

# ТАКТИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА ПО УСТРАНЕНИЮ ОТКАЗОВ В ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

В.К. Ушаков

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: vk.usakov@misis.ru

**Аннотация:** Управление аэрологической безопасностью в шахтах заключается в повышении надежности и эффективности функционирования (НЭФ) шахтных вентиляционных систем (ШВС). На первом этапе повышения НЭФ ШВС применяется рациональная тактика восстановления работоспособности системы. В рамках задачи разработки тактического метода выбора мероприятий, обеспечивающих рациональную тактику устранения текущих отказов системы, сформулированы т.н. тактические правила, которые классифицированы на две группы: тактические правила устранения внезапных отказов; тактические правила устранения постепенных отказов. Правила первой группы заключаются в выборе мероприятий по ремонту разрушенных на момент отказа элементов ШВС (ремонт разрушенных вентсооружений, устранение обрушений выработок, запуск остановившихся главных вентиляторов (ГВ)), при этом также выявляется наличие неоконченных ремонтов разрушенных элементов. Правила устранения постепенных отказов регулируют выбор мероприятий по установке новых вентсооружений, расширению и перекреплению выработок, форсированию режима работы ГВ. В соответствии с нормативными документами применяется тактическое правило выбора ветвей-отводов сегментов ШВС в качестве мест проведения тактических мероприятий. Для уменьшения количества требуемых мероприятий применяются правила, отражающие эвристический принцип уменьшения взаимного влияния при рассмотрении все более удаленных ветвей. Сформулированные тактические правила и построенные на их основе матрицы влияющих ветвей позволяют определить как места, так и приоритет проведения тактических мероприятий. Результатом повышения восстанавливаемости ШВС является повышение безопасности горного производства по фактору вентиляции и обеспечение комфортных условий труда шахтеров.

**Ключевые слова:** безопасные и комфортные условия труда шахтеров, шахтная вентиляционная система, надежность и эффективность, принцип рациональной тактики восстановления работоспособности, выбор тактических мероприятий, тактические правила, матрицы влияющих ветвей.

**Для цитирования:** Ушаков В.К. Тактические правила по устранению отказов в шахтных вентиляционных системах для управления аэрологической безопасностью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_4\_0\_5.

---

## Tactics of mine ventilation failure restoration toward safe atmosphere control

V.K. Ushakov

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: vk.usakov@misis.ru

---

**Abstract:** Safe atmosphere control in mines is aimed at improvement of reliability and operating efficiency (ROE) of mine ventilation systems (MVS). The early tactics of ROE improvement is recovery of an MVS. In the framework of development of a tactics to select a rational failure restoration method, some rules were formulated and classified into two groups: (1) tactical rules for random failure restoration and (2) tactical rules for degradation failure restoration. The first group rules administer selection of repair procedures for MVS components broken by the moment of failure (repair of broken ventilation structures, removal of rockfalls in tunnels, actuation of broken-down main fans), with simultaneous detection of imperfect repair of broken elements. The degradation failure restoration rules govern selection of measures on erection of new ventilation structures, widening of underground excavation or installation of new support systems, or boosting of main ventilation fans. In compliance with the regulatory documents, the rule of selecting branches–drip legs of MVS segments is chosen as a tactical measure. In order to reduce the number of the required measures, the rules based on heuristical principle of minimizing the cross-effect of the farthest branches are applied. The formulated tactical rules and the related matrices of the influence branches make it possible to identify both the sites and the priority of tactical measures to be implemented. The increase in the recoverability of MVS results in the enhanced safety of mining operations by the criterion of airing, and in the mine personnel comfort.

**Key words:** mine personnel safety and comfort, mine ventilation system, reliability and efficiency, principle of rational tactics of serviceability recovery, selection of tactical measures, tactical rules, matrices of influence branches.

**For citation:** Ushakov V. K. Tactics of mine ventilation failure restoration toward safe atmosphere control. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_4\_0\_5.

---

### Введение

Оптимальное управление проветриванием должно базироваться на научно-обоснованных решениях с учетом системного подхода [1], развиваемого научной школой Горного института НИТУ «МИСиС» [2]. Безопасные и комфортные условия труда шахтеров обеспечиваются, в первую очередь, надежностью и эффективностью функционирования (НЭФ) шахтной вентиляционной системы (ШВС), а также оперативностью управления [3–6].

Вопросами оперативного управления ШВС активно занимаются специалисты как за рубежом [7–11], так и в России [12, 13].

Как отмечалось ранее [3], методы повышения надежности и эффективности любой сложной иерархической технической системы базируются на принципах рациональной тактики восстановления системы и ее стратегической модификации.

Выбор рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС

позволяет повысить восстанавливаемость системы без изменения топологии сети. В результате сокращается время восстановления, снижаются затраты на устранение отказов и повышается общая эффективность горных работ.

Основной рациональной тактики восстановления работоспособности системы является имитационное моделирование ШВС с анализом вариантов устранения текущих отказов (нарушений требуемого воздухораспределения).

Все вышесказанное обусловило актуальность разработки тактических правил по устранению отказов ШВС для управления аэрологической безопасностью горного производства.

### **Тактические правила выбора мероприятий по устранению текущих отказов**

Мероприятия по устранению отказов выбираются на основе анализа состояния ШВС в момент отказа  $t_j$ . Для каждого потребителя воздуха проверяется, удовлетворяет ли величина расхода воздуха в нем интервалу допустимых по Правилам безопасности (ПБ) значений, а также выявляется наличие последовательного проветривания потребителей. Затем составляются список кодов отказов потребителей  $K_{ref}(n_{pot})$  (где  $n_{pot}$  — количество потребителей) и матрица ветвей-диагоналей  $D_{diag}(n_{pot}, n_{diag})$ , содержащая номера ветвей, в которых при регулировании должны быть обеспечены требуемые направления движения воздуха [3, 14].

Список  $K_{ref}(n_{pot})$  и матрица  $D_{diag}(n_{pot}, n_{diag})$  характеризуют состояние ШВС в момент отказа и являются исходной информацией при применении тактических правил выбора мероприятий по устранению текущих отказов. Тактические правила составляются на основе эвристических рекомендаций, приводимых в нормативной литературе [15], и опре-

деляют условия применения того или иного способа восстановления требуемого воздухораспределения, т.е. работоспособного состояния ШВС.

В первую очередь, в дополнение к регулированию воздухораспределения имеющимися регуляторами расхода воздуха (РРВ) добавляются мероприятия по ремонту разрушенных на момент отказа  $t_j$  элементов, т.е. тактические правила устранения внезапных отказов следующие: ремонт разрушенных вентсооружений; устранение обрушений выработок; запуск остановившихся главных вентиляторов (ГВ). При этом также выявляется наличие в момент  $t_j$  неоконченных ремонтов разрушенных элементов.

Затем выбираются мероприятия по устранению постепенных отказов, вызванных постепенными изменениями ШВС, поскольку, во-первых, завершения ремонтов разрушенных элементов может оказаться недостаточно для восстановления требуемого воздухораспределения и, во-вторых, некоторые из этих мероприятий могут оказаться более оперативными, чем ремонты. Мероприятия по устранению постепенных отказов представляют собой установку новых вентсооружений, расширение и укрепление выработок и форсирование режима работы ГВ.

Основная проблема заключается в рациональном выборе мест проведения этих мероприятий. Предлагаемые тактические правила обеспечивают в динамике рациональный выбор мест установки новых вентсооружений, расширения выработок и форсируемых ГВ на основе предварительно выполненной иерархической сегментации ШВС [3].

В результате сегментации все потребители ШВС оказываются сгруппированными в иерархически организованную совокупность сегментов различных уровней, и для каждого сегмента опре-

делены ветви-подводы и ветви-отводы. Изменение аэродинамических параметров этих ветвей позволяет перераспределять воздух между различными группами потребителей. Однако включение всех этих ветвей в список мест проведения тактических мероприятий может привести к значительным затратам. По этой причине в дальнейшем в соответствии с нормативными документами в качестве мест проведения тактических мероприятий рассматриваются только ветви-отводы сегментов, что позволяет примерно вдвое уменьшить количество этих мероприятий и соответственно сократить затраты на их проведение.

Тактические правила выбора мероприятий по устранению постепенных отказов заключаются в следующем.

Сначала выполняется сегментация ШВС по прохождению исходящей струи. В качестве мест проведения тактических мероприятий выбираются ветви-отводы сегментов. Для сегмента  $k$ -го уровня это ветви, начальный и конечный узлы которых принадлежат соответственно сегменту  $k$ -го уровня и сегменту  $k+1$ -го уровня. Изменение аэродинамических параметров этих ветвей-отводов позволяет перераспределять воздух между сегментами  $k$ -го уровня, входящими в один сегмент  $k+1$ -го уровня.

Таким образом, тактическое правило выбора в качестве мест проведения тактических мероприятий ветвей-отводов сегментов позволяет определить те ветви сети, в которых для устранения данного отказа целесообразно установить новые вентсооружения типа РРВ, расширить выработку или форсировать режим работы ГВ (для ветвей-вентиляторов). Требуемые новые значения аэродинамических параметров ветвей-отводов определяются путем решения задачи регулирования воздушораспределения. При этом используется уже расширенное множество регуляторов, вклю-

чающее в себя, кроме имеющихся ранее РРВ, еще и ветви-отводы.

Для дальнейшего уменьшения количества требуемых тактических мероприятий и, соответственно, затрат на устранение отказов предлагается добавлять к имеющимся РРВ все ветви-отводы не сразу, а постепенно, начиная с тех, влияние параметров которых на отказавшие потребители наиболее существенно. При этом применяются тактические правила, отражающие эвристический принцип уменьшения взаимного влияния при рассмотрении все более удаленных друг от друга ветвей.

Суть этих тактических правил в следующем. Сначала все отказавшие потребители в соответствии с их кодами отказов  $K_{ref}(n_{pot})$  классифицируются по виду отказа, и составляются следующие списки:  $defic(n_{pot})$  – список т.н. «дефицитных» потребителей, т.е. потребителей, в которых имеет место дефицит воздуха –  $Q(t_i) < Q^{min}$ ;  $plent(n_{pot})$  – список т.н. «избыточных» потребителей, т.е. потребителей, в которых имеет место избыток воздуха –  $Q(t_i) > Q^{max}$ . Потребители, отказ которых заключается не в нарушении диапазона допустимых значений расхода воздуха, а только в наличии запрещенного последовательного проветривания, рассматривались в [14] при выявлении ветвей-диагоналей (т.н. «загрязняемые» потребители). Тактические мероприятия по устранению отказов такого вида путем опрокидывания воздуха в ветвах-диагоналях будут рассмотрены ниже. Далее среди всего множества ветвей-отводов выбираются ветви, параметры которых влияют на данный отказавший потребитель, причем влияющие ветви упорядочиваются по убыванию их влияния на этот потребитель.

Для «дефицитных» потребителей сначала формируется матрица  $defvc(n_{pot}, n_{nvc})$  влияющих ветвей, в  $i$ -й строке которой

стоят номера тех ветвей-отводов, в которых целесообразна установка новых вентсооружений для увеличения расхода воздуха в  $i$ -м «дефицитном» потребителе. При этом элементы строки упорядочены по степени близости новых вентсооружений к  $i$ -му «дефицитному» потребителю. Для формирования  $defvc$  применяется следующее тактическое правило. По всем уровням сегментации (снизу вверх) ищется сегмент, обладающий такими свойствами: обеспеченность воздухом, т.е.

$$\sum_{l \in L} Q_l(t_j) > \sum_{l \in L} Q_l^{\min}$$

(где  $L$  — множество потребителей этого сегмента); нахождение с некоторым сегментом, содержащим  $i$ -й «дефицитный» потребитель, в одном сегменте следующего уровня. Если такой сегмент найден, то номера его ветвей-отводов записываются на места нулевых элементов  $i$ -й строки матрицы  $defvc$  и продолжается поиск сегментов с такими же свойствами следующих более высоких уровней. Если же ни одного такого сегмента найти не удалось, то это означает, что устранить дефицит воздуха в  $i$ -м потребителе путем установки новых вентсооружений, т.е. отрицательным регулированием, невозможно. Таким образом, элементы строки матрицы  $defvc$  упорядочены по степени близости новых вентсооружений, установка которых планируется для устранения отказа, к «дефицитному» потребителю. Поэтому задачу регулирования целесообразно решать последовательно, добавляя к имеющемуся множеству РРВ сначала вентсооружения, устанавливаемые в ветвях-отводах, номера которых стоят в первом столбце матрицы  $defvc$ , затем — во втором столбце и т.д.

Далее для «дефицитных» потребителей формируется матрица  $defew(n_{pot}, n_{ew})$  влияющих ветвей. В  $i$ -й строке этой матрицы стоят номера тех ветвей-отводов, в которых целесообразно расширение

выработки для увеличения расхода воздуха в  $i$ -м «дефицитном» потребителе. При этом элементы строки упорядочены по степени «зжатости» выработок, т.е. возрастанию величины отношения  $k_{sq} = S^{\phi} / S^{np}$  (где  $S^{\phi}$  и  $S^{np}$  — соответственно фактическое сечение выработки в момент  $t_j$  с учетом старения и ее проектное сечение). Для формирования  $defew$  применяется следующее тактическое правило. По всем уровням сегментации (снизу вверх) ищется сегмент, содержащий  $i$ -й «дефицитный» потребитель, и в целом не обеспеченный воздухом, т.е.

$$\sum_{l \in L} Q_l(t_j) < \sum_{l \in L} Q_l^{\min}$$

В первую очередь, как правило, таким сегментом является сегмент 1-го уровня, содержащий этот «дефицитный» потребитель. Среди ветвей-отводов такого сегмента отбираются те ветви, в которых целесообразно расширить выработку, т.е. у которых  $k_{sq} < 1$ . Их номера записываются на места нулевых элементов  $i$ -й строки матрицы  $defew$ , и продолжается поиск сегментов с такими же свойствами следующих более высоких уровней. После просмотра всех таких сегментов элементы строки упорядочиваются по степени «зжатости» выработок, которые планируется расширить для устранения отказа путем сортировки по возрастанию величины  $k_{sq}$ . Поэтому при решении задачи регулирования целесообразно последовательно увеличивать количество регуляторов, добавляя ко всей совокупности отрицательных регуляторов (имеющихся и новых РРВ) сначала положительные регуляторы (расширяемые выработки) в ветвях-отводах, номера которых стоят в первом столбце матрицы  $defew$ , затем — те, которые находятся во втором столбце и т.д.

И, наконец, для «дефицитных» потребителей формируется матрица  $deff(n_{pot}, n_{ff})$

влияющих ветвей. В  $i$ -й строке этой матрицы стоят номера тех ветвей-вентиляторов, режим работы которых целесообразно форсировать для увеличения расхода воздуха в  $i$ -м «дефицитном» потребителе (точнее — номера тех ГВ, на которые поступает исходящая струя из этого потребителя). При этом элементы строки упорядочены по убыванию эффективности форсирования ГВ. Сначала стоят номера тех ГВ, форсирование которых может устранить дефицит воздуха в большем количестве потребителей. При равенстве же количества таких потребителей для нескольких ГВ более эффективным считается тот ГВ, форсирование которого может устранить отказы в потребителях с большим суммарным (по всем потребителям) дефицитом воздуха.

Для формирования матрицы  $deff$  применяется следующее тактическое правило. Для каждого  $k$ -го ГВ определяются те «дефицитные» потребители, исходящие струи из которых поступают на этот ГВ, т.е. вектор кода начального узла ветви-вентилятора имеет  $C_2(i) = 1$ , где  $i \in defic$  [3]. При этом подсчитываются количество таких «дефицитных» потребителей  $nfd(k)$  для каждого  $k$ -го ГВ и их суммарный дефицит воздуха  $fdefq(k)$ . Номер ветви-вентилятора, соответствующей  $k$ -му ГВ, записывается в  $k$ -й столбец тех строк матрицы  $deff$ , которые соответствуют этим «дефицитным» потребителям. Затем столбцы матрицы  $deff$  переставляются, упорядочиваясь по убыванию количества ненулевых элементов в них, т.е. по убыванию величины  $nfd(k)$ . Если же в двух или более столбцах количество ненулевых элементов одинаково, то первым из этих столбцов будет стоять тот, у которого больше соответствующая величина  $fdefq(k)$ , т.е. если  $nfd(k) = nfd(l)$  и  $fdefq(k) > fdefq(l)$ , то после такой перестановки  $k$ -ый столбец будет стоять раньше  $l$ -го столбца. При

решении задачи регулирования целесообразно последовательно форсировать режим работы сначала ГВ, номер ветви которого стоит в первом столбце матрицы  $deff$ , затем ГВ, номер ветви которого стоит во втором столбце, и т.д.

Таким образом, приведенные тактические правила позволяют: выбрать влияющие ветви для каждого «дефицитного» потребителя; упорядочить их по убыванию влияния на этот потребитель; организовать список влияющих ветвей в виде матриц  $defvc(n_{pot}, n_{nvc})$ ,  $defew(n_{pot}, n_{ew})$  и  $deff(n_{pot}, n_{ff})$ .

Для «избыточных» потребителей формируется только матрица  $plenvc(n_{pot}, n_{nvc})$  влияющих ветвей. В  $i$ -й строке этой матрицы стоят номера тех ветвей-отводов, в которых целесообразна установка новых вентсооружений для уменьшения расхода воздуха в  $i$ -м «избыточном» потребителе. Для формирования матрицы  $plenvc$  применяется следующее простое тактическое правило. В ее  $i$ -ю строку записываются номера ветвей, инцидентных конечному узлу  $i$ -го «избыточного» потребителя, в порядке убывания расходов воздуха в них (т.е. в порядке убывания проходящей через них доли исходящей струи «избыточного» потребителя).

Кроме ветвей, влияющих на устранение количественных отказов, т.е. нарушений диапазона допустимых значений расхода воздуха, выбираются также ветви, влияющие на устранение качественных отказов, т.е. запрещенного последовательного проветривания путем обеспечения в выявленных ветвях-диагоналях [14] требуемых направлений движения воздуха.

Для загрязняемых потребителей сначала формируется матрица  $upsvc(n_{pot}, n_{nvc})$  влияющих ветвей. В  $i$ -й строке этой матрицы стоят номера тех ветвей, в которых целесообразна установка новых вентсооружений для обеспечения требуе-

мых направлений движения воздуха во всех ветвях-диагоналях и ветвях-утечках, выявленных для  $i$ -го потребителя (т.е. в ветвях, номера которых стоят в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ ). При этом элементы  $i$ -й строки матрицы  $upsvs$  упорядочены по убыванию доли в загрязнении  $i$ -го потребителя той диагонали, к которой они относятся.

Для формирования матрицы  $upsvs$  применяется следующее тактическое правило. Последовательно просматриваются ветви, номера которых записаны в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ . Для каждой такой ветви (диагонали или утечки) определяются ветви, по которым воздух подводится к ее конечному узлу, и ветви, по которым воздух отводится от ее начального узла (т.е. т.н. «ветви, опасные по уменьшению сопротивления» [15]). Номера этих ветвей записываются на места ненулевых элементов  $i$ -й строки матрицы  $upsvs$ , а их количество — в  $i$ -ю строку матрицы  $nupvc(n_{pot}, n_{diag})$ . Затем аналогично определяются ветви, опасные по уменьшению сопротивления, для следующей по значимости в загрязнении  $i$ -го потребителя диагонали (ее номер стоит следующим в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ ) и т.д. Процесс заполнения  $i$ -й строки матрицы  $upsvs$  завершается после просмотра всех диагоналей и утечек, выявленных для  $i$ -го потребителя, т.е. всех ветвей, чьи номера стоят в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ . Таким образом, стоящие в  $i$ -й строке матрицы  $upsvs$  номера ветвей, опасных по уменьшению сопротивления, упорядочены по убыванию значимости в загрязнении  $i$ -го потребителя той диагонали, к которой они относятся (т.е. для обеспечения требуемого направления движения воздуха в которой в этих ветвях будут установлены вентсооружения). Поэтому задачу регулирования следует решать последовательно, устанавливая сначала вентсооружения в ветвях, номера которых

записаны в первых  $nupvc(i,1)$  элементах каждой  $i$ -й строки матрицы  $upsvs$ , затем — в элементах с  $nupvc(i,1)+1$ -го по  $nupvc(i,1) + nupvc(i,2)$ -й каждой  $i$ -й строки и т.д.

Далее для загрязняемых потребителей формируется матрица  $upsew(n_{pot}, n_{ew})$  влияющих ветвей. В  $i$ -й строке этой матрицы стоят номера тех ветвей, в которых целесообразно расширение выработки для обеспечения требуемых направлений движения воздуха во всех диагоналях и утечках, выявленных для  $i$ -го потребителя (т.е. в ветвях, номера которых стоят в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ ). При этом элементы  $i$ -й строки матрицы  $upsew$  упорядочены: по убыванию доли в загрязнении  $i$ -го потребителя той диагонали, к которой они относятся; ветви, относящиеся к одной и той же диагонали, упорядочены по степени «зажатости» соответствующих им выработок.

Для формирования матрицы  $upsew$  применяется следующее тактическое правило. Последовательно просматриваются ветви, номера которых записаны в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ . Для каждой такой ветви (диагонали или утечки) определяются ветви, по которым воздух отводится от ее конечного узла, и ветви, по которым воздух подводится к ее начальному узлу (т.е. т.н. «ветви, опасные по увеличению сопротивления» [15]). Затем среди ветвей, опасных по увеличению сопротивления, отбираются «зажатые» ветви, т.е. для которых  $k_{sq} = S^{\Phi}/S^{np} < 1$ . Номера «зажатых» ветвей, опасных по увеличению сопротивления, упорядочиваются по возрастанию величины  $k_{sq}$  и записываются на места ненулевых элементов  $i$ -й строки матрицы  $upsew$ , а их количество — в  $i$ -ю строку матрицы  $nupew(n_{pot}, n_{diag})$ . Затем аналогично определяются и упорядочиваются «зажатые» ветви, опасные по увеличению сопротивления, для сле-

дующей по значимости в загрязнении  $i$ -го потребителя диагонали (ее номер стоит следующим в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ ) и т.д. Процесс заполнения  $i$ -й строки матрицы  $upsew$  завершается после просмотра всех ветвей, чьи номера стоят в  $i$ -й строке матрицы  $D_{diag}$ . Таким образом, стоящие в  $i$ -й строке матрицы  $upsew$  номера «зажатых» ветвей, опасных по увеличению сопротивления, упорядочены по убыванию значимости в загрязнении  $i$ -го потребителя той диагонали, к которой они относятся, и по степени их «зажатости». При решении задачи регулирования следует последовательно расширять выработки сначала в ветвях, номера которых записаны в первых  $nuprew(i,1)$  элементах каждой  $i$ -й строки матрицы  $upsew$ , затем — в элементах с  $nuprew(i,1)+1$ -го по  $nuprew(i,1)+nuprew(i,2)$ -й каждой  $i$ -й строки и т.д.

### **Результаты применения тактических правил выбора мероприятий по устранению текущих отказов в реальной ШВС**

Реальная ШВС имела одиннадцать потребителей воздуха: четыре лавы; три вентилятора местного проветривания (ВМП); 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 тактических правил выбора мероприятий по устранению текущих отказов в реальной ШВС**

Следует отметить, что компьютерное моделирование данной ШВС показало, что существующее на шахте множество РРВ даже при работе ГВ в наиболее «мощном» режиме не позволяет

полностью обеспечить требуемое воздухораспределение. Предложенное же регулирование РРВ выбранными 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 выбора рациональной тактики восстановления работоспособности ШВС, что позволит повысить восстанавливаемость системы без корректировки ее базового варианта. В результате сокращается время восстановления, снижаются затраты на устранение отказов и повышается общая эффективность горных работ. Также при использовании распространенного трехмерного компьютерного моделирования, применяемого для решения широкого спектра научных задач по аэрологии [16 — 21], можно будет существенно повысить эффективность применяемых решений, так как данный подход позволяет системно учесть различные факторы в одной математической модели. Это позволит более точно определять приоритеты проведения мероприятий по устранению отказов.

### **Заключение**

Таким образом, приведенные тактические правила и сформированные на их основе матрицы влияющих ветвей  $defvc$ ,  $defew$ ,  $deff$ ,  $plenvc$ ,  $upsvc$  и  $upsew$  позволяют определить как места, так и приоритет проведения тактических мероприятий по устранению текущих отказов ШВС (установка новых вентиляторов, расширение выработок, фор-



сирование ГВ). 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. Системные решения обеспечения мета-безопасности угольных шахт // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 12 – 17.
2. Коликов К. С., Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Кафедра «Безопасность и экология горного производства»: прошлое, настоящее и будущее // Горный журнал. — 2018. — № 3. — С. 21 – 28. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.04.
3. Ушаков В. К. Динамическая иерархическая сегментация шахтных вентиляционных систем при моделировании способов повышения аэрологической безопасности труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — 2019. — С. 76 – 85. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-76-85.
4. Скопинцева О. В., Баловцев С. В. Оценка влияния аэродинамического старения выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6-1. — С. 74 – 83. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-74-83.
5. Баловцев С. В. Оценка аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт, опасных по взрывам газа и пыли // Горный журнал. — 2015. — № 5. — С. 91 – 93. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.
6. Скопинцева О. В., Вертинский А. С., Иляхин С. В., Савельев Д. И., Прокопович А. Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 17 – 20.
7. Alper G. Ventilation requirements for today's mechanized underground metal mines // International Journal of Advanced Research in Engineering. 2018. Vol. 4. No 1. Pp. 7 – 10. DOI: 10.24178/ijare.2018.4.1.07.
8. Pritchard C. Methods to improve efficiency of mine ventilation systems. Available at: <https://www.cdc.gov/NIOSH/mining/UserFiles/works/pdfs/mtieom.pdf>.
9. Bosikov I. I., Guryeva E. V. The analysis of aerodynamic parameters and practical tasks for effective inspection of mines // Перспективы науки. — 2018. — № 9 (108). — С. 96 – 99.
10. Kaiyan C., Junhong S., Fubao Z., Renwei Z., He S., Hongmei Z. Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. No 1. Pp. 79 – 84. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.11.001.
11. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. 2015. Book 1. Vol. 3. Pp. 469 – 476. DOI: 10.5593/SGEM2015/V13/S3.061.
12. Мусурманов Э. Ш. Структурный анализ управления вентиляцией шахт и рудников // Интернаука. — 2017. — № 11-1 (15). — С. 71 – 74.
13. Машинцов Е. А., Котлеревская Л. В., Криничная Н. А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2015. — № 5-2. — С. 188 – 193.
14. Ушаков В. К. Алгоритм выявления ветвей-диагоналей в шахтных вентиляционных системах для обеспечения безопасности труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 12. — С. 147 – 155. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155.
15. Приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 № 550 (ред. от 25.09.2018) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2013 № 30961).

С изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2020. Сайт Консультант плюс URL <https://consultant.ru> (дата обращения 31.07.2020).

16. Batugin A. S., Kobylkin A. S., Musina V. R. Effect of geodynamic setting on spontaneous combustion of coal waste dumps // *Eurasian Mining*. 2019. No 2. Pp. 64 – 69. DOI: 10.17580/em.2019.02.14.

17. Кобылкин С. С., Кобылкин А. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ // *Горный журнал*. – 2018. – № 5. – С. 82 – 85. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.13.

18. Wallace K., Prosser B., Stinnette D. The practice of mine ventilation engineering // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. No 2. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001.

19. Gilmore R. C., Marts J. A., Brune J. F., Saki, S., Bogin G. E., Grubb J. W. Simplifying CFD modeling of longwall gobs with a modular meshing approach // *Mining Engineering*. 2015. Vol. 67. No 3. Pp. 68 – 72.

20. Hui L., Joyce A., Landry M. J., Li X. Vortices and waves in light dark matter. [arXiv:2004.01188[astro-ph.CO]].

21. Baggioli M., Landry M. J. Effective field theory for quasicrystals and phason dynamics [arXiv:2008.05339 [hep-th]]. **PLA3**

## REFERENCES

1. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. System solutions for ensuring methane safety of coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 5, pp. 12 – 17. [In Russ].

2. Kolikov K. S., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Department of «Safety and Ecology of Mining Production»: Past, present and future. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 3, pp. 21 – 28. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.04.

3. Ushakov V. K. Dynamic hierarchical segmentation of mine ventilation systems in modeling methods of improvement of aerological safety. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 12. 2019, pp. 76 – 85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-76-85.

4. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V. Evaluation of the influence of aerodynamic aging of production on aerological risks on coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 6-1, pp. 74 – 83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-74-83.

5. Balovtsev S. V. Aerological risk assessment in working areas of gas and dust explosion-hazardous coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no 5, pp. 91 – 93. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.

6. Skopintseva O. V., Vertinskiy A. S., Ilyakhin S. V., Savel'ev D. I., Prokopovich A. Yu. Substantiation of efficient parameters of dust-controlling processing of coal massif in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 5, pp. 17 – 20. [In Russ].

7. Alper G. Ventilation requirements for today's mechanized underground metal mines. *International Journal of Advanced Research in Engineering*. 2018. Vol. 4. No 1. Pp. 7 – 10. DOI: 10.24178/ijare.2018.4.1.07.

8. Pritchard C. *Methods to improve efficiency of mine ventilation systems*. Available at: <https://www.cdc.gov/NIOSH/mining/UserFiles/works/pdfs/mtieom.pdf>.

9. Bosikov I. I., Guryeva E. V. The analysis of aerodynamic parameters and practical tasks for effective inspection of mines. *Science Prospects*. 2018, no 9 (108), pp. 96 – 99.

10. Kaiyan C., Junhong S., Fubao Z., Renwei Z., He S., Hongmei Z. Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. No 1. Pp. 79 – 84. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.11.001.

11. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines. *15th International Multidisciplinary Scientific*

*GeoConference SGEM 2015*. 2015. Book 1. Vol. 3. Pp. 469–476. DOI: 10.5593/SGEM2015/B13/S3.061.

12. Musurmanov E. Sh. Structural analysis of mine and mine ventilation management. *Inter-nauka*. 2017, no 11-1 (15), pp. 71–74. [In Russ].

13. Mashintsov E. A., Kotlrevskaya L. V., Krinichnaya N. A. Coal mine ventilation control. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015, no 5-2, pp. 188–193. [In Russ].

14. Ushakov V. K. Identification algorithm of diagonal branches in mine ventilation systems for higher safety in operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 12, pp. 147–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155.

15. *Prikaz Rostekhnadzora ot 19.11.2013 № 550 (red. ot 25.09.2018) «Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 31.12.2013 № 30961)* [Order of Rostekhnadzor of 19.11.2013 No. 550 (ed. of 25.09.2018) «On Approval of Federal Norms and Rules in the field of Industrial safety «Safety Rules in coal Mines» (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 31.12.2013 No. 30961)]. Available at: <https://consultant.ru> (accessed 31.07.2020). [In Russ].

16. Batugin A. S., Kobylkin A. S., Musina V. R. Effect of geodynamic setting on spontaneous combustion of coal waste dumps. *Eurasian Mining*. 2019. No 2. Pp. 64–69. DOI: 10.17580/em.2019.02.14.

17. Kobylkin S. S., Kobylkin A. S. Three-dimensional modeling during engineering calculations on the tactics of mountain rescue operations. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 5, pp. 82–85. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.13.

18. Wallace K., Prosser B., Stinnette D. The practice of mine ventilation engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. No 2. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001.

19. Gilmore R. C., Marts J. A., Brune J. F., Saki, S., Bogin G. E., Grubb J. W. Simplifying CFD modeling of longwall gobs with a modular meshing approach. *Mining Engineering*. 2015. Vol. 67. No 3. Pp. 68–72.

20. Hui L., Joyce A., Landry M. J., Li X. *Vortices and waves in light dark matter*. [arXiv:2004.01188[astro-ph.CO]].

21. Baggioli M., Landry M. J. *Effective field theory for quasicrystals and phason dynamics* [arXiv:2008.05339 [hep-th]].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ушаков Владимир Кимович — д-р техн. наук, профессор, НИТУ «МИСиС», e-mail: vk.usakov@misis.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.K. Ushakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: vk.usakov@misis.ru.

Получена редакцией 10.08.2020; получена после рецензии 07.12.2020; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 10.08.2020; received after the review 07.12.2020; accepted for printing 10.03.2021.

