

В.К. Ушаков

МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА НАДЕЖНЫХ И ЭФФЕКТИВНЫХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРУДА

Рассмотрена проблема управления аэрологической безопасностью труда шахтеров на основе синтеза надежных и эффективных шахтных вентиляционных систем (ШВС). Приведены показатели надежности, функциональной и экономической эффективности ШВС. Изложены принципы прогнозного анализа базового варианта системы. Предложен принцип рациональной тактики восстановления работоспособности, позволяющий повысить восстанавливаемость ШВС без корректировки ее базового варианта путем применения мероприятий по устранению текущих отказов ШВС, выбираемых с помощью тактических правил. Рассмотрены возможные тактические мероприятия. Сформулирован принцип стратегической модификации ШВС, позволяющий повысить ее показатели надежности и эффективности путем применения мероприятий по корректировке базового варианта системы, выбираемых с помощью стратегических правил. Рассмотрены возможные стратегические мероприятия. Изложена методологическая схема синтеза надежных и эффективных ШВС.

Ключевые слова: управление безопасностью, шахтная вентиляционная система, надежность, функциональная и экономическая эффективность, стохастическая динамическая модель, тактические и стратегические правила, методологическая схема синтеза ШВС.

Настоящая статья посвящена методологическому аспекту проблемы управления аэрологической безопасностью труда шахтеров на основе синтеза надежных и эффективных шахтных вентиляционных систем (ШВС).

Синтез надежных и эффективных ШВС базируется на методологии синтеза сложных динамических систем и состоит из следующих этапов:

1) определение понятий и показателей надежности и эффективности системы;

2) прогнозный анализ базового варианта системы путем моделирования процесса ее функционирования и получения оценок показателей;

3) при необходимости повышения показателей – выбор мероприятий по корректировке базового варианта системы и проверка их обоснованности (т.н. верификация) путем возвращения к этапу № 2.

Функционирование ШВС характеризуется совокупностью трех видов показателей: 1) надежности, 2) функциональной эффективности, 3) экономической эффективности.

Критерием надежности ШВС является ее способность обеспечивать требуемое воздухораспределение в сети горных выработок.

В процессе функционирования ШВС в любой момент времени t в каждой i -ой выработке фактический расход воздуха $Q_i(t)$ должен находиться в интервале допустимых значений. Значение нижней границы этого интервала Q_i^{\min} равно значению максимальной из следующих двух величин – расхода воздуха, требуемого по газовому, тепловому и пылевому факторам, а также по количеству работающих на объекте людей, и расхода воздуха, требуемого по минимально допустимой скорости его движения. Значение верхней границы интервала Q_i^{\max} равно значению расхода воздуха, определяемому по максимально допустимой скорости его движения. В любой момент времени t должно выполняться неравенство:

$$Q_i^{\min} \leq Q_i(t) \leq Q_i^{\max}, \quad (i = \overline{1, n_b}), \quad (1)$$

где n_b – количество выработок шахтной вентиляционной сети.

Кроме того, должно отсутствовать запрещенное по ПБ последовательное проветривание потребителей воздуха.

Выход фактического расхода воздуха за границы интервала его допустимых значений или наличие запрещенного последовательного проветривания потребителей означает отказ ШВС.

В качестве показателей надежности выбираются средние продолжительности безотказной работы T_n и восстановления T_b и коэффициент готовности K_r .

Средняя продолжительность безотказной работы T_n определяется как математическое ожидание случайной величины t_n – продолжительности безотказной работы. Средняя продолжительность восстановления работоспособного состояния T_b определяется как математическое ожидание случайной величины t_b – продолжительности восстановления работоспособного состояния объекта. Обычно на практике используются статисти-

ческие оценки показателей T_n и T_v , которые определяются путем фиксации моментов отказов и восстановлений объекта.

Комплексным показателем, характеризующим как свойство безотказности, так и свойство восстанавливаемости объекта, является коэффициент готовности K_r , определяемый как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, и равный:

$$K_r = \frac{T_n}{T_n + T_o}. \quad (2)$$

Критерием функциональной эффективности ШВС является создаваемый ею уровень безопасности труда по фактору вентиляции, характеризуемый степенью соответствия фактического воздухораспределения требуемому. Функциональная эффективность ШВС, зависит как от частоты отказов, так и от степени нарушения вентиляции при отказе, т.е. от степени нарушения неравенства (1): чем больше отклонение фактического расхода воздуха от границ интервала допустимых значений $[Q_{\min}, Q_{\max}]$, тем менее эффективно функционирует ШВС.

Обычно выходной эффект системы e представляется в виде безразмерной величины, принимающей значения от нуля до единицы. Значение $e = 1$ соответствует случаю нормального функционирования системы, при котором она в полной мере выполняет свои функции, а значение $e = 0$ — случаю полной потери работоспособности (остановки) системы, при котором полностью отсутствует эффект от ее функционирования.

Одной из специфических особенностей ШВС является наличие ситуаций, в которых результат ее функционирования имеет даже отрицательный эффект. Это соответствует случаям возникновения последовательного проветривания потребителей (запрещенного по ПБ) вследствие опрокидывания струи воздуха (т.е. $Q < 0$). Очевидно, что в этих случаях поступление исходящей струи воздуха от одного потребителя («загрязняющего») к другому («загрязняемому») лишь ухудшает в последнем состоянии шахтной атмосферы.

Выходной эффект e описывается следующей зависимостью:

$$e = \begin{cases} \frac{Q}{Q^{\min}}, & \text{при } Q < Q^{\min} \\ 1, & \text{при } Q^{\min} \leq Q \leq Q^{\max} \\ \frac{Q^{\max}}{Q}, & \text{при } Q > Q^{\max} \end{cases}. \quad (3)$$

В качестве показателя функциональной эффективности принимается средний уровень безопасности по фактору вентиляции E , определяемый как математическое ожидание случайной величины e .

Иногда удобнее оперировать не уровнем безопасности e , а глубиной отказа δ , т.е. величиной относительного отклонения фактического расхода воздуха Q от границ интервала его допустимых значений:

$$\delta = \begin{cases} \frac{Q^{min} - Q}{Q^{min}}, & \text{при } Q < Q^{min} \\ 0, & \text{при } Q^{min} \leq Q \leq Q^{max} \\ \frac{Q - Q^{max}}{Q}, & \text{при } Q > Q^{max} \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что

$$\delta = 1 - e. \quad (5)$$

В этом случае в качестве показателя функциональной эффективности следует использовать среднюю глубину отказа Δ , определяемую как математическое ожидание случайной величины δ . На практике используется статистическая оценка средней глубины отказа.

В соответствии с (5) средний уровень безопасности при отказе

$$E_{отк} = 1 - \Delta. \quad (6)$$

Тогда средний уровень безопасности в течение всего процесса функционирования ШВС определяется следующим образом:

$$E = E_p \cdot K_r + E_{отк} \cdot (1 - K_r), \quad (7)$$

где $E_p = 1$ – уровень безопасности при работоспособном состоянии потребителя; K_r – вероятность работоспособного состояния (т.е. коэффициент готовности (2)); $1 - K_r$ – вероятность отказа.

Учитывая (6), получаем соотношение, связывающее средний уровень безопасности E и среднюю глубину отказа Δ :

$$E = 1 - \Delta \cdot (1 - K_r). \quad (8)$$

Средний уровень безопасности по фактору вентиляции E является основным показателем функциональной эффективности ШВС. Как следует из (8), он является комплексным показателем, отражающим как глубину отказов (точнее – сохраняемый при отказах уровень безопасности), так и частоту (вероятность) их возникновения.

Важным показателем функциональной эффективности ШВС является обеспечиваемый по фактору вентиляции средний суммарный объем добычи угля $A_{\text{ш}}$ за рассматриваемый период T деятельности шахты, который равен

$$A_{\text{ш}} = A_0^{\text{cp}} \cdot T = \left(\sum_{i=1}^{n_l} A_i^{\text{cp}} \right) \cdot T, \quad (9)$$

где A_0^{cp} и A_i^{cp} – средние за рассматриваемый период производительность шахты и нагрузка на i -ую лаву (т/сут); n_l – количество лав.

Средняя нагрузка на лаву определяется путем усреднения за период T значений фактической нагрузки A , величина которой зависит от величины фактического расхода воздуха Q в лаве и, в силу стохастичности величины Q , также является случайной величиной. Зависимость $A = A(Q)$ определяется следующим образом. Для обеспечения плановой нагрузки на лаву $A^{\text{пл}}$ величина фактического расхода воздуха в ней Q должна быть не меньше величины расхода воздуха Q^J , который требуется подавать в лаву по фактору газовыделения, т.е. $A = A^{\text{пл}}$ при $Q \geq Q^J$. При $Q < Q^J$ должно быть снижено пропорционально уменьшению расхода воздуха и фактическое газовыделение в лаву J , т.е. $J = J^{\text{пл}} \cdot Q/Q^J$ (где $J^{\text{пл}}$ – расчетное газовыделение в лаву). Можно показать, что $J = J^{\text{пл}} \cdot (A/A^{\text{пл}})^{0,6}$. Следовательно, в этом случае будем иметь $A = A^{\text{пл}} \cdot (Q/Q^J)^{5/3}$. В случае же запрещенного последовательного проветривания потребителей из-за опрокидывания струи воздуха, т.е. при $Q < 0$, лавы должна быть остановлена, т.е. $A = 0$. Таким образом, зависимость нагрузки на лаву от фактического расхода воздуха в ней $A = A(Q)$ имеет вид:

$$A = \begin{cases} 0, & \text{при } Q < 0 \\ A^{\text{пл}} \cdot \left(\frac{Q}{Q^J} \right)^{\frac{5}{3}}, & \text{при } 0 \leq Q < Q^J \\ A^{\text{пл}}, & \text{при } Q \geq Q^J \end{cases} \quad (10)$$

Следует отметить, что величина $Q^J \leq Q^{\text{min}}$. Это означает, что нарушение вентиляции лавы, т.е. неравенства (1), не всегда требует снижения нагрузки на нее. Например, когда требуемый расход воздуха в лаве принимается по пылевому фактору плановую нагрузку на лаву можно сохранять даже в случае, если фактический расход воздуха в ней Q меньше нижней гра-

ницы интервала его допустимых значений Q^{\min} ; точнее, если $Q^j \leq Q < Q^{\min}$.

Таким образом, показателями функциональной эффективности ШВС являются средняя глубина отказа Δ , средний уровень безопасности труда по фактору вентиляции E , а также средние нагрузки на лавы и производительность шахты $A_0^{\text{сп}}$.

При анализе экономической эффективности надежности функционирования технических систем определяются затраты на создание и эксплуатацию системы Z_1 и затраты (потери), обусловленные ненадежностью ее функционирования Z_2 . Сравнение величин Z_1 и Z_2 позволяет делать вывод об экономической целесообразности достижения данного уровня надежности системы. В качестве критерия экономической эффективности рассматриваются средние удельные приведенные затраты, т.е. затраты, рассчитанные за весь исследуемый период функционирования системы и отнесенные, например, к единице выпускаемой продукции.

При анализе ШВС средние удельные приведенные затраты Z представляют собой затраты, отнесенные к среднему суммарному объему добычи угля $A_{\text{ш}}$ за рассматриваемый период деятельности шахты, т.е.

$$Z = (Z_1 + Z_2)/A_{\text{ш}}, \quad (11)$$

где величина $A_{\text{ш}}$ определяется по (9).

Затраты на создание и эксплуатацию ШВС Z_1 , т.е. капитальные и эксплуатационные затраты, имеют следующий вид:

$$Z_1 = (E_n \cdot K_t + C_t) \cdot B_t, \quad (12)$$

где K_t, C_t – капитальные и эксплуатационные затраты в t -ый год, руб; T – продолжительность рассматриваемого периода деятельности шахты, лет; E_n, B_t – нормативные коэффициенты.

При проектировании или перспективном планировании развития горных работ затраты Z_1 определяются для ее базового варианта по отраслевой методике. Для альтернативных вариантов системы подсчитывается только приращение затрат ΔZ_1 , т.е. $Z = Z + \Delta Z_1$.

Затраты (потери) Z_2 , обусловленные ненадежностью ШВС, включают в себя экономический ущерб от аварий по фактору вентиляции $Z_{\text{ав}}$ и затраты на устранение отказов ШВС $Z_{\text{от}}$, т.е.

$$Z_2 = Z_{\text{ав}} + Z_{\text{от}}. \quad (13)$$

Экономический ущерб от аварий по фактору вентиляции $Z_{\text{ав}}$ представляет собой сумму прямых убытков, убытков от трав-

матизма и убытков от ремонтов и восстановлений выработок, понесенных в результате аварий, связанных со взрывом газа или загазированием выработок. Величина $Z_{ав}$ прямо пропорциональна количеству отказов ШВС. Ненадежность функционирования ШВС влечет за собой также затраты на устранение отказов вентиляции $Z_{от}$. Эти затраты связаны с необходимостью проведения в процессе эксплуатации ненадежной ШВС мероприятий по восстановлению требуемого воздухораспределения с целью предотвращения аварийных по фактору вентиляции ситуаций.

Таким образом, показателями экономической эффективности ШВС являются средние затраты на устранение отказов вентиляции $Z_{от}$ и ущерб от аварий по фактору вентиляции $Z_{ав}$, затраты на создание и эксплуатацию ШВС Z_1 и средние удельные приведенные затраты Z , характеризующие стоимость тонны угля по фактору вентиляции.

После определения основных понятий и показателей следующим этапом синтеза надежных и эффективных ШВС является разработка принципов и методов прогнозного анализа. Этот анализ должен позволять получать прогнозную оценку показателей НЭФ ШВС с учетом динамики параметров и структуры системы. В методологическом плане этот этап синтеза весьма важен, т.к. синтез надежных и эффективных ШВС невозможен без предварительного анализа динамики их развития. На основе такого анализа осуществляется синтез надежной и эффективной системы путем выбора мероприятий по повышению полученных показателей базового варианта ШВС.

Процедура формирования совокупности оцениваемых показателей НЭФ ШВС должна основываться на принципе комплексности прогнозного анализа. Поскольку цель такого анализа функционирования ШВС заключается в прогнозировании как ее надежности, так и эффективности, то формируемая совокупность должна содержать показатели всех трех видов — надежности, функциональной и экономической эффективности.

При прогнозировании процесса функционирования ШВС используется принцип иерархической оценки показателей, учитывающий иерархическую структуру системы. Это объясняется тем, что влияние отказов ШВС на производственную деятельность шахты может быть существенно различным по своему масштабу. Например, отказ вентиляции одного выемочного участка, как правило, не затрагивает соседние участки, а отказ вентиляции одного пласта обычно не влияет на вентиляцию

других пластов. В связи с этим отказы ШВС ранжируются по их значимости в производственном процессе: отказы 1 ранга, охватывающие всю шахту в целом или большинство пластов; отказы 2 ранга, охватывающие отдельные пласты (крылья) или большинство выемочных участков в пределах пласта (крыла); отказы 3 ранга, охватывающие отдельные выемочные участки. Сравнение результатов прогнозного анализа различных ШВС производится по показателям одного и того же ранга в порядке возрастания номера ранга.

Прогнозный анализ надежности и эффективности вентиляции выполняется на стадиях проектирования шахты или планирования развития горных работ и поэтому должен основываться на результатах математического моделирования процесса функционирования ШВС.

Математическая модель процесса функционирования ШВС должна обладать параметрической и структурной чувствительностью, т.е. должна позволять учитывать в качестве влияющих факторов как параметры работоспособности отдельных элементов системы, так и особенности ее структуры (топологии шахтной вентиляционной сети).

Предметом прогнозного анализа является процесс функционирования ШВС, т.е. поведение системы в ее развитии. Поэтому математическая модель должна отражать динамику параметров и структуры ШВС, т.е. должна являться динамической моделью.

Отказы или снижение выходного эффекта системы обусловлены влиянием различных факторов случайного (стохастического) характера. Следовательно, прогнозный анализ НЭФ ШВС должен выполняться в рамках динамической модели стохастического типа. При этом получаемые оценки показателей имеют вероятностно-статистический смысл.

На основании прогнозного анализа надежности и эффективности базового варианта ШВС может быть сделан вывод о необходимости повышения полученных показателей. Эта задача составляет содержание завершающего этапа синтеза надежной и эффективной ШВС. На этом этапе выбираются мероприятия по корректировке базового варианта системы и выполняются их верификация (т.е. проверка обоснованности этих мероприятий) путем прогнозного анализа уже скорректированного варианта ШВС.

Выбор мероприятий, направленных на повышение надежности и эффективности любой технической системы, базируется на следующих принципах: 1) рациональная тактика вос-

становления работоспособности системы; 2) стратегическая модификация системы.

На принципе рациональной тактики восстановления работоспособности основывается выбор тактики устранения текущих отказов ШВС. Этот принцип применяется в процессе моделирования базового варианта ШВС для выбора мероприятий, обеспечивающих рациональную тактику ликвидации возникающих нарушений вентиляции. Эти тактические мероприятия необходимы в том случае, когда возникший отказ ШВС (т.е. нарушение требуемого воздухораспределения) неустраним имеющимися в данный момент средствами регулирования. Выбор необходимых тактических мероприятий осуществляется на основе т.н. «тактических правил», которые определяют условия применения тех или иных способов восстановления требуемого воздухораспределения, т.е. работоспособного состояния ШВС. Тактические правила составляются на основе тех эвристических правил, которыми пользуется специалист по вентиляции для устранения текущих отказов ШВС.

Группа тактических правил подразделяется на две подгруппы в соответствии с двумя видами отказов ШВС – внезапными и постепенными.

Подгруппа правил устранения внезапных отказов определяет условия применения различных способов ремонта разрушенного элемента ШВС, явившегося причиной внезапного отказа. В зависимости от типа разрушенного элемента эти способы предусматривают проведение следующих мероприятий: 1) ремонт разрушенного вентсооружения; 2) устранение обрушения выработки; 3) запуск остановившегося ГВ.

Подгруппа правил устранения постепенных отказов определяет условия применения способов восстановления требуемого воздухораспределения, нарушенного вследствие совокупного влияния процессов старения различных элементов ШВС. Эти способы предполагают выполнение мероприятий следующего характера: 1) установка дополнительных регуляторов; 2) расширение и перекрепление выработок; 3) форсирование режима работы ГВ.

Принцип стратегической модификации системы применяется для формирования обоснованной стратегии выбора мероприятий по корректировке параметров и структуры базового варианта ШВС с целью устранения в нем «узких мест». Выбор этих стратегических мероприятий выполняется на основе т.н. «стратегических правил». Стратегические правила представля-

ют собой эвристические правила, которые применяет специалист по вентиляции при формировании различных вариантов проектируемой ШВС.

Группа стратегических правил также подразделяется на две подгруппы в соответствии с различными способами повышения НЭФ систем – параметрическими и структурными способами.

Подгруппа параметрических правил определяет условия применения способов повышения безотказности и ремонтпригодности отдельных элементов ШВС. Повышение безотказности элементов достигается в результате проведения следующих мероприятий: 1) усиление крепи выработок; 2) улучшение условий поддержания выработок и вентсооружений; 3) резервирование ГВ. Эти мероприятия проводятся в том случае, когда полученное для данного элемента значение частоты восстановительных работ относительно высоко. В этом же случае, а также при большом значении средней продолжительности восстановительных работ на данном элементе целесообразно изменение графика профилактик. Профилактические мероприятия представляют собой: 1) укрепление и расширение выработок; 2) повышение герметичности вентсооружений; 3) профилактику ГВ. Изменение графика профилактик элемента позволит уменьшить частоту и продолжительность восстановительных работ на нем, т.е. повысить его безотказность и ремонтпригодность.

Подгруппа структурных правил определяет условия применения способов повышения показателей НЭФ ШВС путем изменения ее структуры (топологии шахтной вентиляционной сети). Эти способы предусматривают проведение следующих мероприятий: 1) возведение дополнительных вентсооружений или изменение мест их установки; 2) проходка дополнительных или исключение лишних выработок, а также изменение мест проходки; 3) бурение дополнительных вентскважин; 4) введение дополнительных или замена типов существующих ГВ; 5) изменение схем проветривания выемочных и вентиляционных участков. Структурные правила применяются в случае, когда использование параметрических правил при существующей топологии ШВС не позволяет устранить «узкие места» в системе и повысить ее надежность и эффективность.

После выбора мероприятий по корректировке параметров и структуры базового варианта ШВС должна быть выполнена их верификация путем прогнозного анализа надежности и эффективности уже скорректированного варианта системы.

Следовательно, методологическую схему синтеза надежных и эффективных ШВС укрупненно можно представить следующим образом. Сначала задается некоторый базовый вариант системы. На основе моделирования процесса его функционирования выполняется прогнозный анализ надежности и эффективности и в результате определяются оценки соответствующих показателей для данного варианта. При этом предполагается, что текущие отказы ШВС могли устраняться только заданными в базовом варианте средствами регулирования. Затем снова осуществляется моделирование базового варианта ШВС, но уже с использованием рациональной тактики восстановления работоспособности путем применения выбираемых с помощью тактических правил мероприятий по устранению текущих отказов. Если новые прогнозные оценки показателей НЭФ ШВС по-прежнему являются неудовлетворительными, то путем их анализа выявляются «узкие места» в системе. Далее с помощью стратегических правил осуществляется стратегическая модификация ШВС путем применения мероприятий по корректировке параметров и структуры ее базового варианта. Затем выполняется моделирование уже скорректированного варианта ШВС и прогнозный анализ его надежности и эффективности, т.е. верификация выбранных мероприятий. Этот процесс синтеза надежной и эффективной ШВС итеративным образом продолжается до тех пор, пока достигнутые показатели не будут признаны удовлетворительными или пока не будут исчерпаны все возможные мероприятия по повышению НЭФ данной ШВС. Результатом повышения надежности и эффективности проветривания является обеспечение безопасных и комфортных условий труда шахтеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ушаков К. З.* Надежность вентиляции шахт. — М.: ЦНИИУголь, 1973. — 41 с.
2. *Ушаков К. З., Редкозубов С. А., Ушаков В. К.* Основные концепции проектирования и реализации экспертной системы синтеза надежных и эффективных шахтных вентиляционных систем / Сборник докладов 24-ой Международной конференции научно-исследовательских институтов по безопасности работ в горной промышленности. — Донецк: Внешторгиздат, 1991. — с.197–205.
3. *Пучков Л. А., Бахвалов Л. А.* Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. — М.: Недра, 1992. — 399 с.
4. *Ушаков В. К.* Математическое моделирование надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем. — М.: Изд-во МГГУ, 1999. — 182 с.

5. Шкундин С. З., Хиврин М. В., Шварцман А. Г. Критерии оценки эффективности многофункциональных систем безопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 340–351.

6. Ушаков В. К. Моделирование случайных потоков дискретной динамики шахтных вентиляционных систем с целью улучшения условий труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 206–210.

7. Ушаков В. К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 240–248. **МИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ушаков Владимир Кимович – доктор технических наук, профессор, МГИ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 622.4:
622.019.3

V.K. Ushakov

METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF RELIABLE AND EFFICIENT VENTILATION SYSTEMS FOR OCCUPATIONAL SAFETY CONTROL

The article addresses the issues of control over aerological safety of mine personnel based on synthesis of reliable and efficient mine ventilation systems (MVS). Synthesis of reliable and efficient MVS includes stages of: (1) definition of reliability and efficiency and selection of their parameters; (2) predictive analysis and estimation of basic system design performance; (3) choice of measures toward performance improvement. Figures of MVS reliability and functional and economic efficiency are given. Principles of predictive analysis of the basic system design are presented. The proposed principle of rational approach to restoration of the system functionality enables MVS recovery without redesigning its basic structure but by means of current emergency maintenance plan selected with the help of special tactical rule. Potential tactical rules are discussed. The author formulates the principle of strategic MVS modification, allowing enhanced reliability and efficiency of the system through basic system design adjustment based on special strategic rules. Feasible strategic rules are considered. The methodology of synthesis of reliable and efficient MVS is described. The methodology represents an iterative process, consisting of cyclic stage-wise predictive analysis of reliability and functional efficiency (RFE) indexes of an MVS version and application of tactical and strategic rules aimed at selecting measures toward higher RFE. The outcome of the enhanced reliability and efficiency of ventilation is safety and comfort of mine personnel.

Key words: safety control, mine ventilation system, reliability, functional and economic efficiency, stochastic dynamic model, tactical and strategic rules, MVS synthesis methodology.

AUTHOR

Ushakov V.K., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

REFERENCES

1. Ushakov K. Z. *Nadezhnost' ventilyatsii shakht* (Mine ventilation reliability), Moscow, TsNIEIugol', 1973, 41 p.
2. Ushakov K. Z., Redkozubov S. A., Ushakov V. K. *Cbornik dokladov 24-oy Mezhdunarodnoy konferentsii nauchno-issledovatel'skikh institutov po bezopasnosti rabot v gornoy promyshlennosti* (Mining Safety: Proceedings of the 24th Conference of Research Institutes), Donetsk, Vneshtorgizdat, 1991, pp. 197–205.
3. Puchkov L. A., Bakhvalov L. A. *Metody i algoritmy avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniem ugol'nykh shakht* (Methods and algorithms of automated ventilation control in coal mines), Moscow, Nedra, 1992, 399 p.
4. Ushakov V. K. *Matematicheskoe modelirovanie nadezhnosti i effektivnosti shakhtnykh ventilyatsionnykh sistem* (Mathematical modeling of reliability and efficiency of mine ventilation systems), Moscow, Izd-vo MGGU, 1999, 182 p.
5. Shkundin S. Z., Khivrin M. V., Shvartsman A. G. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 11, pp. 340–351.
6. Ushakov V. K. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 9, pp. 206–210.
7. Ushakov V. K. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 4, pp. 240–248.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

МЕТОДОЛОГИЯ ГОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РИСКА НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Шурыгин Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: shurygind@mail.ru, Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова.

Описаны подходы к решению задачи оценки риска недропользования и горного производства в условиях неполной информации о природном размещении геологических показателей в недрах. Установлены количественные взаимосвязи погрешности геометризации показателей угольных пластов и боковых пород с вероятностью наступления риска освоения недр и величиной потерь. Приведены особенности математического моделирования пространственных и факторных полей горно-геологических показателей с учетом минимизации погрешности горно-геометрических моделей. Предложена методология оценки риска недропользования с учетом разработанной последовательности этапов геометризации пространственного размещения горно-геологических показателей в предварительно выделенных однородных участках угольных месторождений.

Ключевые слова: горно-геометрическая модель, риск недропользования, геологический риск, математическое моделирование, оценка риска, планирование горных работ, технико-экономический показатель.

METHODOLOGY OF MINING-GEOMETRIC RISK ASSESSMENT OF SUBSOIL USE

Shurygin D. N., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: shurygind@mail.ru, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 346428, Novocherkassk, Russia.

In the papers described approaches to solving the problem of risk assessment of subsoil use and mining industry in the conditions of incomplete information about the natural location of the geological features in the subsurface. Quantitative relationship of the error indicators of geometrization of coal seams and side rocks with risk of development of a subsoil and the magnitude of the losses. The peculiarities of mathematical modeling of spatial and factor fields of geological indicators, taking into account minimization of error mining and geometric models. The influence of statistical homogeneity of the geological information on the reliability of risk assessment models of mining operations. Implemented the comparison of optimal design decisions when planning of mining operations at the excavation sites of coal mines with and without allowance for the probabilistic nature of the initial geological information. The analysis of the impact of major mining-and-geological conditions of working off of coal deposits on the efficacy and safety of mining operations based on error mining-geometrical models of coal seams. The place and role of the geometrization of the indicators field in the process making engineering decisions in the planning of mining operations at a coal mine. The proposed methodology for the risk assessment of subsoil with regard to developed the sequence of steps of the geometrization of the spatial distribution of geological indicators in pre-selected homogeneous areas of coal deposits.

Key words: mining-geometrical model, the risk of subsoil use, geological risk, mathematical modeling, risk assessment, mine planning, technical and economic indicators.