

УДК 622.451:658.512.007

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,
Кокоулин И.Е., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

Жалилов А.Ш., инженер
(ГП «Селидовуголь»)

Бокий А.Б., аспирант
(ГВУЗ «ДонНТУ»)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. науч. співр.,
Кокоулін І.Є., канд. техн. наук, ст. науч. співр.
(ІГТМ НАН України)

Жалілов А.Ш., інженер
(ДП «Селідоввугілля»)

Бокій О.Б., аспірант
(ДВУЗ «ДонНТУ»)

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ШАХТНИХ
ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ, ЯКІ РЕКОНФІГУРУЮТЬСЯ, З
ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ**

Bunko T.V., D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Kokoulin I.Ye., Ph. D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

Zhalilov A.Sh. M.S (Tech.)
(SE «Selidovugol»)

Bokij A.B., Doctoral student
(SHEI «NMU»)

**PERFECTION OF METHOD CALCULATION OF RECONFIGURATED
MINE VENTILATION SYSTEMS WITH THE USE OF PARALLEL
CALCULATIONS**

Аннотация. Рассмотрены особенности реконфигурируемых шахтных вентиляционных систем: топологические изменения в пространстве, неравномерность обеспечения объектов проветривания воздухом, существенная неопределенность аэродинамических параметров элементов. Для таких вентиляционных систем, включающих ветви с разностепенными законами движения воздуха, предложено использовать кластерное моделирование и методы узловых невязки. Предложена адаптация этих методов к расчету реконфигурируемых вентиляционных систем, включающих источники и пути эмиссии метана как в рудничную атмосферу, так и на земную поверхность, с применением параллельных вычислений, реализующих расчеты воздухораспределения с разностепенными законами движения воздуха и возможностями задания давлений в разных точках сети.

Тем самым может быть косвенно реализовано уменьшение эмиссии метана из выработанного пространства путем создания зоны «нулевой депрессии».

Ключевые слова: реконфигурация шахтной вентиляционной сети, воздухораспределение, методы поузловой невязки, разностепенные законы движения воздуха, эмиссия метана.

Современная угольная промышленность Украины находится на сложном этапе своего развития. Уровень добычи угля значительно снизился вследствие закрытия большого количества шахт, прекращение работы ряда действующих шахт и нерентабельности эксплуатации ряда других. Ставится вопрос о поисках и использовании новых энергоносителей (в том числе незаслуженно забытого бурого угля, по разведанным запасам которого Украина занимает одно из первых мест в мире), а также повышении эффективности действующих угольных шахт, в первую очередь Донецкого, Приднепровского и Львовско-Волинского регионов. К числу факторов, ограничивающих производительность угольной отрасли, относится и такой технологический фактор, как шахтная вентиляция. Примерами эффективно работающих могут служить крупные шахты им. А.Ф. Засядько, «Краснолиманская», «Красноармейская-Западная» и ряд других. Исторически они сложились как комплекс более мелких горных предприятий с объединенной вентиляционной сетью (ШВС) с несколькими выемочными участками, одновременно работающими тремя и более выемочными участками, несколькими взаимосвязанными вентиляторами главного проветривания, работающими на общую сеть. Так, шахта им. А.Ф. Засядько состоит из комплекса трех в разное время введенных в эксплуатацию шахт; работы ведутся в пределах шахтных полей, разнесенных по простиранию более чем на 15 км на глубинах 1000 и более метров. Все это сильно усложняет и снижает эффективность проветривания шахт. Вопрос уже ставится не просто о расчетах и управлении шахтными вентиляционными системами, но об их реконструкции в соответствии с изменяющимися условиями эксплуатации шахт и повышении требований к промышленной безопасности ведения горных работ.

В современных условиях все большее внимание уделяется решению сравнительно недавно вошедшему в практику классу задач, в том числе и вентиляционных – реконфигурации ШВС, в число которых входят задачи реконструкции. При этом подразумевается не только совершенствование решения задач существующей ШВС, но и организация их приближения к реальным потребностям горного производства не только в традиционном плане разбавления природных и технологических вредностей и удалении их за пределы шахты, но и повышения безопасности в плане ликвидации шахтных аварий, нарушающих проветривание и создающих опасность для работающих в шахте людей. В последнее время на повестку дня поставлен еще один острый вопрос – экологическая безопасность производства, и связанные с ней вопросы взаимовлияния и взаимодействия ШВС и дегазационной системы шахты. Разработка и использование с этой целью комплексных критериев безопасного, в смысле перечисленных аспектов, функционирования шахты представляет собой актуальную научную и практическую задачу, для решения которой, в свою очередь, требуется исполь-

зование принципиально новых подходов и современных методов расчета и имитационного моделирования процессов природного и техногенного характера.

Исследования аэродинамических параметров реконфигурируемых шахт показывают, что их ШВС присущи следующие недостатки: большое аэродинамическое сопротивление выработок; отсутствие резерва по напору и производительности ВГП; распределение воздуха зачастую соответствует не реальным потребностям, а фактическому естественному распределению, сложившемуся в результате взаимодействия ВГП и ШВС.

На выемочные участки шахт подается количество воздуха, составляющее 120 % от расчетного. Поступление его к обособленно проветриваемым выработкам и камерам в общем балансе воздуха составляет 24,6 и 34,8 % соответственно [1]. Приведенные факты свидетельствуют о неудовлетворительной организации проветривания угольных шахт (избыточности подачи воздуха в шахту, снижение которого может привести к получению существенного экономического эффекта, что в нынешних условиях немаловажно), которая может быть рассмотрена как недостаток, присущий ШВС вследствие ее недостаточной адаптивности. При существующей организации проветривания вследствие неточностей, связанных с недостатками используемых расчетных методов и математических моделей, имеют место нарушения требований [2].

Аэродинамические параметры и топология вентиляционных сетей угольных шахт претерпевают, как показали исследования авторов отечественных, ближнего и дальнего зарубежья, в ходе ведения горных работ следующие изменения:

- аэродинамические сопротивления выработок отклоняются от среднего значения на 16-20 %, а также изменяются вследствие уменьшения или увеличения их длины;

- средний срок между выбытием лав составляет примерно полгода, а в течение месяца в среднем по Донбассу обновляется примерно 13 % очистных забоев, что свидетельствует о высокой динамике ШВС и о необходимости повышения ее адаптивности.

Анализ вентиляционных систем действующих шахт позволяет сделать вывод о том, что эти системы являются сложными многомерными объектами, включающими множество регулирующих устройств и источников тяги, аэродинамические параметры и топология которых изменяются в ходе развития горных работ. Таким образом, высокая динамичность параметров и топологии вентиляционных систем, усложняющая разработку методов проектирования и оперативного управления ШВС, требует проведения дополнительных исследований.

Анализ немногочисленных работ, посвященных исследованиям динамики вентиляционных систем, показал, что разработки велись в двух направлениях: анализ закономерностей изменения аэродинамических параметров и исследования изменения топологии [3].

Отличительной особенностью ШВС, как сетевого объекта управления, является наличие в ней обширных выработанных пространств, корректное отобра-

жение которых в математических моделях ШВС представляет определенные трудности. В настоящее время практически общепринятым является подход, при котором выработанное пространство отображается упрощенными участками с квадратичным законом движения воздуха в них. Для анализа состояния вопроса в ИГТМ НАН Украины предложена классификация теорий управления вентиляционными системами (рис. 1), в основе которой лежит характеристика аэродинамических параметров проводника, по которому движется воздух.

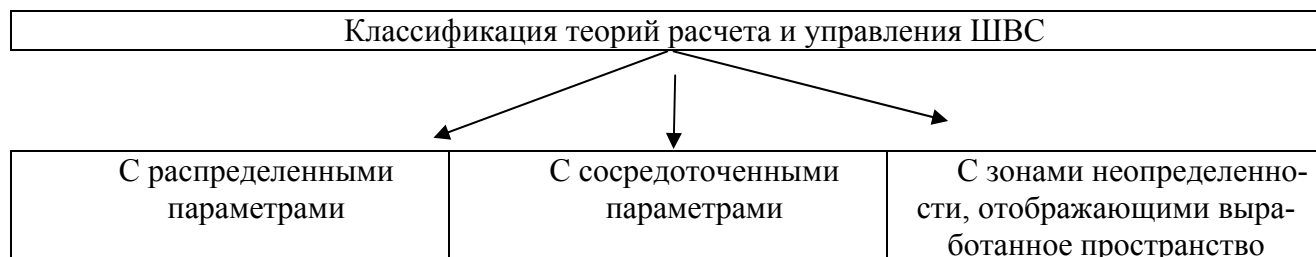


Рисунок 1 - Классификация теорий расчета и управления ШВС

В неоптимизационных методах расчета потокораспределения с математической точки зрения можно выделить два основных подхода: алгебраический и экстремальный. Первый так или иначе сводится к построению и решению замкнутой системы сетевых уравнений Кирхгофа, описывающих течение однофазного потока.

Методы расчета установившегося воздухораспределения можно разбить на три основные группы: методы линеаризации уравнений на базе метода Ньютона и его модификаций, градиентные и методы нелинейного программирования. Эти методы зачастую используются в поисковых методах решения экстремальных задач.

Матричный метод Ньютона [4,5] основан на линеаризации системы уравнений на каждом шаге вычислительного процесса, что позволяет эффективно использовать особенности топологической структуры ШВС и многократно обращаться к линейным преобразованиям контурных или узловых величин и существенно снизить размерность решаемой системы уравнений.

Методы поконтурной и поузловой увязки аэродинамических параметров ШВС представляют собой оригинальную модернизацию метода Ньютона, реализующую приближенное решение систем линеаризованных уравнений на каждой итерации.

Наибольшее развитие в последнее время получили методы последовательных приближений [4, 5]. Основным преимуществом этих методов является простота вычислительных алгоритмов и независимость скорости сходимости от начального приближения и размерности ШВС.

В табл. 1 представлены компоненты предложенного нами метода безопасного управления системой «горные выработки – выработанное пространство».

Таблица 1 - Компоненты методов безопасного управления системой «горные выработки - выработанное пространство»

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Параллельные расчеты в кластерах с разными законами движения воздуха: $G^2(X,U)$ - с квадратичным; $G^{l+2}(X,U)$ - с промежуточными | |
| Формирование вычислительных кластеров $\{G^2(X,U) \cup G^{l+2}(X,U)\}$ | Диакоптические процедуры разделения ШВС на вычислительные кластеры |
| Расчет аэрогазодинамических параметров в вычислительных кластерах | |
| В многополюсных структурах, включающих источники эмиссии метана и наличие средств вакуумирования | Разработанный метод расчета утечек воздуха в выработанном пространстве, вызванных суперпозицией обшешахтной депрессии и градиента разрежения задействованных средств вакуумирования, и полученные уравнения линий тока этих утечек в схемах проветривания с выработками, отводящими воздух за фронтом очистных работ, в целом составляют основу для разработки способа управления газовыделением из выработанного пространства. Метод позволяет определять общее количество утечек, их распределение по длине выработок, оконтуривающих выработанное пространство, и количество утечек, отбираемых системой дегазации |
| В кластере $\{G^2(X,U)\}$ | Диакоптические итерационные (контурные) методы расчета $\{P\}$ - аэродинамических параметров ШВС с квадратичным законом движения воздуха в сети горных выработок |
| В кластере $G^{l+2}(X,U)$ | Адаптация метода поузловой невязки для расчета $\{P\}$ - аэродинамических параметров ШВС с промежуточными законами движения воздуха, которые включают источники и пути эмиссии метана как в рудничную атмосферу, так и на земную поверхность. |
| На границах пространственного кластера $\{G, Z, M, P\}$ | Предложен аналитический метод выбора режимов работы ВГП (выравнивание давлений), обеспечивающий создание зоны «нулевой депрессии» для управления метановыделением из выработанного пространства. В основе его лежит расстановка определенных потенциалов P_i для некоторой последовательности узлов. Использование зоны «нулевой депрессии» позволяет косвенным образом регулировать эмиссию метана в земную атмосферу. |
| Критерий управления при выборе режимов работы ШВС | Комплексно включает следующие критерии: экономические, безопасности и экологический. Позволяет осуществлять выбор рациональных режимов функционирования ШВС из области компромиссов. |
| Структура базы данных для параллельных расчетов | Информационное обеспечение параллельных расчетов в кластерах с разными законами движения воздуха |

Схема движения воздуха в объектах ШВС может быть представлена в следующем виде (рис. 2).

| | |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X_{нов}^{вх}$ | Узлы поверхности |
| ↓ | |
| $G_{вх}^2(X,U)$ | Воздухоподводящая сеть |
| ↓ | |
| $G^{1÷2}(X,U)$ | Выемочные участки, включающие выработанное пространство с разностепенными законами движения воздуха |
| ↓ | |
| $G_{исх}^2(X,U)$ | Воздухоотводящая сеть |
| ↓ | |
| $X_{нов}^{исх}$ | Узлы поверхности |

Рисунок 2 – Схема движения воздуха в объектах ШВС

Приняты следующие обозначения: $X_{нов}^{вх}$ - множество узлов поверхности, через которые воздух поступает в шахту; $G_{вх}^2$ - кластер входящей вентиляционной струи ($n=2$); $G^{1÷2}(X,U)$ - кластер выемочного участка (включающий выработанное пространство), $n=1÷2$; $G_{исх}^2(X,U)$ - кластер исходящей вентиляционной струи ($n=2$); $X_{нов}^{исх}$ - множество узлов поверхности, через которые воздух исходит из шахты. Понятия и основные свойства кластеров охарактеризованы в [6,7].

Легко видеть, что в настоящее время при расчетах вентиляционных сетей используется аналогичная схема, но за исключением кластера выработанного пространства, что позволяет использовать классические итерационные методы. Необходимость же его учета требует применения специальных методов.

Технологическая постановка задачи

Для реконфигурируемой сети наиболее приемлем метод межузловых давлений, который заключается в уменьшении невязки разности давлений в фундаментальных узлах сети. Он наиболее приемлем по причине того, что в реконфигурируемой сети возникает несколько типов многополюсных структур [8], для которых характерна невозможность замера параметров элементов многополюсника («черного ящика»), а доступными являются лишь замеры параметров на границах.

Метановыделение из выработанного пространства существенно зависит от выбранных режимов работы ВГП. В Донбассе распространенным случаем работы шахтных многовентиляторных систем, как уже отмечалось, является связь ВГП на исходящей струе воздуха. В этом случае одним из способов уменьшения эмиссии метана из выработанного пространства является так называемая

зона «нулевой депрессии». Эта зона достигается использованием, как минимум, работы двух ВГП. Их режимы определяются из условия примерного равенства депрессий в двух точках, расположенных в пределах выработанного пространства. Таким образом, в шахте образуется зона с нулевой депрессией, движение воздуха в которой невозможно. Математически в этой зоне находятся узлы с заданным давлением P_i . Для каждого такого узла вводятся фиктивные ветви, соединяющие эти узлы с узлом отсчета давлений (узел с атмосферным давлением).

Нами предложен аналитический метод выбора режимов работы ВГП, обеспечивающих создание зоны «нулевой депрессии» для управления метановыделением из выработанного пространства. В основе его лежит расстановка потенциалов P_i для некоторой последовательности узлов. Для каждого из узлов в порядке расположения в этой последовательности определяются P_i^{min} и P_i^{max} . Далее определяются потенциалы узлов P_i в обратной последовательности по отношению к первоначальной. С использованием известных формул по давлению в начальных и конечных узлах ветвей находится их аэродинамическое сопротивление. Использование зоны «нулевой депрессии» позволяет косвенным образом регулировать эмиссию метана в земную атмосферу.

Математическая постановка задачи сформулирована в следующем виде (первый вариант ее приведен в [9]; ниже приведена расширенная постановка, учитывающая разностепенные законы движения воздуха в горных выработках).

Вентиляционная сеть задана графом $G(X, U)$, для каждой ветви которого известны длина $l(i, j)$, аэродинамическое сопротивление $R(i, j)$ и площадь поперечного сечения $S(i, j)$. Таким образом, каждая ветвь этой сети может быть однозначно определена вектором состояний $K(i, j, Q, l, S, R)$ ($Q(i, j)$ – расход воздуха в ветви – параметр, подлежащий расчету в ходе решения вентиляционных задач).

При моделировании воздухораспределения в ШВС в сети учитываются законы распределения воздуха в ШВС (1), (2), уравнение, аппроксимирующее рабочую характеристику ВГП (3), зависимости между аэродинамическим сопротивлением выработки, ее сечением, длиной и коэффициентом аэродинамического сопротивления выработки (4).

$$\sum_{(i,j) \in U_l} Q(i, j) = 0, \quad l = 1, m, \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in U_\mu} (\text{sign}(Q(i, j))R(i, j)Q^n(i, j) \pm h_e) - \sum_{(i,j) \in (U_\mu \cap U_b)} H(i, j) = 0, \quad \mu = 1, m - n + 1 \quad (2)$$

$$H(i, j) = a(i, j) - b(i, j)Q^2(i, j), \quad (i, j) \in U_b, \quad (3)$$

$$R(i, j) = \frac{\alpha(i, j)L(i, j)P(i, j)}{S^{2,5}(i, j)}, \quad (i, j) \in U_x, \quad (4)$$

где h_e – депрессия естественной тяги; U_b, U_μ, U_b, U_x – множества ветвей, инцидентных l – тому узлу, принадлежащих μ – му независимому контуру, отображающих ВГП и с изменяющимся сечением соответственно; $H(i, j)$ – депрессия ветви (i, j) ; $a(i, j), b(i, j)$ – коэффициенты напорной характеристики ВГП; $\alpha(i, j)$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; $P(i, j)$ – периметр выработки.

ШВС содержит, как показали исследования, выработки следующих типов:

U^I - выработки, с ламинарным законом движения воздуха, $n=1$;

U^{II} - выработки, с переходным законом движения воздуха, $n=1,5 \div 1,7$

U^{III} - выработки с квадратичным законом движения воздуха, $n=2$

Требуется определить распределение расходов воздуха, депрессий, концентраций метана в ШВС. Система уравнений относится к нелинейным, и для ее решения возможно применение стандартных математических методов. Однако, как показали исследования, проведенные ИГТМ НАН Украины, сходимость стандартных методов неудовлетворительна по причине большого разброса начальных данных. Кроме того, имеет место неопределенность ряда параметров [2,3,7,8,10]; устранение или по крайней мере снижение действия указанного недостатка предполагает кластерное моделирование.

Поэтому предложен *оригинальный сетевой адаптивный метод, являющийся комплексированием методов контурной и поузловой невязки*.

Основные положения метода отображены на рис 3 и заключаются в следующем.

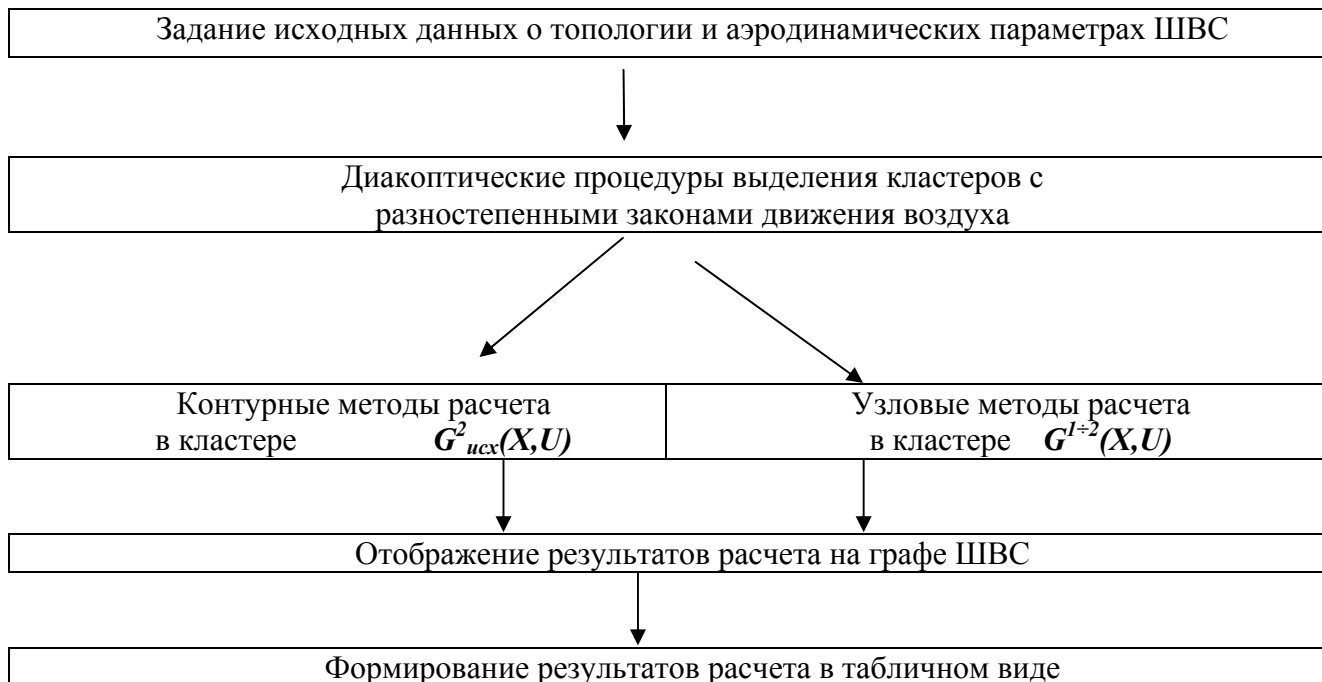


Рисунок 3 – Структура комплексного метода поузловой и поконтурной невязки

Из рисунка видно, что для решения задачи необходимо применить параллеливание расчетов, и производить анализ кластеров и расчет воздухораспределения в них различными методами.

1. *Определение путей движения метановоздушной смеси в рудничную атмосферу и на земную поверхность*

1. Задана начальная сеть $G_u(X_u, U_u)$. На множестве ветвей U_m моделируемого графа выделяется постоянная часть U_{const} , то есть ветви, которые отображаются в математической модели ШВС.

2. Результаты измерения расходов воздуха и депрессий наносятся на моделирующий граф $G_m(X_m, U_m)$. В моделирующем графе определяются узлы с нарушением первого закона сетей таким образом:

$$\Delta q_i = \sum_{(i,j) \in U_i} Q(i,j), \quad l = 1, n, \quad |\Delta q_i| \geq \xi, \quad i = 1, n',$$

где Δq_i – невязка расходов воздуха в i -том узле; ξ – необходимая точность моделирования воздухораспределения в i -том узле; n' – количество узлов с нарушением первого закона сетей.

3. Определяется множество ветвей (i,j) , которые моделируют пути эмиссии метана. Для этого выполняются операции сравнения

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

По результатам этого расчета определяются пути эмиссионного движения метана.

2. *Задание давлений в узлах сети.* В ряде узлов сети могут быть заданы давления $P_i = const$. Задание давлений в некоторых узлах сети особенно характерно для комбинированного способа проветривания, применяющегося на шахтах при разработке углей, склонных к самовозгоранию. Задание давлений в некоторых узлах сети вызывает появление в сети новых ветвей с расходом воздуха $Q_k^{min} = Q_k^{max}$ и депрессией $H_k^{min} = H_k^{max} = P_k - P_0$, где P_k – давление в i -том узле, P_0 – давление в узле отсчета, относительно которого задаются остальные давления.

Задание примерно равных давлений $P_i = P_j$ в начальном P_i и конечном P_j узлах сети приводит к тому, что ветвь как бы «исчезает» из расчета.

Далее определяется распределение давлений по ветвям условно-последовательной подсети каждого ВГП таким образом

Задаются начальные приближения давлений P_s в ветвях дерева графа (независимых по давлениям выработках сети).

3. *Разбиение ШВС на кластеры с использованием диакоптических процедур.*

4. Для каждого узла определяются узловое давления (потенциалы) в порядке возрастания уровня узла относительно корня дерева

5. Вычисляются узловое давления (потенциалы) P_j по формуле

$$P_j^{min} = \max_j ((P_i^{min} + h(i,j)); P_j) = \max_i \{P_i + r(i,j)Q(i,j)^2\}$$

6. Определяются потенциалы узлов P_i в обратной последовательности по отношению первоначальной

$$P_i' = \max \{P_j - \min[h^{\max}(i, j); (P_j - P_i^{\min})]\}$$

7. Выполняется проверка $P_j^{\min} \neq P_i'$ то повторить из пп 1, если условие пп 4 выполняется, то расчет окончен.

6. Из решения подсистемы уравнений (2) находятся значения остальных падений давления на хордах графа (зависимых по давлению выработках сети)

7. По формуле (1) определяются все расходы воздуха.

8 Подстановкой значений найденных расходов в правую часть подсистему уравнений (2) находятся невязки расходов воздуха во всех узлах.

Поскольку расходы воздуха во всех выработках могут быть представлены как функции депрессий ветвей, то увязка их падений может быть связана с невязкой расходов в узлах, определяемой по формуле

$$\Delta q_i = \sum_{(i,j) \in U_i} Q(i, j), \quad l = 1, n, \quad (5)$$

а поправка расхода воздуха в узле – по формуле

$$\Delta Q^i(i, j) = \frac{\delta Q(i, j)}{\sum_{(i,j) \in U_i} R^i(i, j)} R^i(i, j) \quad (6)$$

Из решения системы уравнений (5) – (6) определяются значения увязочных давлений ΔP_i .

9. Определяется очередное приближение перепадов давлений в ветвях дерева

$$P_i^{(r+1)} = P_i^r + \Delta P_i$$

10. Процесс повторяется. Расчет прекращается, когда значения невязок расходов в узлах становятся меньше заданной точности.

Отметим, что возможно введение дополнительного линейного (ламинарного) сопротивления выработки $R^l(i, j)$ и заменой стандартного квадратичного закона на комбинированный $\Delta P = R^l Q(i, j) + R Q^2(i, j)$.

Из сказанного могут быть сделаны следующие выводы:

1. Установлены закономерности движения газозадушенной смеси в выработанном пространстве под действием средств дегазации и разработан метод расчета воздухораспределения в ШВС с такими особенностями, а также с учетом поступления метана из выработанного пространства в действующие вентиляционные выработки и путей эмиссии метана.

2. Решение задач расчета установившегося потокораспределения в реконфигурируемых сетях, включающих ветви с разными законами движения воздуха,

ведется в условиях информационной неопределенности адаптированным методом узловых давлений

3. Предложенный метод позволяет повысить точность расчетов вентиляционных систем при оценке эмиссии метана в рудничную атмосферу и на земную поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Концепция безопасного контроля и управления проветриванием угольных шахт с использованием информационно-аналитических технологий / А.Ф. Булат, Б.В. Бокий, И.А. Ященко [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2012.- Вып.104.- С. 16-24.

2. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62. – Київ: 2010 – 2154 (Нормативний документ Мінвуглепрому України).

3. Пономаренко, Т.В. Разработка методов расчета оптимальных аэродинамических параметров развивающихся шахтных вентиляционных сетей. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.15.11 «Физические процессы горного производства» / Т.В. Пономаренко - Днепропетровск, 2001. - 20 с.

4. Метод расчета на ЭЦВМ естественного воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети / А.П. Подцюк, А.Ф. Романенко, В.Я. Потемкин [и др.] // Горный журнал.- 1975.- № 10.- с. 62-66.

5. Абрамов Ф.А. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников / Ф.А. Абрамов, РюБю Тянь, В.Я. Потемкин. – М.: Недра, 1978.- 238с.

6. Принципы построения кластерной модели выработанного пространства выемочного участка метанообильной угольной шахты / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, С.А. Головкин [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 117. – с. 141-152..

7. Построение имитационной кластерной модели в системе «горные выработки - выработанное пространство» / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, С.А. Головкин [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 118. – с. 71-82.

8. 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.

9. Разработка методов математического моделирования эмиссии шахтного метана / Т.В. Бунько, А.В. Боровский, И.Е. Кокоулин, А.Б. Бокий // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2013.- Вып.109.- С. 172-181.

10. Булат, А.Ф. Методология поиска рациональных параметров шахтной вентиляционной системы в условиях неопределенности / А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин. // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 56. - С. 3-8.

11. Иванников, А.Л. Математическое моделирование шахтных вентиляционных сетей, содержащих выработки с неустойчивым проветриванием : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.18/ А.Л. Иванников - Москва, 2009. - 23 с.

12. Круглов, Ю.В. Проблемы автоматизации расчетов вентиляционных сетей горнодобывающих предприятий / Ю.В. Круглов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы Научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2003 г., Пермь, 19-23 апр. 2004. - Пермь: Изд-во горн. ин-та УрО РАН, 2004. - С. 226-230.

13. Савельев, М.В. Метод оперативной оценки развивающихся вентиляционных сетей / М.В. Савельев, С.В. Федосеев // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. техн. - 2004. - №1. - С. 78-81.

14. Бунько, Т.В. Метод идентификации вентиляционных сетей с неопределенными аэродинамическими параметрами / Т.В. Бунько // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2005.- Вып.57.- С. 233-238.

REFERENCES

1. Bulat A.F., Bokiyy B.V., Yashchenko I.A. [and others] (2012), «Conception of safe control and management by ventilation of coal mines with the use of information-analytical technologies», *Geo-Technical mechanics*, no.104, pp. 16-24.

2. State committee of Ukraine on industrial safety, labour protection and mining supervision (2010), NPAOP 10.0-1.01-10: *Pravila bezpeki u vugilnirh shakhtakh* [NPAOP 10.0-1.01-10 Rules of safety in coal mines], Kiev, Ukraine

3. Ponomarenko, T.V. (2001), «Development of methods of calculation of optimum aerodynamic parameters of developing mine ventilation networks», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.15.11, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Podtshuk A.P., Romanenko A.F., Potyomkin V.Ya. and others (1975), *Mine magazine*, no. 10, pp. 62-66.

5. Abramov F.A., Tyan R.B. and Potyomkin V.Ya. (1978), *Raschet ventilyatsionnykh setey shakht I rudnikov* [Calculation of ventilation networks of mines and pits], Nedra, Moscow, SU.

6. Bunko T.V., Kokoulin I.Ye., Golovko S.A. and others (2014), «Principles of construction of cluster model of the produced space of removing area of methane-rich coal mine», *Geo-Technical mechanics*, no.117, pp. 141-152.

7. Bunko T.V., Kokoulin I.Ye., Golovko S.A. and others (2014), «Construction of simulation cluster model in the system is the «mine making - produced space», *Geo-Technical mechanics*, no.118, pp. 71-82.

8. Boky, B.V. and Bunko, T.V. (2011), «About the formalized invariant method of description by nonlinear much-polar of areas of mine ventilation network with indefinite by a structure and aerodynamic parameters», *Geotechnical mechanics*, no. 92, pp. 264-274.

9. Bunko T.V., Borovsky A.V., Kokoulin I.Ye. and Boki A.B. (2013), «Development of methods of mathematical design of emission of mine methane», *Geo-Technical mechanics*, no.109, pp. 172-181

10. Bulat, A.F., Bunko T.V. and Kokoulin, I.Ye. (2005), «Metadology search of rational parameters of the mine ventilation system in the conditions of vagueness», *Geotechnical mechanics*, no. 56. - pp. 3-8.

11. Yvannykov, A.L. (2009), «Mathematical design of mine ventilation networks containing making with unsteady ventilation»: Abstract of Ph.D. dissertation, 05.13.08, Moscow, Russia.

12. Kruglov, Yu.V. (2004), «Problems of automation calculations of ventilation networks of mining enterprises», *Strategiya i processy osvoyeniya georesursov: materials of the Scientific session of the mine institute of UrO WOUNDS on results SYR in 2003, Perm, 19-23 apr. 2004*, Perm: Yzd-vo of mine yun-ti UrO RAS, Russia.

13. Savelyev, M.V. and Fedoseev S.V. (2004), «Method operative estimation of developing ventilation networks», *Izv. Izv. vuzov Sev.-Kavk. Region tekhn.*, no. 1, pp. 78-81.

14. Bunko, T.V. (2005), «Method authentications of ventilation networks with indefinite aerodynamic parameters», *Geotechnical mechanics*, no. 57, pp. 233-238.

Об авторах

Бунько Татьяна Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, bunko2007@mail.ru

Коккоулин Иван Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, bunko2007@mail.ru

Жалилов Александр Шамильевич, инженер, главный механик ГП «Селидовуголь», Селидово, Украина, alnat01@mail.ru

Бокій Александр Борисович, аспирант Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» Украины (ГВУЗ ДонНТУ), Донецк, Украина, bokiy@yahoo.com

About the authors

Bunko Tatyana Viktorovna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, bunko2007@mail.ru

Kokoulin Ivan Yevgenyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths N.S. Polyakov Institute of Geotechnical

Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, bunko2007@mail.ru

Zhalilov Alexandr Shamilyevich, Master of Science, Chief mechanical engineer of the state enterprise «Selidovugol», Selidovo, Ukraine, , alnat01@mail.ru.

Bokiy Alexander Borisovich, Doctoral student of State Higher Educational Institute «The National Technical University» of Ukraine (SHEI «DonNTU»), Donetsk, Ukraine, bokiy@yahoo.com

Анотація. Розглянуті особливості шахтних вентиляційних систем, які реконфігуруються: топологічні зміни в просторі, нерівномірність забезпечення об'єктів провітрювання повітрям, істотна невизначеність аеродинамічних параметрів елементів. Для таких вентиляційних систем, які включають гілки з різноступеневими законами руху повітря, запропоновано використовувати кластерне моделювання і методи повузлової нев'язки. Запропонована адаптація цих методів до розрахунку вентиляційних систем, які реконфігуруються, що включають джерела і шляхи емісії метану як у рудникову атмосферу, так і на земну поверхню, із застосуванням паралельних обчислень, що реалізують розрахунки повітророзподілу з різноступеневими законами руху повітря і можливостями завдання тиску в різних точках мережі. Тим самим може бути побічно реалізовано зменшення емісії метану з виробленого простору шляхом створення зони «нульової депресії».

Ключові слова: реконфігурація шахтної вентиляційної мережі, повітророзподіл, методи повузлової нев'язки, різноступеневі закони руху повітря, емісія метану.

Аннотация. Рассмотрены особенности реконфигурируемых шахтных вентиляционных систем: топологические изменения в пространстве, неравномерность обеспечения объектов проветривания воздухом, существенная неопределенность аэродинамических параметров элементов. Для таких вентиляционных систем, включающих ветви с разностепенными законами движения воздуха, предложено использовать кластерное моделирование и методы поузловой невязки. Предложена адаптация этих методов к расчету реконфигурируемых вентиляционных систем, включающих источники и пути эмиссии метана как в рудничную атмосферу, так и на земную поверхность, с применением параллельных вычислений, реализующих расчеты воздухораспределения с разностепенными законами движения воздуха и возможностями задания давлений в разных точках сети.

Тем самым может быть косвенно реализовано уменьшение эмиссии метана из выработанного пространства путем создания зоны «нулевой депрессии».

Ключевые слова: реконфигурация шахтной вентиляционной сети, воздухораспределение, методы поузловой невязки, разностепенные законы движения воздуха, эмиссия метана.

Abstract. The features of the reconfigured mine ventilation systems are considered: topology changes in space, unevenness of providing of ventilation objects by air, substantial vagueness of aerodynamic parameters of elements. For such ventilation systems including branches with the laws of motion of air with the different degree, it is suggested to use the cluster design and methods of non-knit on knot. Adaptation of these methods to the calculation of the reconfigured ventilation systems, including sources and ways emission of methane both in a mine atmosphere and on an earthly surface, is offered, with the use of parallel calculations realizing the calculations of air-distribution with the different degree laws of motion of air and possibilities of task of pressures in different points of network. The same diminishment of emission of methane from the produced space by creation of area of «nought depression» can be indirectly realized.

Keywords: reconfiguration mine ventilation network, air-distribution, methods of non-knit on knot, different degree laws of motion of air, emission of methane.

Статья поступила в редакцию 15.09.2014

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Минеевым