

$$\text{Re} \gg \frac{c_1}{c_2} \quad (19)$$

вытекает

$$c_1 \frac{\mu}{d^3} Q \ll c_2 \frac{\rho}{d^4} Q^2, \quad (20)$$

и мы можем пренебречь в (15) первым слагаемым, таким образом приходя к выражению (13).

Итак, из всего предыдущего рассмотрения можно сделать вывод, что двухчленный закон аэродинамического сопротивления в форме (14) или (15) является достаточно универсальным в широком диапазоне чисел Рейнольдса и может быть рекомендован для характеристики участка горной выработки, как участка вентиляционной сети. Для его применения на практике на одном участке должна быть сделана как минимум пара измерений падения давления ΔP при двух разных значениях расхода Q . После этого может быть составлена система двух линейных уравнений относительно R_1 и R_2 , решение которой даст их значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З. Определение аэродинамических сопротивлений вентиляционных сетей [Текст] / Н. З. Битколов, И. И. Иванов. – С. П. Б.: ФГУПНИИ промышленной и морской медицины, 2011 – 4 с.
2. Гухман А. А. Введение в теорию подобия [Текст] / А. А. Гухман. М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
3. Веретенник В. Н. О математической модели нестационарного движения крыльчатки и способе измерений малых скоростей воздушного потока [Текст] / В. Н. Веретенник. – Днепропетровск.: ИГТМ НАН Украины, 2004 – 4с.

УДК 622.451.001.24

Канд. техн. наук Т.В. Бунько
(ИГТМ НАН Украины)

К ВОПРОСУ ОБ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ С НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЕЕ РЕАЛЬНОМУ АНАЛОГУ

Сформульовані основні принципи, визначення та критерії адекватності математичної моделі шахтної вентиляційної системи з невизначеною структурою та аеродинамічними параметрами її реальному аналогу, та розроблено комплексний критерій структурно-параметричної ідентифікації шахтної вентиляційної системи в умовах невизначеності даних.

TO QUESTION ABOUT ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODEL OF MINE VENT NETWORK WITH INDEFINITE STRUCTURE AND AERODYNAMIC PARAMETERS TO ITS REAL ANALOGUE

Basic principles, determinations and criteria of adequacy of mathematical model of mine vent network with an indefinite structure and aerodynamic parameters are formulated to its real analogue, and the complex criterion of structure-parametrycal authentication of mine vent network in the conditions of vagueness of information is developed.

Под адекватностью математической модели (в частности, шахтной вентиляционной системы (ШВС) понимается степень соответствия результатов, полученных по разработанной модели, данным эксперимента или тестовой задачи. Проверка адекватности модели должна установить, что точность полученных результатов соответствует точности, оговоренной в техническом задании (если таковое было разработано) [1].

Неадекватность результатов математического моделирования реальному объекту возможна, по крайней мере, по трем причинам:

- 1) топология ШВС и ее математической модели существенно отличаются;
- 2) значения задаваемых параметров модели не соответствуют допустимой области этих параметров [2];
- 3) константы и параметры в использованных определяющих соотношениях установлены не точно.

При устранении причин первой группы необходимо сравнить граф математической модели (ММ) и реальной ШВС. Для определения степени подобия графов двух математических моделей в настоящее время существует два основных подхода: поиск максимального изоморфного пересечения и методы преобразования одного графа в другой (MED) [3-5]. В MED вводятся операторы редактирования графа, такие, как удаление, добавление, замещение вершин и т.д. В методах, основанных на поиске максимального изоморфного пересечения, для двух графов производится поиск пар подграфов, принадлежащих этим двум графам, которые являются изоморфными друг другу и определяют изоморфное пересечение. Изоморфное пересечение, имеющее максимальное количество вершин, определяет меру подобия между графами. Однако эти методы неприменимы для определения степени подобия ММ и реальной ШВС, что обуславливает необходимость разработки комплексного критерия структурной и функциональной адекватности ММ ШВС реальному объекту.

Второй и третий случаи причин неадекватности требуют дополнительного исследования аэродинамических параметров как моделируемого объекта (с целью накопления новой дополнительной информации о его поведении), так и самой модели (с целью уточнения границ ее применимости).

Задача определения изоморфизма (подобия) исходной ШВС с неопределенной структурой и параметрами и моделирующего графа, включающего многополюсники [6], отличается следующими особенностями:

- 1) выполняется анализ реального объекта и моделирующего графа, заданного списком кодов; ошибки, привнесенные при кодировании, должны быть обнаружены до начала вентиляционных расчетов;
- 2) вершины моделирующего графа имеют разное количество инцидентных ветвей;
- 3) моделирующий граф отражает выработки ШВС, имеющие разное технологическое назначение (основные и дополнительные объекты проветривания, вентиляторы главного проветривания (ВГП), выработки, транспортирующие свежую и исходящую струи воздуха, и т.д.);

4) ветви ШВС и моделирующего графа являются ориентированными или частично ориентированными по направлению вентиляционных потоков.

В этом случае моделируемая ШВС и ее реальный аналог являются частично подобными.

Будем считать, что исходная (реальная) ШВС описывается графом $G_u(X_u, U_u)$, где X_u, U_u – множества узлов и ветвей реальной ШВС соответственно, а математическая модель ШВС определяется графом $G_m(X_m, U_m)$, где X_m, U_m – множества узлов и ветвей модели ШВС соответственно.

При переходе от реальной сети к ее отображению графовой структурой должен соблюдаться изоморфизм. При этом возникает следующая задача определения, в каком случае можно считать, что граф $G_u(X_u, U_u)$ изоморфен графу $G_m(X_m, U_m)$ (в дальнейшем изложении индексом „ u ” обозначаются параметры исходной, а индексом „ m ” – моделирующей ШВС).

В простейшем случае графы равны ($G_u = G_m$), если совпадают составляющие их множества ветвей ($X_u = X_m$) и узлов ($U_u = U_m$) [7].

Для лучшего понимания приведем понятие изоморфности из [8].

Граф G_u называется изоморфным графу G_m , если существует взаимно однозначное отображение f множества вершин графа G_u на множество вершин графа G_m . В случае ориентированного графа это отображение (биекция) также должна сохранять ориентацию ребра. В случае взвешенного графа биекция также должна сохранять вес ребра [9-11].

Размерностью топологического подобия исходной ШВС $G_u(X_u, U_u)$ и моделирующего графа $G_m(X_m, U_m)$ является количество элементов их изоморфного пересечения – множества U' , характеризующих некоторые свойства топологических элементов множеств U_u и U_m .

Пусть $U'_u \subset U_u$ и $U'_m \subset U_m$. Если $U'_u \equiv U'_m$, то сети G_u и G_m топологически подобны по изоморфному пересечению U'_u и U'_m .

Если обозначить количество элементов множества U' через $\dim(U')$, то можно ввести понятие отношения подобия.

Отношением топологического подобия сети G_m к сети G_u является число

$$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\dim(U')}{n_u}, \quad (1)$$

где n_u - количество ветвей реальной ШВС.

На угольных шахтах, имеющих один ВГП, возможность применения комбинированных схем проветривания 1-К сопряжена с трудностью управления струями в системах с параллельным соединением выработок (схема 1-К), поскольку установка регулирующего окна в струе исходящей «на массив» не позволяет существенно повысить расход исходящей струи «на выработанное пространство» [12]. При достижении некоторого значения сопротивления окна дальнейшее увеличение этого сопротивления дает очень малый выигрыш в количестве воздуха в усиливаемой струе, но при этом значительно снижается ко-

личество воздуха в струе с окном. Использование же вспомогательного вентилятора для увеличения расхода отводимого воздуха дает такой же результат, что и уменьшение аэродинамического сопротивления выработки [13].

Рассмотрим проветривание выемочного участка по комбинированной схеме 1-К, представляющей собой сложную аэродинамическую систему выработок с двумя задействованными на нее вентиляторами главного проветривания: ВЦД-31,5 (западный вентиляционный ствол №1) и ВЦД-47,5 (восточный вентиляционный ствол №1).

Схема вентиляционной сети выемочного участка (реально существующая) представлена на рис 1. На нем приведены следующие обозначения: 1-2 – конвейерный штрек (воздухоотводящая выработка); 2-3 – очистная выработка; 3-4 – вентиляционный штрек (исходящая «на массив»); 3-5 – неконтролируемая воздухоотводящая выработка (исходящая «на выработанное пространство»); 5-8 – воздухоотводящая выработка (от разрезной печи до фланговой выработки) в охранном целике; 7-8 – фланговая выработка с подсвежающей струей воздуха; 6-7 – часть конвейерного штрека (от разрезной печи до фланговой выработки) в охранном целике; 2-6 – часть конвейерного штрека позади фронта очистных работ; 6-5 – утечки через разрезную печь; 2-2' – движение утечек от сопряжения очистной выработки с конвейерным штреком к месту разделения этих утечек в направлении к разрезной печи и «отростком» газоотсоса; 2'-5 – движение утечек через выработанное пространство от места их разделения (точка 2') к сопряжению разрезной печи с неконтролируемой воздухоотводящей выработкой; 2'-ГО – движение утечек по примыкающей части выработанного пространства к призабойному пространству от места их разделения (точка 2') к «отросткам» газоотсоса (ГО); точки 3', 3'', 3''' – соответственно, низ (5...10 м от входа) очистной выработки; 3'-2' – движение утечек из нижней части очистной выработки к месту их разделения; 3''-2'' – утечки из средней части очистной выработки в сторону примыкающей части выработанного пространства, по которому движутся утечки к «отросткам» газоотсоса от места разделения (точка 2'); 3'''-2''' – направление движения утечек в верхней части лавы (к забою при неработающем, а на выработанное пространство – при работающей подземной дегазационной установке (ПДУ)); 2'''-3''' и 2'''-3 – направление движения утечек (притечек) из примыкающей части выработанного пространства, соответственно, в верхнюю часть призабойного пространства и к сопряжению последнего с вентиляционным штреком при неработающем ГО.

При неработающем ГО движение утечек в обратном направлении – от 2'' до 3''. При неработающей ПДУ количество утечек в сторону забоя зависит от проницаемости охранной полосы из БЖБТ, отставания ее от фронта очистных работ и аэродинамического сопротивления входа неконтролируемой воздухоотводящей выработки.

Использование в комбинированной схеме проветривания двух ВГП позволяет с помощью регулирующих устройств управлять вентиляционными струя-

ми в значительно более широких пределах, увеличить расход струи, исходящей «на выработанное пространство», а также общее количество воздуха, поступающего на выемочный участок.

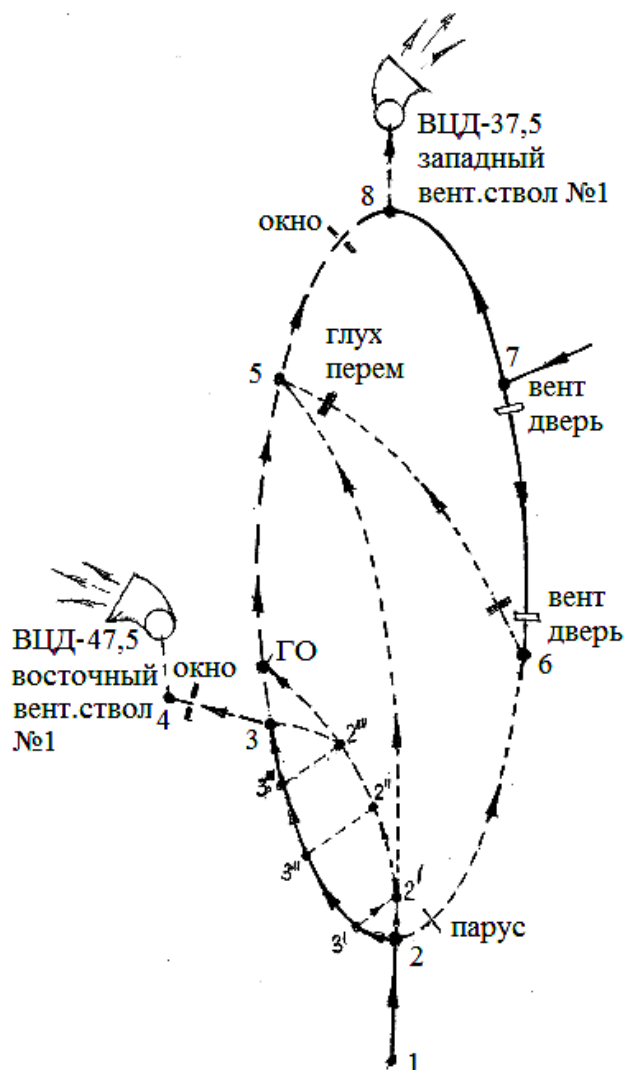


Рис. 1- Схема вентиляционной сети выемочного участка (10-я западная лава по пласту l_1) при комбинированной схеме проветривания 1-К с двумя задействованными на нее ВГП.

Анализ рис. 1 показывает, что представленная схема мало пригодна для использования в ММ. Прежде всего – она статична и не позволяет проследить динамику изменения схемы проветривания в ходе ведения горных работ, именно: учет / неучет газоотсоса и учет подсвеживания через узел 7. Эти оба фактора существенно изменяют воздухораспределение в пределах выемочного участка. Поэтому введенные выше определения важны для оценки топологического подобия G_u и G_m на различных этапах отработки выемочного столба.

Выемочный участок, представленный на схеме рис. 1, проходит в своем развитии несколько стадий, а значит – и используется несколько схем проветривания (рис. 2).

Базовой сетью моделируемых ШВС (рис. 2) являются (1,2), (2,3), (3,5) – две последних – лава, (2,6) (5,8), (6,8) и утечки (6,5) и (2,5) (на рис. 2 последняя – (2',5)). Поэтому U_m на первом этапе моделирования включает все эти ветви (рис. 2.2-1а), а $U_u = \{(1,2), (2,2'), (2,3'), (3',2'), (3',3''), (2',2''), (3'',2''), (3'',3'''), (2'',2'''), (3''',3), (3''',2'''), (2''',ГО), (3,4), (3,ГО), (ГО,5), (2',5), (2,6), (6,5), (6,7), (5,8), (7,8)\}$. Тогда $\dim(U') = 8$, $n_u = 22$, и $\lambda(G_m, G_u) = \frac{8}{22} = 0,363$.

Как видно, отношение топологического подобия мало. Объясняется это тем, что подсеть между узлами 2 и ГО излишне, без достаточного на то основания, детализирована; точки 2', 2'', 2''', 3', 3'', 3''' не имеют обоснованных координат и в дальнейшем могут быть заменены упрощенным эквивалентом. Поэтому этот критерий является необходимым, но не достаточным.

Графы, представленные на рис. 2а – 2г, даже визуально различны; так же различна и размерность их топологического подобия как между собой, так и с базовой сетью (рис. 2). Если отвлечься от сети на рис. 2, которая перестает существовать в представленном виде уже на этапе рис. 2а, интерес представляет исследование $\lambda(G_M^1, G_M^2), \lambda(G_M^2, G_M^3), \lambda(G_M^3, G_M^4)$, (верхний индекс – порядковый номер промежуточного рис. 2), т.е. исследование отношений топологического подобия для последовательно моделируемых этапов состояния ШВС в различные периоды отработки столба.

Только в знаменателе (1) будет находиться на каждом последующем этапе n_M^k , а в числителе – $\dim(U_{M,k+1}')$.

Для нашего примера

$$\lambda(G_M^1, G_M^2) = \frac{11}{8} = 1,375 \quad (2)$$

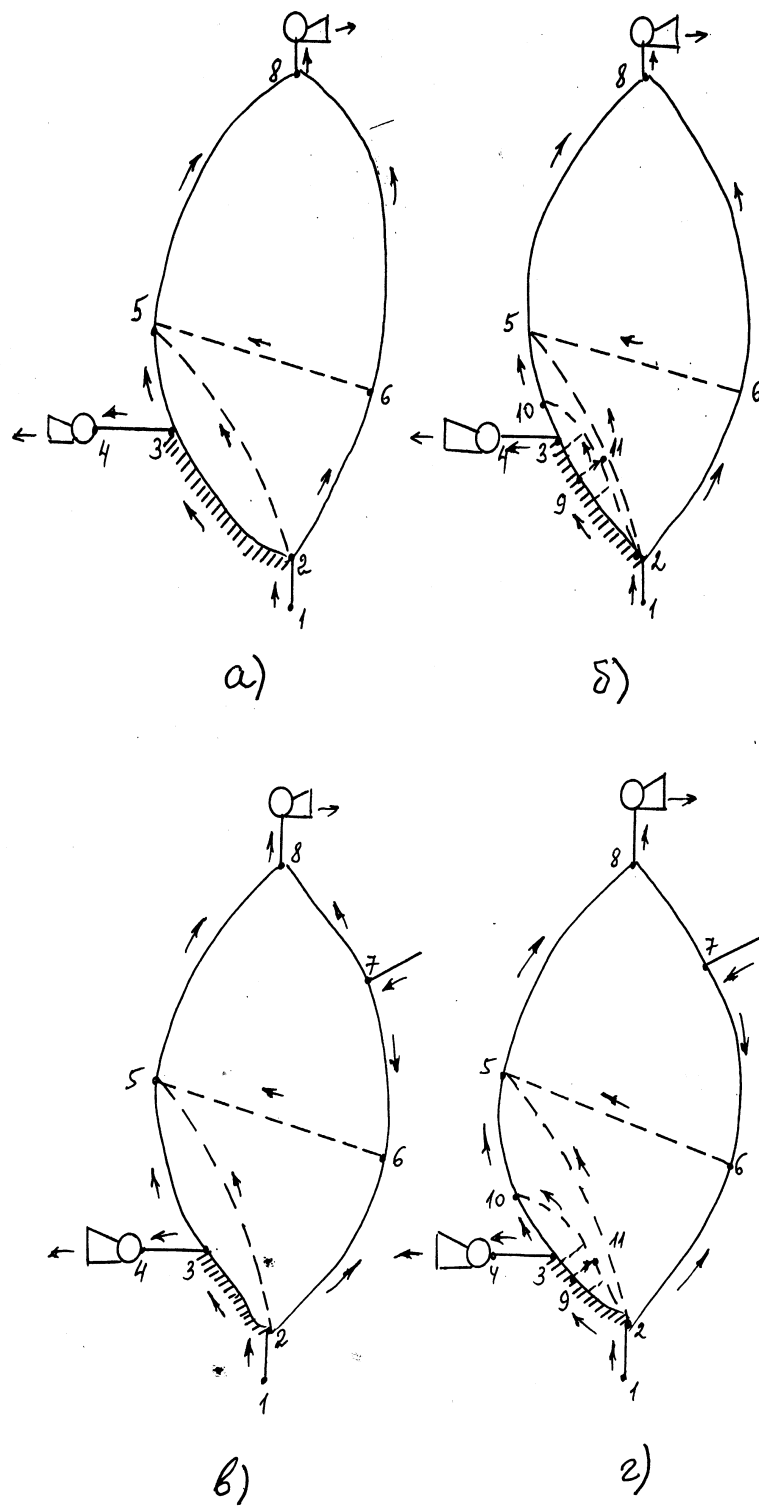
$$\lambda(G_M^2, G_M^3) = \frac{11}{11} = 1 \quad (3)$$

$$\lambda(G_M^3, G_M^4) = \frac{13}{11} = 1,181 \quad (4)$$

Для проверки можем вычислить $\lambda(G_M^4, G_u) = \frac{13}{22} = 0,59 \quad (5)$

Физический смысл выражений (2) – (4) ясен. На этапе G_M^1 использовалась наиболее простая схема проветривания выемочного участка $\{(2,3), (3,5)\}$ – лишь за счет депрессии двух ВГП, работающих на общую сеть. При этом не учитывалось движение газозооусной смеси на участке (2-3-ГО) рис. 2.2 через выработанное пространство лавы (2,3).

Тем самым из рассмотрения исключались искусственно закодированные выработки (2,3'), ..., (2''',3), параметры которых вынужденно необходимо задавать в условиях неопределенности: замеры на участке 2 – ГО просто невозможны.



- проветривание лавы в обычном режиме (рис. 2а);
- проветривание лавы с использованием газоотсоса (рис. 2б);
- проветривание лавы с подсвежением без использования газоотсоса (рис. 2в);
- проветривание лавы с использованием газоотсоса и подсвежением (рис. 2г)

Рис. 2 - К обоснованию обобщенного критерия подобия

$\lambda(G_M^1, G_M^2) > 1$. Это также понятно: включен газоотсос в точке 10, и вступила в работу схема между узлами 2,3,10, правда, в упрощенном виде. Поскольку, как было сказано, замеры во всех точках выработанного пространства лавы невозможны, целесообразно заменить ряд утечек схемы рис. 2.9 (3', ..., 2'') эквивалентом (9,11), граничные точки которого выбраны с учетом возможности замеров аэродинамических параметров в них. Увеличение $\lambda(G_M^1, G_M^2)$ вынуждено: в модель включено дополнительное возмущающее воздействие – газоотсос, вызывающее необходимость усложнения модели.

Третий вариант - $\lambda(G_M^2, G_M^3)$ характеризует ситуацию, когда включается подсвеживание вентиляционной струи через узел 7; при этом свежий воздух через (6,5) поступает на сопряжение лавы с вентиляционным штреком. Однако в рассматриваемом случае газоотсос отключен и топологическая размерность сети осталась прежней. $\lambda(G_M^1, G_M^2) = 1$, т.е. сети случаев рис. 2б) и 2в) абсолютно топологически подобны.

Четвертый вариант G_M^4 характеризует ситуацию, наиболее приближенную к варианту G_u (рис. 1). Учитывается как подсвеживание струи, так и работа газоотсоса. Моделируемая G_M^4 еще более усложняется, и $\lambda(G_M^3, G_M^4) = 1,181$.

В результате проделанных операций $\lambda(G_M, G_u)$ увеличилось с 0,363 до 0,59. Отношение топологического подобия повысилось, однако ошибкой было бы считать целью модернизации U_m достижение показателя $\lambda(G_M, G_u) = 1$. Достичь такого значения невозможно, поскольку имеет место неопределенность значений параметров формирования U_m . Методами структурной идентификации достичь такого показателя можно, структурно-параметрической – нет. Поэтому актуальна другая задача: получить приемлемое решение при условии $\lambda(G_M, G_u) \rightarrow \min$, т.е. решить задачу потокораспределения в ШВС на основе обобщенного количества исходных параметров, доступных для получения в реальных условиях.

В более общем случае, если номера узлов и дуг исходного и моделируемого графов не совпадают, необходимо использовать критерий, смысл которого заключается в том, что каждому узлу исходного и моделируемого графа ставится в соответствие некоторое число – степень узла, определяемая как число ветвей, инцидентных данному узлу x $s(G, x)$. 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. В таком предположении необходимым условием топологического подобия графов $(G_u = G_m)$ является равенство их векторов степеней [14, 15]. Использование этого критерия эффективно при поиске топологических ошибок, связанных с ошибочным добавлением или потерей элементов ШВС (узлов или ветвей).

Наиболее важным, дополняющим и характеризующим топологическое подобие G_u и G_m показателем, является их структурное подобие, т.е. подобие множеств $U'_{потр}$ их основных и дополнительных потребителей 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. Направления движения воз-

духа и их значения в элементах ШВС, т.е. воздухораспределение в ней, определяются ее топологией и аэродинамическими сопротивлениями выработок и путей утечек воздуха, т.е. потоковой структурой ШВС.

При анализе адекватности потоковых структур моделируемой и реальной ШВС необходимо принимать во внимание, что в реальной 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), а значит – реально перенесены в $G_m(X_m, U_m)$. Этим и обусловлена необходимость использования не критерия $\lambda(G_m, G_u) \rightarrow 1$, а $\dim(G_m) \rightarrow \min$ при соблюдении прочих равных условий. Поэтому исследование реальной и моделируемой сетей на соответствие потоковых структур является важным этапом построения математической модели ШВС.

Размерностью подобия потоков исходной ШВС $G_u(X_u, U_u)$ и моделирующего графа $G_m(X_m, U_m)$ является размерность их изоморфного пересечения по направленным ветвям, т.е. ветвям $(i, j) \in \vec{U}'$, в которых направление воздуха известно.

Пусть $\vec{U}'_u \subset U_u$ и $\vec{U}'_m \subset U_m$. Если $\vec{U}'_u \equiv \vec{U}'_m$, то сети G_u и G_m топологически подобны по изоморфному пересечению \vec{U}'_u и \vec{U}'_m .

В примере рис. 2а : $\vec{U}' = \{(1,2), (2,3), (3,4), (2,6), (6,5), (2,5), (5,8), (6,8)\}$, и $\lambda(G_m, G_u) = \frac{8}{22} = 0,363$.

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

$$U_m = \{u(i, j) / i \in X_m \ \& \ j \in X_m \} \quad (6)$$

К оценке количественного соответствия результатов моделирования можно приступать 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 на данном этапе сравнения топологически подобны. Структурное подобие определится на направленном графе.

Размерностью структурного подобия моделируемой ШВС $G_u(X_u, U_u)$ и моделирующего графа $G_m(X_m, U_m)$ является количество элементов их изоморфного пересечения $U'_{o.}$, т.е. по ветвям, отображающим объекты проветривания.

Пусть $U'_{o.u} \subset U_u$ и $U'_{o.m} \subset U_m$. Если $U'_{o.u} \equiv U'_{o.m}$, то сети G_u и G_m топологически подобны по изоморфному пересечению $U'_{o.}$ и $U'_{o.}$.

$$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\dim(U_o')}{n_{ou}} \quad (7)$$

Если на рис. 2а объектами проветривания являются лава $\{(2,3), (3,5)\}$ и утечка (3,4) - $U'_{нотр.у} = \{(2,3), (3,5), (3,4)\}$, $U'_{нотр.м} = \{(2,3)\}$, их пересечение – ветвь (2,3), и $\lambda(G_m, G_u) = \frac{1}{3} = 0,333$.

Критерий функционального подобия, отражающий основные аэродинамические связи объектов проветривания с ВГП и узлами поверхности, может быть определен следующим образом. Для заданной исходной сети $G_u (X_u, U_u)$. 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 указанных ветвей и вводится это критерий.

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.

Размерностью функционального подобия моделируемой ШВС $G_u(X_u, U_u)$ и моделирующего графа $G_m(X_m, U_m)$ является количество элементов их изоморфного пересечения по ветвям $\mu(U_o^m)$ и $\mu(U_o^u)$, отображающим объекты проветривания, пути движения воздуха к ним и пути отвода загрязненного воздуха к вентиляционным стволам {базовая часть подобия} $U'_{под}$.

$$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\mu(U_o^m)}{\mu(U_o^u)} \quad (8)$$

Пусть $U'_{под.у} \subset U_u$ и $U'_{под.м} \subset U_m$. Если $U'_{под.у} \equiv U'_{под.м}$, то сети G_u и G_m топологически подобны по изоморфному пересечению $U'_{под.у}$ и $U'_{под.м}$.

В примере рис. 1, если путь движения воздуха к лаве (2,5) – ветвь (1,2), а путь отвода загрязненного воздуха - ветвь (5,8), то $U'_{под.у} = \{(1,2), (2,5), (5,8)\}$, а $U'_{под.м} = \{(1,2), (2,8)\}$. Лава (2,5) в списке кодов моделирующего графа отсутствует; она включена в состав более крупного топологического объекта, дополнительно содержащего отрезок маршрута удаления отработанного воздуха к узлу 8. Таким образом, $U'_{под} = \{(1,2)\}$, $\lambda(G_m, G_u) = \frac{1}{3}$, а не 0,375, как должно было бы быть, и подобие основных аэродинамических связей не соблюдается. Однако это всего лишь свидетельствует о топологической ошибке кодирования ШВС: замена ветви (3,5) при составлении моделирующего графа на (3,8) не из-

менила аэродинамические параметры участка (2,8), однако требует дополнительной модернизации моделирующего графа. Это является примером нахождения ошибок кодирования с использованием векторов степеней вершин графа.

При оценке адекватности количественных характеристик (расхода воздуха, депрессий и других аэродинамических параметров выработок шахты) математической модели ШВС, включающей нелинейные многополосники, следует учитывать отличия в точности исходных данных для каждого типа объектов ШВС, классификация которых приведена в [6], граничные условия для каждого параметра и соответствующих им моделирующих значений. Аналитические выражения критериев адекватности и их максимальных значений по расходу воздуха, депрессии, аэродинамическим сопротивлениям приведены в [15].

Общий смысл приведенных критериев заключается в том, что ММ ШВС должны в пределах заданной точности отражать воздухораспределение, связанное с изменением аэродинамических сопротивлений исходной сети и динамику топологии.

Наиболее часто встречающейся ошибкой при построении ММ многовентиляторных ШВС является то, что топологически подобной модели приписываются произвольно подобранные аэродинамические сопротивления. В дальнейших расчетах воздухораспределения при использовании такой ММ 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 ММ ШВС должны выдвигаться требования к погрешности вычислений по предложенным критериям адекватности.

Общеизвестно, что параметрическая адекватность модели объекту оценивается лишь при наличии экспериментальных данных, полученных на объекте моделирования, с помощью критерия адекватности. Например, широко применяется статистический критерий Фишера; для нелинейных моделей чаще используются так называемые квадратичные оценки рассогласования указанных экспериментальных ($y^{экc}$) и расчетных (y^{pac}) значений переменных, например, в следующей форме:

$$P = \sum_{i=1}^n \beta_i (y_i^{экc} - y_i^{pac})^2 \quad (9)$$

где β_i - весовые коэффициенты, с помощью которых учитываются значимость и точность отдельных измерений при общем количестве их точек n . При этом решается задача минимизации критерия, в котором искомыми являются корректируемые значения параметров. Данный прием применяется также в адаптивных моделях, в которых используются настроенные параметры для приведения в соответствие модели и объекта с изменяющимися характеристиками [1, 16].

В решении задачи идентификации параметрами ШВС являются $Q(i,j)$, $H(i,j)$, $Q^*(i,j)$, $H^*(i,j)$, $R(i,j)$, $R^*(i,j)$ - истинные и замерные значения расхода воздуха, депрессии и аэродинамического сопротивления выработки; при этом должны учитываться $\delta^q(i,j)$, $\delta^h(i,j)$, $\delta^r(i,j)$ - соответственно значения достоверности задания величин $Q(i,j)$, $H(i,j)$, $R(i,j)$ в выработке (i,j) .

Критерий параметрической адекватности ШВС с неопределенной структурой и аэродинамическими параметрами представляет функционал вида:

$$F = \sum_{(i,j) \in U} \left[\frac{1}{(\delta_{(j,j)}^q)^2} (Q(i,j) - Q^*(i,j))^2 + \frac{1}{(\delta_{(j,j)}^h)^2} (H(i,j) - H^*(i,j))^2 \right] \rightarrow \min \quad (10)$$

Порядок вычисления обобщенного критерия структурно-параметрической идентификации ШВС следующий.

1. Проведение замеров воздуха и депрессии в выработках ШВС.
2. Определение рабочих характеристик ВГП.
3. Построение топологической модели ШВС.
4. Отображение зон с неопределенной структурой и параметрами многополосниками.
5. Определение аэродинамического сопротивления горных выработок и путей утечек воздуха по результатам замеров воздуха и депрессии.
6. Анализ результатов моделирования на ПЭВМ. Оценка адекватности модели.
7. Корректировка аэродинамических сопротивлений элементов математической модели.
8. Решение с использованием полученной модели задач оперативного управления, перспективного планирования и совершенствования ШВС.

Сводный комплекс критериев структурно-параметрической адекватности в решении задач расчета вентиляционных сетей приведен в табл. 1.

При внесении возмущений в ветвь ШВС, реализуемых изменением аэродинамического сопротивления, необходимо использовать критерии параметрической группы, а при внесении изменений топологических изменений в ШВС при проверке ее адекватности - критерии как топологической так и параметрической групп.

Максимальные значения критериев по расходу воздуха, депрессии и аэродинамическому сопротивлению выработки используются при исключении заведомо неверных результатов ВДС.

Таким образом, критерий структурно-параметрической адекватности ШВС со слабо обусловленной структурой и аэродинамическими параметрами комплексно включает критерий подобия и критерий максимизации. Критерий подобия обеспечивает минимизацию размерности моделирующего ШВС графа $\min \{dim G_m\}$ и определяется мерой топологического, структурного и функционального подобия ШВС и ее расчетной модели

Таблица 1- Комплекс критериев адекватности ШВС с неопределенной структурой и аэродинамическими параметрами

Наименование критерия	Аналитическое выражение	Математический смысл выражения
Топологическая адекватность		
Топологическое подобие	$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\dim(U')}{n_u}$	Отношение топологического подобия
Структурное подобие	$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\dim(U'_o)}{n_{ou}}$	Отношение структурного подобия
Функциональное подобие	$\lambda(G_m, G_u) = \frac{\mu(U'_o^m)}{\mu(U'_o^u)}$	Отношение функционального подобия
Параметрическая адекватность		
Расход воздуха	$\frac{1}{(\delta_{(j,j)}^q)^2} (Q(i, j) - Q^*(i, j))^2$	Разность между расчетным и измеренным значениями
Депрессия	$\frac{1}{(\delta_{(j,j)}^h)^2} (H(i, j) - H^*(i, j))^2$	Разность между расчетным и измеренным значениями
Аэродинамическое сопротивление	$\frac{1}{(\delta_{(j,j)}^r)^2} (R(i, j) - R^*(i, j))^2$	Разность между расчетным и истинным значениями

Критерий максимизации параметрической адекватности моделируемых процессов $\max\{ad G_m\}$, аддитивно учитывает разности между измеренными и расчетными аэродинамическими характеристиками элементов сети с учетом весовых коэффициентов, отражающих достоверность и значимость проведенных измерений при частичных анемометрических и депрессионных съемках ШВС. Это позволяет повысить точность проведения вентиляционных расчетов и, тем самым, обеспечить безопасность ведения горных работ.

Комплексный критерий структурно-параметрической адекватности ММ ШВС реальному объекту может быть использован при разработке методов его структурно-параметрической идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарубин Ф.С. Математическое моделирование в технике. Учеб. для вузов / Под редакцией Ф.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. 21, заключительный).
2. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-05: Утверждены приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда от 16.11.2004 № 257. – Киев, 2005. – 196с.
3. Касьянов В.Н. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В.Н. Касьянов, В.А. Евстигнеев. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 1104с.
4. Свами М. Графы, сети и алгоритмы: пер. с англ. / М. Свами, К. Тхуласираман. - М.: Стройиздат, 1990. - 424с.
5. Харари Ф. Теория графов. / Ф. Харари. – М.: Либроком, 2009 – 392с.

6. Бокий Б.В. О формализованном инвариантном способе описания нелинейными многополюсниками зон шахтной вентиляционной сети с неопределенными структурой и аэродинамическими параметрами / Б.В. Бокий, Т.В. Бунько // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2011. – вып. 92. – С. 264-274.
7. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. Учебник для вузов. 5-е изд. / Ф.А. Новиков. – СПб: Питер, 2004. – 364с.
8. Гринберг Э.Я. Использование некоторых инвариантных характеристик для установления изоморфизма графов / Э.Я. Гринберг, А.О. Кац // Латвийский мат. ежегодник. – 1977. – 21. – С. 124-135.
9. Дискретная математика для программистов. Изоморфизм направленных графов: Пер. с англ. - СПб.: Бинном. Лаборатория знаний, 2010. - 627с.
10. Островерхая Л.Д. Критерий изоморфизма и группа автоморфизмов графа / Л.Д. Островерхая, Н.А. Островерхий // Теория графов. - Киев, 1977. – С. 63-70.
11. Харари Ф. Теория графов. / Ф. Харари. – М.: Либроком, 2009 – 392с.
12. Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика // Ф.А. Абрамов - М.: Недра, 1972. - 274 с.
13. Скочинский А.А. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. – М.: Углетехиздат, 1959. – 457с.
14. Зыков А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. - М.: Наука, 1987.- 384 с.
15. Булат А.Ф. Структурная идентификация шахтной вентиляционной сети / А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин // Уголь Украины. – 2004. - № 1. – С. 31-35.
16. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - Изд. 13-е испр. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544с.

УДК [622.831.325.3:621.643.001.24].004.1

Мл. науч. сотр. Л.А. Новиков
(ИГТМ НАН Украины)

РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКОВ ВАКУУМНОГО ДЕГАЗАЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА

Розглянуте питання впливу дисперсного складу середовища, що рухається, на її газодинамічні параметри та видаткові характеристики ділянок шахтного дегазационного трубопроводу

CONSUMABLES CHARACTERISTICS SECTIONS OF VACUUM PIPELINE DEGASSING

The question influence of the dispersed medium moved on its gas-dynamic parameters and consumables characteristics of mine sites degassing pipeline

Как известно, загрязненность вакуумного дегазационного трубопровода, нарушение его герметичности, а также присутствие в потоке метановоздушной смеси (МВС) взвешенных компонентов, приводят к возрастанию потерь давления в газопроводной сети [1, 2], изменению концентрации метана, отклонению расходных характеристик участковых трубопроводов от их нормативных значений. В результате повышаются энергозатраты на транспортировку МВС и снижаются показатели эффективности функционирования дегазационной системы.

В процессе развития горных работ увеличивается число последовательных соединений участковых трубопроводов и возрастает их суммарное гидравлическое сопротивление. По этой причине прокладывают дополнительные параллельные участки трубопровода, длина и диаметр которых определяются с учетом необходимых расходных характеристик [3].

При расчетах газодинамических параметров участковых трубопроводов, как правило, рассматривают «чистую» МВС. Однако в реальных условиях движу-