности проветривания, а также оптимального управления ШВС обусловила целый ряд научных исследований и за рубежом, особенно интенсивно данная проблема анализируется в Китае [8].

Настоящая статья посвящена методу выбора рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС («тактическому методу»). Этот метод позволяет повысить восстанавливаемость системы без корректировки ее базового варианта. В результате сокращается время восстановления, снижаются затраты на устранение отказов и повышается общая эффективность горных работ.

## Метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС

Алгоритм тактического метода базируется на оптимальном регулировании воздухораспределения с помощью динамически выбираемых тактических мероприятий и с учетом продолжительности их проведения. Тактический метод применяется в процессе моделирования базового варианта ШВС при устранении отказов системы (нарушений требуемого воздухораспределения). В предлагаемом методе повышения НЭФ ШВС реализуется тактика рационального выбора мест и приоритета проведения мероприятий по устранению отказов, основанная на сегментации ШВС [7] и использовании тактических правил [6].

Алгоритм тактического метода состоит из следующих шагов (рис. 1).

**Шаг 1.** Рассчитать воздухораспределение в сети  $\bar{Q}(t_i)$  и выполнить сегментацию ШВС. При наличии отказов потребителей определить их характеристики и последствия и перейти к шагу 2, а при отсутствии отказов – закончить выполнение алгоритма (блоки №1–4 на рис. 1).

**Шаг 2.** Выявить на основе сегментации ШВС ветви-диагонали и ветви-утечки и организовать их в виде матрицы  $D_{diag}$  [5; 7] (блок №5).

**Шаг 3.** Выполнить регулирование воздухораспределения с помощью имеющихся РРВ. В список  $t_j(n_b)$  моментов завершения неоконченных ремонтов разрушенных элементов и мероприятий по устранению предыдущих отказов добавить моменты завершения выставления сопротивлений задействованных РРВ. Если отказы устранены, то закончить выполнение алгоритма. Иначе перейти к шагу 4 (блоки №6–7).

**Шаг 4.** Классифицировать потребителей по виду отказа. Сформировать списки «дефицитных» потребителей (в которых имеет место дефицит воздуха)  $defic(n_{pod})$  и «избыточных» потребителей (в которых имеет место избыток воздуха)  $plent(n_{pod})$  [6]. Номерам «загрязняемых» потребителей (путем запрещенного по ПБ последовательного проветривания потребителей) соответствуют номера тех строк матрицы  $D_{diag}$ , в которых имеется хотя бы один отрицательный элемент [5]. Выбрать влияющие ветви, в которых предполагается проведение тактических мероприятий. Списки тактических мероприятий организовать в виде матриц влияющих ветвей  $defvc, defew, deff, plenvc, upsvc$  и  $upsew$  [6] (блоки №8–9).

**Шаг 5.** Определить момент окончания самых коротких из предполагаемых мероприятий. Проверить, завершены ли к этому моменту неоконченные ремонты или мероприятия по устранению предыдущих отказов. Если нет, то перейти к шагу 7. Иначе имитировать завершение неоконченных ремонтов и мероприятий. Рассчитать  $\bar{Q}(t_m)$  и в случае необходимости выполнить его регулирование. Скорректировать список  $t_j$  добавлением в него моментов завершения выставления сопротивлений задействованных РРВ. Если отказы устранены, то закончить выполнение алгоритма. Иначе перейти к шагу 6 (блоки №10–15).

**Шаг 6.** Проверить, появились ли восстановленные потребители. Если нет, то перейти к шагу 7. Иначе исключить восстановленные потребители из списков отказавших потребителей. Скорректировать списки предполагаемых мероприятий. Если списки мероприятий исчерпаны, то закончить выполнение алгоритма (восстановить работоспособность системы невозможно с помощью только тактических мероприятий, т.е. при существующей структуре ШВС). Иначе перейти к шагу 5 для определения момента окончания самых коротких из оставшихся мероприятий (блоки №16–18).

**Шаг 7.** Выбрать самые короткие из предполагаемых мероприятий. Выбранные мероприятия классифицировать по их виду (установка новых вентсооружений, расширение

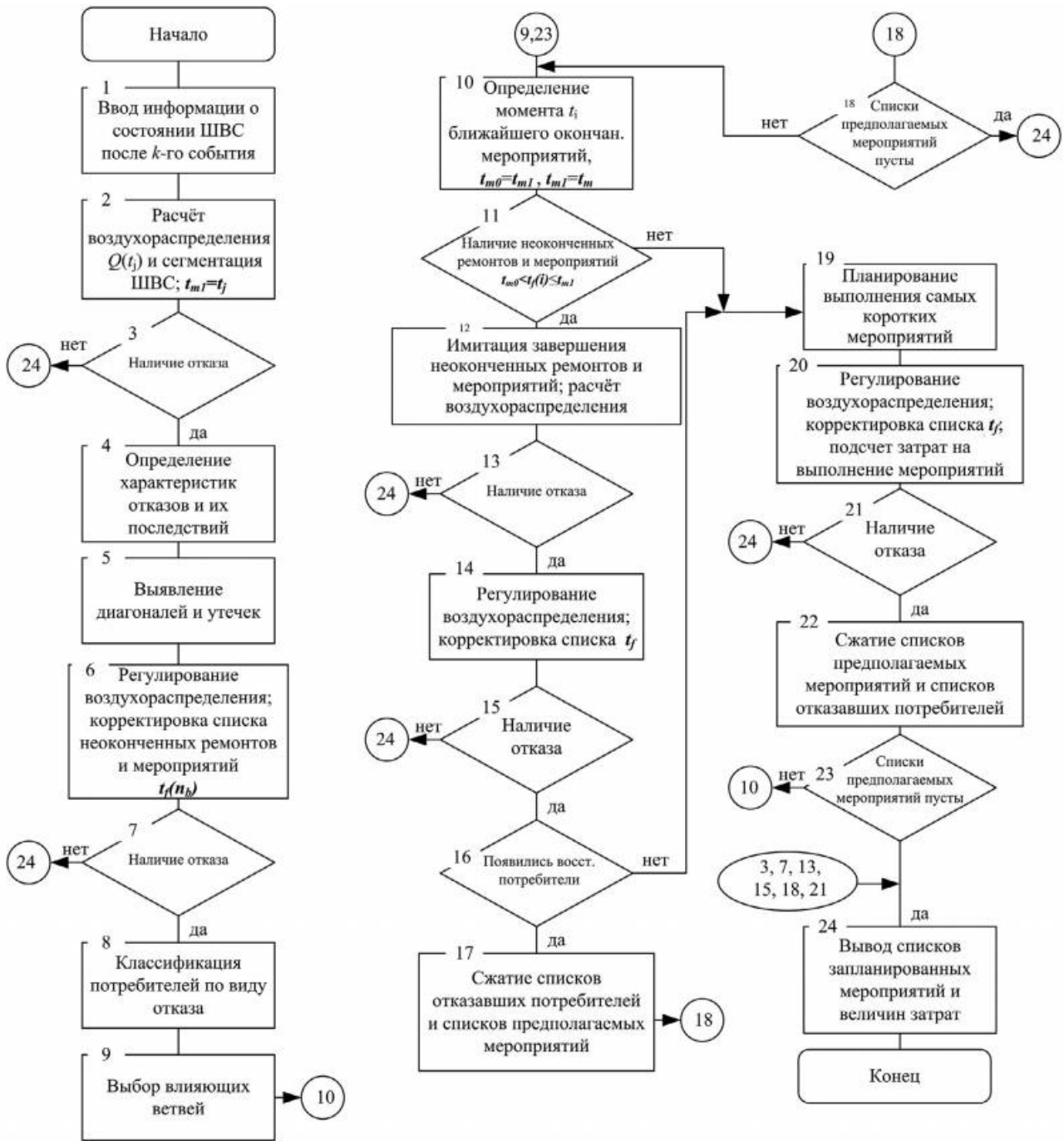


Рис. 1  
Блок-схема алгоритма рациональной тактики восстановления работоспособности шахтных вентиляционных систем

Fig. 1  
A block diagram showing the algorithm to select a rational approach to restoring the performance of mine ventilation systems

выработок и форсирование ГВ) и записать в соответствующие списки  $vcI$ ,  $ewI$ ,  $ffI$  (блок №19).

**Шаг 8.** Выполнить регулирование воздухораспределения  $Q(t_m)$ . При этом добавляются РРВ в ветвях из списка  $vcI$ , расширяются выработки в ветвях из списка  $ewI$  и форсируются ГВ из списка  $ffI$ . Подсчитать затраты на выполнение мероприятий. Скорректировать список  $t_f$  добавлением в него моментов завершения запланированных мероприятий, а также выставления сопротивлений задействованных РРВ. Если отказы устранены, то закончить выполнение алгоритма (этих мероприятий оказалось достаточно для восстановления работоспособности ШВС). Иначе скорректировать списки мероприятий, исключая уже запланированные мероприятия. Скорректировать список отказавших

потребителей. Если списки предполагаемых мероприятий исчерпаны, то закончить выполнение алгоритма (восстановить работоспособность ШВС с помощью только тактических мероприятий невозможно). В противном случае перейти к шагу 5 для определения момента окончания самых коротких из оставшихся мероприятий (блоки №20–23).

**Шаг 9.** Выдать списки запланированных в итоге тактических мероприятий, а также величины затрат на их выполнение (блок №24).

Таким образом, выполнение алгоритма тактического метода завершается либо при восстановлении работоспособности ШВС, либо по исчерпанию всех возможных тактических мероприятий по устранению отказов, выбираемых при неизменной структуре ШВС.



### Результаты применения метода выбора рациональной тактики восстановления работоспособности реальной ШВС

Реальная ШВС имела одиннадцать потребителей воздуха: 1) четыре лавы; 2) три вентилятора местного проветривания (ВМП); 3) четыре камеры различного назначения: склад взрывчатых материалов (ВМ), насосная камера, электровозные гаражи. В соответствии с сегментацией ШВС и тактическими правилами были выбраны места установки девятнадцати РРВ – ветви-отводы сегментов.

### Обсуждение результатов применения метода выбора рациональной тактики восстановления работоспособности реальной ШВС

Моделирование данной ШВС показало следующее. Существующее на шахте множество РРВ даже при работе ГВ в наиболее «мощном» режиме не позволяет полностью обеспечить требуемое воздухораспределение. Предложенное же регулирование РРВ, выбранными с помощью тактического метода на основе сегментации ШВС и тактических правил, обеспечивает требуемое воздухораспределение даже при менее «мощном» режиме работы ГВ, что, с одной стороны, позволяет удовлетворить требованиям ПБ, а с другой – снизить расход потребляемой ГВ электроэнергии почти на 20%.

### Предложения по направлению будущих исследований

Направлением будущих исследований является разработка метода повышения НЭФ ШВС путем формирования стратегии модификации базового варианта системы («стратегического метода»), что позволит устранить в нем «узкие места». В результате увеличивается продолжительность безотказной работы, сокращается время восстановления и, следовательно, снижаются потери, обусловленные ненадежностью вентиляции. Это позволит определять приоритеты проведения стратегических мероприятий по модификации базового варианта ШВС. В системах авто-

матизации проветривания [9] также может быть использован предлагаемый метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС. В перспективе возможна реализация этого метода и в интеллектуальных системах управления воздухораспределением в шахте по аналогии с решениями [10], и в специализированном программном обеспечении [11].

На угольных шахтах России существуют и более сложные схемы проветривания [12]. Однако такие ШВС являются исключением, для них требуется отдельная научная проработка тактики восстановления их работоспособности.

Также существуют методы принятия решений по управлению расходом воздуха вентиляционной сети, основанные на итерационной связи между параметрами состояния воздуха и его расходом [13]. В исследовании [14] были внедрены альтернативные решения в случае отказа для поддержания заданного фиксированного количества воздуха на рабочем месте в шахтной вентиляционной сети. Используя современные методы компьютерного моделирования [15], можно также расширить спектр решаемых задач по улучшению проветривания с добавлением искусственного интеллекта.

### Заключение

Разработан метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС путем оптимального регулирования воздухораспределения с помощью динамически выбираемых тактических мероприятий и с учетом продолжительности их проведения. На этапе повышения НЭФ ШВС реализуется тактика рационального выбора мест и приоритета проведения мероприятий по устранению отказов, основанная на сегментации ШВС и использовании тактических правил.

Результатом повышения восстанавливаемости ШВС является как повышение безопасности горного производства по фактору вентиляции, так и обеспечение комфортных условий труда шахтеров.

### Список литературы

1. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Кобылкин С.С. Естественнонаучный анализ рисков развития кризисных процессов. *Горный журнал*. 2015;(5):4–7. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.05.01>
2. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А., Самаров Л.Ю., Хомяков Д.О. Развитие риск-ориентированного подхода для выбора приоритетных направлений снижения производственного травматизма в АО «СУЭК-Кузбасс». *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(1):64–76.
3. Баловцев С.В. Сравнительная оценка аэрологических рисков на действующих угольных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):5–17. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-5-17>
4. Ушаков К.З., Скопинцева О.В. Повышение надежности шахтной вентиляционной системы с учетом перспективы её развития. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1992;(1):26.
5. Ушаков В.К. Алгоритм выявления ветвей-диагоналей в шахтных вентиляционных системах для обеспечения аэрологической безопасности труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):147–155. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155>
6. Ушаков В.К. Тактические правила по устранению отказов в шахтных вентиляционных системах для управления аэрологической безопасностью. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4):5–15. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_4\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_5)
7. Ушаков В.К. Динамическая иерархическая сегментация шахтных вентиляционных систем при моделировании способов повышения аэрологической безопасности труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(12):76–85. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-76-85>
8. Zhou L., Zhou L., Thomas R.A., Yuan L., Bahrami D. Experimental study of improving a mine ventilation network model using continuously monitored airflow. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022;39(3):887–895. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00574-4>

9. Levin L.Yu., Semin M. Conception of automated ventilation control system and its implementation in Belarussian potash mines. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium, June 2017, Golden*. Colorado, USA; 2017, pp. 1–8.
10. Su S., Ouyang M. Intelligent ventilation management method of coal mine based on rough set and improved capsule network. *Coal Science and Technology (Peking)*. 2021;49(7):124–132. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.07.017>
11. Liu H., Mao S., Li M., Lyu P. 3D online mine ventilation simulation system based on GIS. In: Wang X., Leung V.C.M., Li K., Zhang H., Hu X., Liu Q. (eds) *6GN for Future Wireless Networks. 6GN 2020. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 337. Springer, Cham; 2020, pp. 485–494. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63941-9\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63941-9_41)
12. Кобылкин С.С., Харисов А.Р. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки. *Записки Горного Института*. 2020;245:531–538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.4>
13. Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2021;50(4):613–623.
14. El-Nagdy K.A., Shoaib A.M. Alternate solutions for mine ventilation network to keep a pre-assigned fixed quantity in a working place. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2015;2(4):269–278. <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0094-x>
15. Novella-Rodriguez D.-F., Witrant E., Commault C.C. Physical modeling and structural properties of small-scale mine ventilation networks. *Mathematics*. 2022;10(8):1253. <https://doi.org/10.3390/math10081253>

## References

1. Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.A. Natural science-based analysis of risk of recession. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(5):4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.05.01>
2. Gendler S.G., Prokhorova E.A., Samarov L.Yu., Khomyakov D.O. Development of a risk-based approach for selecting priority areas for reducing occupational injuries in SUEK-Kuzbass JSC. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(1):64–76. (In Russ.)
3. Balovtsev S.V. Comparative assessment of aerological risks at operating coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-5-17>
4. Ushakov K.Z., Skopintseva O.V. Improving the reliability of the mine ventilation system, taking into account the prospects for its development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1992;(1):26. (In Russ.)
5. Ushakov V.K. Identification algorithm of diagonal branches in mine ventilation systems for higher safety in operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):147–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155>
6. Ushakov V.K. Tactics of mine ventilation failure restoration toward safe atmosphere control. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4):5–15. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_4\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_5)
7. Fedotenko V.S., Strukov K.I., Berger R.V. Prospects of high benching in hybrid mining of the Svetlinskoe gold deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(12):76–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-76-85>
8. Zhou L., Zhou L., Thomas R.A., Yuan L., Bahrami D. Experimental study of improving a mine ventilation network model using continuously monitored airflow. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022;39(3):887–895. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00574-4>
9. Levin L.Yu., Semin M. Conception of automated ventilation control system and its implementation in Belarussian potash mines. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium, June 2017, Golden*. Colorado, USA; 2017, pp. 1–8.
10. Su S., Ouyang M. Intelligent ventilation management method of coal mine based on rough set and improved capsule network. *Coal Science and Technology (Peking)*. 2021;49(7):124–132. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.07.017>
11. Liu H., Mao S., Li M., Lyu P. 3D online mine ventilation simulation system based on GIS. In: Wang X., Leung V.C.M., Li K., Zhang H., Hu X., Liu Q. (eds) *6GN for Future Wireless Networks. 6GN 2020. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 337. Springer, Cham; 2020, pp. 485–494. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63941-9\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63941-9_41)
12. Kobylkin S.S., Kharisov A.R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. *Journal of Mining Institute*. 2020;245:531–538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.4>
13. Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2021;50(4):613–623.
14. El-Nagdy K.A., Shoaib A.M. Alternate solutions for mine ventilation network to keep a pre-assigned fixed quantity in a working place. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2015;2(4):269–278. <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0094-x>
15. Novella-Rodriguez D.-F., Witrant E., Commault C.C. Physical modeling and structural properties of small-scale mine ventilation networks. *Mathematics*. 2022;10(8):1253. <https://doi.org/10.3390/math10081253>

### Информация об авторе

**Ушаков Владимир Кимович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vk.usakov@misis.ru

### Information about the author

**Vladimir K. Ushakov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor at the Department of Mathematics, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: vk.usakov@misis.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.08.2023  
 Поступила после рецензирования: 23.08.2023  
 Принята к публикации: 28.08.2023

### Article info

Received: 01.08.2023  
 Revised: 23.08.2023  
 Accepted: 28.08.2023