

**КРИТЕРИИ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ
С НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРОЙ
И АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Запропоновано критерії адекватності математичних моделей вентиляційних мереж вугільних шахт їх реальному стану та обґрунтовано можливість їх використання під час розрахунків повітророзподілу у вентиляційних мережах.

**YARDSTICK OF ADEQUACY OF MATHEMATICAL SAMPLE PIECES OF
VENTILATION SYSTEMS OF COAL MINES WITH UNCERTAIN
PATTERN AND AERODYNAMIC ARGUMENTS**

The yardsticks of adequacy of mathematical sample pieces of ventilation systems of coal mines to their actual state are proposed and the possibility of their usage is justified during calculations air-distribution in ventilation systems.

В условиях угольных шахт степень достоверности информации об аэродинамических параметрах шахтной вентиляционной сети (ШВС) связана со значительной протяженностью горных выработок, высокой динамичностью и недостаточной обусловленностью (неопределенностью) топологических структур. Помимо этого, несовершенство существующих измерительных средств и недостаточная оснащенность ими участков вентиляции и техники безопасности (ВТБ) существенно затрудняют оперативный контроль аэродинамических параметров в сложных многовентиляторных системах. Также следует отметить, что в ряде ветвей ШВС (погашаемых выработках, путях утечек воздуха) измерения расходов воздуха затруднительны, а в ряде случаев и невозможны, что обуславливает необходимость построения математической модели ШВС в условиях неопределенности исходных данных.

Начальные положения теории математического моделирования ШВС были разработаны А.Д. Багриновским [1, 2]. Математическая модель воздухораспределения представлена в этих работах общеизвестными законами сетей (законами Кирхгофа).

В настоящее время построение математической модели ШВС выполняется в несколько этапов [3]:

1. Проведение замеров воздуха и депрессии в выработках ШВС.
2. Определение рабочих характеристик вентиляторов главного проветривания (ВГП).
3. Построение топологической модели ШВС.
4. Определение аэродинамического сопротивления горных выработок и путей утечек воздуха по результатам замеров воздуха и депрессии.
5. Анализ результатов моделирования на ПЭВМ. Оценка адекватности модели.
6. Корректировка аэродинамических сопротивлений элементов математиче-

ской модели.

7. Решение с использованием полученной модели задач оперативного управления, перспективного планирования и совершенствования ШВС.

Отличительной особенностью выполнения этапа 4 моделирования ШВС являются значительные пределы изменения аэродинамического сопротивления элементов ШВС. Его величина может изменяться в диапазоне от 0,00001 кН до десятков килоньютонов. Эта особенность (слабая обусловленность аэродинамических параметров ШВС) существенно сказывается на результатах математического моделирования ШВС с использованием ПЭВМ.

Построению топологических моделей ШВС (этап 3) посвящен ряд работ [2, 4, 5]. Он состоит из двух подэтапов. Первый подэтап заключается в определении топологической модели ШВС. Второй подэтап заключается в математическом описании топологии ШВС, необходимом для построения и решения системы уравнений, описывающих потокораспределение в ШВС.

Анализ литературных источников показал, что наиболее общими из используемых является методы, основанные на декомпозиции сетей и исключаяющие ветви модели ШВС, по аэродинамическим параметрам не соответствующие естественному воздухораспределению. Однако существенным недостатком этих методов является то, что применение их возможно только после выполнения второго этапа – математического описания топологии ШВС.

Особенностью построения топологических моделей ШВС в настоящее время является снятие ограничений на размерность моделируемых на ПЭВМ ШВС, в связи с чем отпадает необходимость в их упрощении. Анализ схем проветривания угольных шахт показывает, что они излишне подробно копируют аксонометрическую схему горных выработок, включая выработки, несущественные с точки зрения проветривания. Другим недостатком построения топологической модели ШВС в ходе проведения воздушно-депресссионной съемки (ВДС) является исключение ряда выработок, в основном из числа непроходимых для замерщиков, что обуславливает топологическую неопределенность ШВС. Проведение вентиляционных расчетов ШВС на ПЭВМ предполагает выполнение условия связности моделирующей сеть графа, что приводит к включению в топологическую модель фиктивных ветвей с неопределенными параметрами.

Следует отметить, что точность моделирования ШВС, а, следовательно, и достоверность принимаемых решений по совершенствованию проветривания, существенно зависят от корректности выполнения как первого, так и второго этапов.

В дальнейшем под адекватностью математической модели ШВС понимается степень соответствия результатов моделирования на ПЭВМ экспериментальным данным (замерам расходов воздуха и депрессии горных выработок). Основными целями анализа адекватности моделирования на ПЭВМ реальному состоянию ШВС является проверка правильности построения топологической модели и собственно точности расчета полученных аэродинамических параметров. В оценочных расчетах воздухораспределения достаточно точности 10-15% [7].

При исследовании адекватности математической модели различают качественное и количественное совпадение результатов расчетов и измерений аэро-

динамических параметров.

Определение 1. Исходная (реальная) ШВС описывается графом $G_u(X_u, U_u)$, где X_u, U_u – множества узлов и ветвей ШВС соответственно.

Определение 2. Математическая модель ШВС определена графом $G_m(X_m, U_m)$, где X_m, U_m – множества узлов и ветвей ШВС соответственно.

Возникает следующая задача. В каком случае можно считать, что граф $G_u(X_u, U_u)$ совпадает с графом $G_m(X_m, U_m)$?

В простейшем случае графы равны ($G_u=G_m$), если совпадают составляющие их множества ветвей ($X_u=X_m$) и узлов ($U_u=U_m$). В более общем случае, если номера узлов и дуг исходного и моделируемого графов не совпадают, необходимо использовать *критерий изоморфности (топологической адекватности)*, применяемый в теории графов. Основным смыслом этого критерия заключается в том, что каждому узлу исходного и моделируемого графа ставится в соответствие некоторое число – степень узла, определяемая как количество ветвей, инцидентных данному узлу $s(G, x)$. Упорядоченная по неубыванию $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_n$ система (s_1, s_2, \dots, s_n) представляет собой вектор степеней графа.

Свойство 1. Необходимым условием равенства графов ($G_u=G_m$) является равенство их векторов степеней.

Следует отметить, что использование этого критерия эффективно при поиске топологических ошибок, связанных с ошибочным добавлением или потерей элементов ШВС (узлов или ветвей).

Для определения моделирующего графа с неопределенной топологией предлагается следующий алгоритм.

1. Пусть дана исходная сеть $G_u(X_u, U_u)$. На множестве ветвей U_m моделируемого графа выделяется постоянная часть U_{const} , т.е. ветви ШВС, которые отображаются в ее модели без изменения структуры и параметров. Для определения этих ветвей можно ввести **критерий совпадения основных аэродинамических связей** объектов проветривания с ВГП и узлами поверхности, который может быть определен следующим образом.

В моделируемой ШВС главный по количеству подаваемого воздуха маршрут от объекта проветривания к ВГП и узлам поверхности должен совпадать с маршрутом в исходной сети. Объединение множеств ветвей и узлов этих маршрутов для всех объектов проветривания (основных и дополнительных) и представляет собой основные аэродинамические связи ШВС.

2. Оставшаяся (неопределенная) часть сети отражается в математической модели топологической структурой $G'_d(X_m, U'_d)$. Очевидны свойства топологической структуры, моделирующей неопределенную часть сети:

$$U_m = U_{const} \cup U'_d$$

$$U'_d = \{u(i, j) / i \in X_m \ \& \ j \in X_m \},$$

где $u(i, j)$ – депрессия горной выработки.

т.е. при формировании моделирующей структуры новые узлы не вводятся.

3. Результаты замеров воздуха и депрессий наносятся на моделирующий граф $G_m(X_m, U_m)$

4. В моделирующем графе определяются узлы с нарушением первого закона сетей следующим образом:

$$\Delta q_i = \sum_{(i,j) \in U_i} \text{sign}(Q(i,j))Q(i,j) \quad i = 1, n$$

$$|\Delta q_i| \geq \xi, \quad i = 1, n',$$

где Δq_i – невязка расходов воздуха в i -том узле; $Q(i,j)$ – расход воздуха в ветви (i,j) , ξ – требуемая точность моделирования воздухораспределения в i -том узле; n – количество ветвей ШВС; n' – количество узлов с нарушением первого закона сетей.

5. Определяется множество ветвей, моделирующих неопределенную часть сети. Для этого выполняется ряд операций сравнения

$$1) \Delta q_i > 0 \quad 2) \Delta q_j < 0 \quad 3) |\Delta q_i| = |\Delta q_j|$$

Если выполняются все три условия, то ветвь (i,j) включается в множество ветвей U'_d моделирующего графа.

Таким образом, задача определения топологии моделирующего графа заключается в том, чтобы максимальное отклонение в любом из узлов исходной и моделируемой сетей не превышало погрешности, связанной с измерениями расходов воздуха.

Важнейшим этапом при исследовании математической модели ШВС является оценка качественного совпадения результатов моделирования. При качественном сравнении требуется совпадение наиболее значимой характеристики – направления движения воздуха в элементах ШВС.

Определение 3. Направление движения воздуха в элементах ШВС определяется ее топологией и аэродинамическими сопротивлениями выработок и путей утечек воздуха, а, следовательно, определяет ее *потокową* структуру.

При анализе адекватности потоковых структур моделируемой и реальной ШВС необходимо принимать во внимание, что в ШВС существуют неявные аэродинамические связи, которые не могут быть численно определены из-за неполноты проводимых ВДС или объективной невозможности замера аэродинамических параметров (например, в погашаемых выработках). Поэтому исследование реальной и моделируемой сетей на соответствие потоковых структур является важным этапом построения математической модели ШВС.

Свойство 2. Качественным критерием адекватности реальной ШВС и моделирующего ее графа является соответствие их потоковых структур

$$U_m = \{u(i,j) / i \in X_m \ \& \ j \in X_m \}$$

К оценке количественного соответствия результатов моделирования можно приступить только при положительном результате оценки качественного совпадения потоковых моделей исходной ШВС и моделируемого графа. Только в этом случае можно считать, что исходная и моделируемая сеть топологически подобны, т.е. $G_u(X_u, U_u) = G_m(X_m, U_m)$

В общем случае адекватность математических моделей – это способность отражать характеристики технического объекта с относительной погрешностью не более некоторого заданного значения [6].

При оценке адекватности количественных характеристик (расхода воздуха, депрессий и других аэродинамических параметров выработок шахты) математической модели ШВС ее реальному остоянию следует учитывать отличия в точности исходных данных для каждого типа объектов ШВС, классификация которых приведена в [8], граничные условия для каждого параметра и соответствующих им моделируемых значений.

Определение 4. Критерий адекватности по расходу воздуха в ветвях моделируемой ШВС определяется, как

$$\left| \frac{Q_u(i, j) - Q_m(i, j)}{Q_u(i, j)} \right| \leq \xi, \quad l = 1, n$$

Свойство 3

Максимальное отклонение критерия адекватности по расходу воздуха представляет собой неравенство вида

$$\max |Q_u(i, j) - Q_m(i, j)| \leq \xi, \quad l = 1, n,$$

Свойство 4.

Значения критерия адекватности по расходу воздуха различно для разных типов ветвей.

Определение 5. Критерий адекватности по депрессии моделируемой ШВС определяется, как

$$\left| \frac{H_u(i, j) - H_m(i, j)}{H_m(i, j)} \right| \leq \xi, \quad l = 1, n,$$

где $H(i, j)$ – депрессия горной выработки (индексы охарактеризованы выше).

Свойство 5

Максимальное отклонение критерия адекватности по депрессии воздуха имеет вид

$$\max |H_u(i, j) - H_m(i, j)| \leq \xi, \quad l = 1, n,$$

Свойство 6.

Значения критерия адекватности по депрессии различно для разных типов ветвей.

Определение 4. Критерий адекватности по аэродинамическому сопротивлению в ветвях моделируемой ШВС определяется, как

$$\left| \frac{R_u(i, j) - R_m(i, j)}{R_m(i, j)} \right| \leq \xi, \quad l = 1, n,$$

где $R(i, j)$ – аэродинамическое сопротивление горной выработки (индексы охарактеризованы выше).

Свойство 7

Максимальное отклонение критерия адекватности по аэродинамическому сопротивлению представляет собой неравенство вида

$$\max |R_u(i, j) - R_m(i, j)| \leq \xi, \quad l = 1, n,$$

Свойство 8

Значения критерия адекватности по аэродинамическому сопротивлению различно для разных типов ветвей.

Для моделирования ШВС с **высокой динамикой (ВД) изменения топологии и аэродинамических параметров** предлагаются критерии адекватности, учитывающие изменения аэродинамических параметров.

Определение 5. Критерий адекватности по расходу воздуха в ветвях моделируемой ШВС с ВД определяется неравенством вида

$$\left| \frac{Q_u(i, j) - Q_m(i, j)}{Q_u(i, j)} \right| \leq \xi, \quad \text{при } R(i, j) \pm \Delta R < \acute{\epsilon},$$

где ΔR – изменение аэродинамического сопротивления выработки (i, j) в зависимости от изменения длины выработки и изменения площади ее поперечного сечения вследствие проявлений горного давления, $\acute{\epsilon}$ – предел изменения аэродинамического сопротивления в зависимости от проявления указанных факторов, определяемых в соответствии с [9].

Определение 6. Критерий адекватности по депрессии моделируемой ШВС с ВД определяется, как

$$\left| \frac{H_u(i, j) - H_m(i, j)}{H_u(i, j)} \right| \leq \xi, \quad \text{при } R(i, j) \pm \Delta R < \acute{\epsilon},$$

Общий смысл приведенных критериев заключается в том, что математические модели ШВС должны в пределах заданной точности отражать изменение

воздухораспределения, связанное с изменением аэродинамических сопротивлений исходной сети и динамику топологии.

Свойство 9. При переходе от одного условно постоянного периода

$G_{k-1}(X_{k-1}, U_{k-1}, t_{k-1})$ к другому $G_k(X_k, U_k, t_k)$ к графу сети добавляется подграф новых выработок $g_k'(X_k', U_k', t_k)$ и исключается подграф погашаемых выработок $g_k''(X_k'', U_k'', t_k)$

$$G_k(X_k, U_k, t_k) = G_{k-1}(X_{k-1}, U_{k-1}, t_{k-1}) U g_k'(X_k', U_k', t_k) / g_k''(X_k'', U_k'', t_k)$$

Определение 7. Критерий адекватности по расходу воздуха в ветвях моделируемой ШВС с ВД при изменении аэродинамического сопротивления ветвей определяется, как

$$\left| \frac{Q_u(i, j) - Q_m(i, j)}{Q_u(i, j)} \right| \leq \xi, \quad \text{при } R(i, j) \pm \Delta R < \epsilon,$$

Определение 8. Критерий адекватности по депрессии моделируемой ШВС с ВД при изменении топологии определяется, как

$$\left| \frac{H_u(i, j) - H_m(i, j)}{H_u(i, j)} \right| \leq \xi, \quad \text{при } R(i, j) \pm \Delta R < \epsilon,$$

Общий смысл приведенных критериев заключается в том, что математическая модель ШВС должна в пределах заданной точности отражать изменение воздухораспределения, связанное с аэродинамическим сопротивлением исходной сети и изменением ее топологии.

Наиболее часто встречающейся ошибкой при построении математических моделей многовентиляторных ШВС является то, что топологически подобной модели приписываются произвольно подобранные аэродинамические сопротивления. Вариант воздухораспределения вполне реален (законы Кирхгофа соблюдаются), однако в дальнейших расчетах воздухораспределения при использовании такой математической модели выявляется значительное расхождение по расходам воздуха в выработках ШВС и их депрессии при одинаковой подаче и производительности ВГП. Поэтому в зависимости от вида решаемой задачи с применением математической модели ШВС должны выдвигаться требования к погрешности вычислений по предложенным критериям адекватности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багриновский А.Д. Основы теории распределения воздуха в шахтных вентиляционных сетях. В сб.: Рудничная аэрология. М., изд-во АН СССР, 1962.- 268 с.
2. Багриновский А.Д. Топологическая теория вентиляционных сетей. В сб.: Рудничная аэрогазодинамика и безопасность труда горных работ. М., «Наука», 1964.- с. 128-202.
3. Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах.-Утверждено Главным управлением охраны труда, техники безопасности и горноспасательных частей Минуглепрома СССР 29.11.1989 г. - Донецк, 1989.- 74 с.

4. Абрамов Ф.А., Тяг Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников.- М.: Недра, 1978.- 231 с.
5. Потемкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках // Киев: Техника, 1991.- 126 с.
6. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов/ Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.- 496 с.
7. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Утверждено Приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда № 131 от 20.12.1993 ДНАОТ 1.1.30-6.09.93.- Киев, 1994.
8. Структурная идентификация шахтной вентиляционной сети/ А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин// Уголь Украины, 2004.- № 1.- с. 31-35.
9. К вопросу анализа достоверности определения аэродинамических параметров горных выработок/ Новиков Л.А., Бунько Т.В., Кокоулин И.Е.// Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. тр. Ин-т геотехн. мех. НАН Украины.- Днепропетровск, 2004.- вып. 50.- с. 244-252.

УДК 622.4:622.82

Инж. И.А. Яценко
(Департамент по чрезвычайным
ситуациям и охране труда Министерства
угольной промышленности Украины)

**ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РЕЖИМА ПРИ
УСЛОВИИ ВОЗМОЖНОГО ОСЛОЖНЕНИЯ ПРОТЕКАНИЯ
ЭКЗОГЕННОГО ПОЖАРА ВЗРЫВОМ МЕТАНА**

Розроблено метод імітаційного моделювання процесів повіторозподілу у шахтних вентиляційних мережах з урахуванням можливості виникнення критичних концентрацій метано-повітряної суміші, при яких можливе виникнення їх вибуху.

**THE PRINCIPLES CHOICE OF VENTILATION REGIME
BY THE CONDITION OF POSSIBLE COMPLICATION PROCEED
OF EXOGENIC FIRE BY EXPLOSION OF METHANE**

The method of imitation modeling processes of air-distribution in the mine ventilation networks with the calculation possibility rise of critical methane-air concentrations, in the time of which may be arise the explosion, was exploited.

Наиболее распространенным и в то же время самым опасным видом подземных аварий является экзогенный пожар. Возникая в ограниченном пространстве горной выработки, он способен в короткий срок нарушить нормальное проветривание шахты. Развиваемая очагом пожара тепловая депрессия в ряде случаев достигает величины, превышающей значение депрессии, создаваемой вентиляторами главного проветривания (ВГП) в наклонных выработках с нисходящим проветриванием. Будучи указанной депрессии противонаправлена, она обуславливает опрокидывание вентиляционной струи и непредвиденное загазирование шахтной вентиляционной сети (ШВС) газообразными продуктами горения. Даже в случаях, когда описанное явление не имеет места, токсичные газообразные продукты, распространяясь в соответствии с направлением воздушных потоков, способны вызвать поражение работающих в шахте людей. Кроме того, при пожарах зачастую уничтожается или повреждается ценное горношахтное оборудование. Если пожар своевременно не ликвидирован, су-