

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 КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА ПО СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК, ВКЛЮЧАЮЩИХ РАССРЕДОТОЧЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ

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

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

Бокій О.Б., аспірант
(ДВУЗ «ДонНТУ»)

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КОНЦЕНТРАЦІЙ МЕТАНУ ПО МЕРЕЖІ ГІРСЬКИХ ВИРОБОК, ЯКІ ВКЛЮЧАЮТЬ РОЗОСЕРЕДЖЕНІ ДЖЕРЕЛА МЕТАНОВИДЕЛЕННЯ

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»)

Bokiy A.B., Doctoral Student
(SHEE «DNTU»)

IMPROVED METHOD FOR COMPUTING METHANE CONCENTRATIONS ALONG THE TUNNEL NETWORK CONTAINING DISPERSED METHANE-RELEASING SOURCES

Аннотация. Рассмотрены особенности функционирования шахтных вентиляционных систем, содержащих кластеры типа «выработанное пространство» с разностепенными законами движения воздуха в пределах каждого кластера. Предложены методы определения путей миграции метановоздушной смеси от границ кластера «выработанное пространство» на земную поверхность, расчета времени загазирования выработок, расположенных на этих путях, расчета концентраций метановоздушной смеси в них и метод распараллеливания расчетов воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети методом поузловых невязок с учетом различного дебита метана, поступающего в горные выработки из кластера «выработанное пространство». Предложенная схема решения задач оценки состояния шахтной вентиляционной системы с учетом поступления в нее метана из кластера «выработанное про-

странство» позволит повысить точность вентиляционных расчетов и исключить нарушения требований Правил безопасности при их проведении.

Ключевые слова: реконфигурация шахтной вентиляционной сети, воздухораспределение, методы поузловой невязки, пути миграции метана, концентрация метана, эмиссия метана.

Современная шахта характеризуется, помимо топологической сложности, большой размерности и неопределенности ряда аэродинамических параметров, газовым фактором – на воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети (ШВС) оказывает поступление метана в выработки ШВС из распределенных в пределах выемочного участка источников. Регулирование такого поступления необходимо как для прогнозирования уровня концентрации метана в выработках по ходу исходящей от источников его поступления вентиляционной струи, так и для определения изменений, вносимых в воздухораспределение дополнительными источниками метана с учетом временного фактора. Тем самым будет повышена точность оценки эмиссии метана в атмосферу, а значит – и экологического риска от степени влияния этого техногенного фактора на состояние окружающей среды.

Для решения задачи исходим из того, что вентиляционная сеть задана сильносвязным графом (X, U) , где X – множество узлов, U – множество ветвей, для каждой ветви (i, j) которого известны длина $l(i, j)$, площадь поперечного сечения $S(i, j)$, аэродинамические сопротивления выработок $R(i, j)$, депрессия вентиляторов главного проветривания (ВГП) H_i^e и точки поступления метана, вследствие его миграции из выработанного пространства, на исходящую струю выемочного участка. Необходимо определить пути распространения метана в ШВС, воздухораспределение в ШВС на момент оценки влияния метана на состояние ШВС и концентрацию метана в начальном узле ветви $c(i)$ и конечном узле $c(j)$ по ходу его миграции в атмосферу. Таким образом, в результате решения задачи (определения $Q(i, j)$, $c(i)$, $c(j)$) каждая ветвь ШВС будет однозначно определена вектором состояний $K(i, j, Q, l, S, R, c(i), c(j))$.

Схема решения задачи в укрупненном виде представлена на рис. 1.

На первом этапе производится подготовка исходной информации о ШВС в соответствии с перечнем необходимых параметров, приведенным выше, в том числе для элементов кластеров, охарактеризованных в [1,2]. Если параметров недостаточно – производится оценка степени этой недостаточности и уточняется возможность назначения дополнительных замерных станций их значений в соответствии с [3].

На втором этапе производится определение путей движения метана от мест его выделения в ШВС до земной поверхности. В рассматриваемом случае решение задачи является чисто топологическим, т.е. преследует цель определения лишь топологической структуры системы маршрутов миграции метана на поверхность без учета их параметрической идентификации, т.е. определения поля концентраций метана в выработках ШВС, времени загазирования (и вообще



Рисунок 1 – Схема решения задачи распределения метана по сети горных выработок

существования) зон ШВС и влияния на дебит метановоздушной смеси в ШВС поступления в нее метана. Решение задачи в такой постановке необходимо для анализа в дальнейшем газовой обстановки в ШВС с исключением участков, не подверженных влиянию метана, что существенно снижает трудоемкость расчетов.

На третьем этапе производится расчет воздухораспределения в ШВС. Для этого может быть использован, на первом этапе, модифицированный метод Ньютона [4] (при условии, что граничные условия по метану на границах кластера выработанного пространства заданы, а не определяются, исходя из расчета потокораспределения в пределах кластера «выработанное пространство» (представляемого в виде нелинейного многополюсника [5]) с использованием метода поузловых невязок [6]), так, при наличии необходимой информации, и метод, предложенный в [6].

На четвертом этапе производится расчет времени загазирования ветвей ШВС метановоздушной смесью, поступающей в горные выработки из кластеров «выработанное пространство», и концентрации метана в ветвях ШВС.

Особенности оценки газовой ситуации на выемочном участке заключаются в том, что они являются кластером «выработанное пространство – горные выработки», входящим в общую ШВС, с распределенными источниками выделения газообразных примесей и поглощения кислорода, поэтому моделирование средней в сечении выработки концентрации сводится к решению задачи газовой динамики. Процессы переноса в каждой ветви ШВС можно считать происходящими за счет одномерной конвективной диффузии; тогда нестационарное поле концентраций в ветвях ШВС будет описываться уравнением

$$\frac{\partial C(i, j)}{\partial t} + V(i, j) \frac{\partial C(i, j)}{\partial L(i, j)} = \frac{I_{(i, j)}^m(t)}{O(i, j)}, \quad (1)$$

где $C(i, j)$ – концентрация метановоздушной смеси в (i, j) ; $I_{(i, j)}^m$ – интенсивность поступления газовой примеси в (i, j) ; $V(i, j)$ – скорость воздуха в (i, j) ; $O(i, j)$ – объем (i, j) ; $L(i, j)$ – пространственная координата.

Решение этого уравнения в инженерных расчетах для каждой конкретной ветви сложно, и расчет концентрации метана и его влияния на воздухораспределение в ШВС может быть осуществлен по упрощенной инженерной методике, которая будет охарактеризована ниже, после расчета воздухораспределения в пределах кластера «выработанное пространство – горные выработки» и в ШВС в целом.

Для расчета времени формирования зоны загазирования ШВС метановоздушной смесью, поступающей из кластера «выработанное пространство», на основании полученной на втором этапе топологической картины формирования зоны загазирования, предложен универсальный алгоритм, применимый при возникновении в вентиляционной сети зон загазирования, в том числе при условии появления в них зон рециркуляции метановоздушной смеси. Последнее особенно важно на этапе дальнейших исследований, когда планируется исследование ситуаций возникновения очагов самовозгорания в пределах кластера «выработанное пространство» (эндогенного пожара), когда, вследствие повышения температуры поступающей на исходящую струю метановоздушной смеси, может возникнуть зона рециркуляции метановоздушной смеси с меняющейся ее концентрацией.

В упрощенном виде алгоритм расчета концентрации метана представим в следующем виде.

Пусть распределение метановоздушной смеси в ШВС описывается графом $G^3(X^3, U^3)$. Итерационная формула для очередного загазированного узла определяет конечный узел j , для которого время достижения минимально:

$$P_j = \min_{\substack{i \in X^3 \\ j \in X \setminus X^3}} \{P_i + t_{(i, j)}\}, \quad (1)$$

где P_i – время загазирования начального узла выработки (i, j) ; $t_{(i, j)}$ – время загазирования (i, j) .

Очевидно, что наличие контура рециркуляции в сети не является препятствием для применения алгоритма, так как оценка времени загазирования узла, полученная по формуле (1), не может быть уменьшена за счет движения метановоздушной смеси по контуру рециркуляции. Более подробно алгоритм построения последовательности загазирования узлов и выработок сети выглядит следующим образом.

Пусть (i^*, j^*) – выработка, в которую происходит метановыделение. Блок-схема проведения расчетов представлена на рис. 2. M_2 – множество узлов поверхности, которыми заканчивается исходящая струя, j_k – узлы, которыми за-

канчивается исходящая струя шахты.

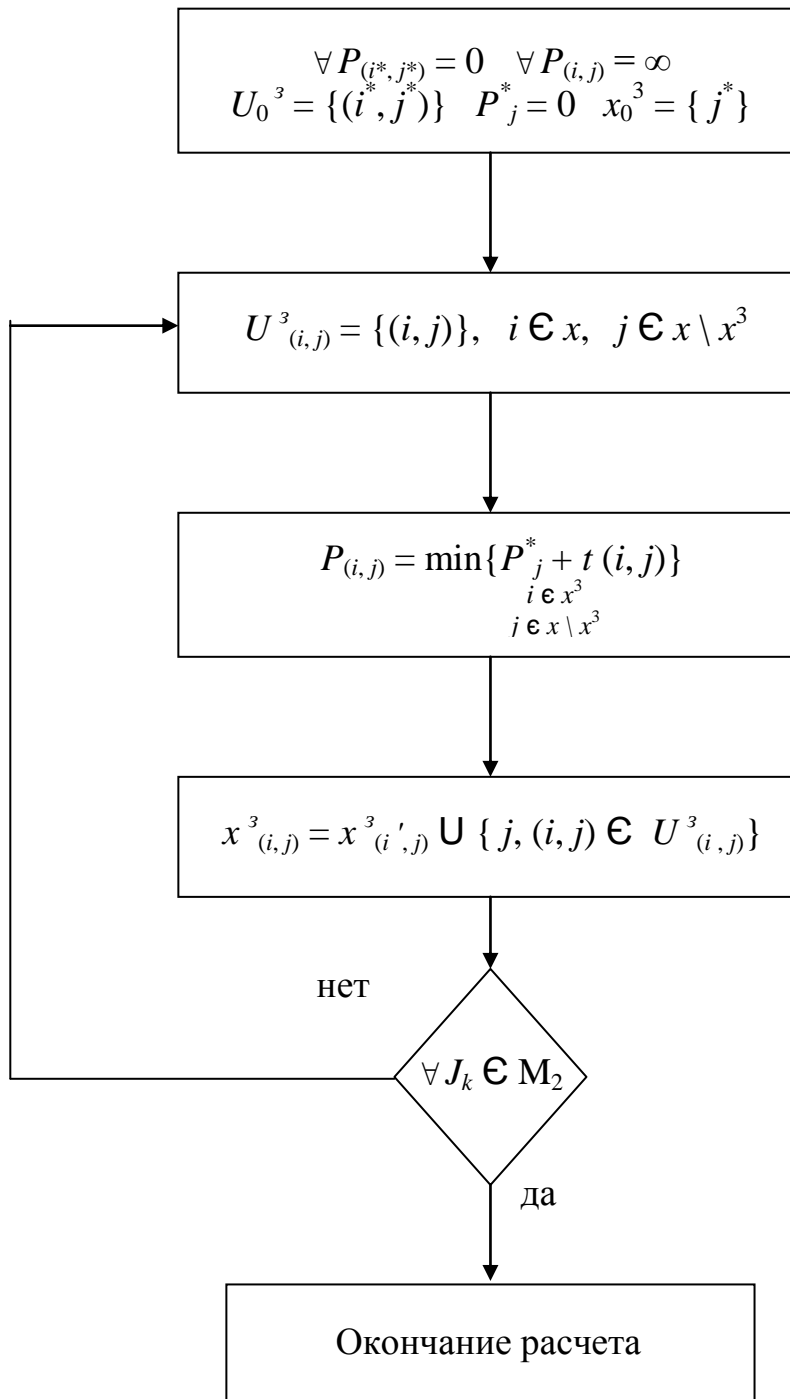


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма определения времени загазирования выработок шахты

Для дальнейшего решения задачи на пятом этапе может быть использован оригинальный аналог-метод поузловых невязок, позволяющий решить общую задачу потокораспределения в ШВС, включающей объединения кластеров «выработанное пространство – горные выработки», характеризующиеся разностепенными законами движения воздуха в их элементах [6].

Следует отметить, что для реконфигурируемых ШВС, на рассмотрение ко-

торых и были направлены проведенные исследования, необходимо учитывать следующие особенности. Ранее рассматривались ШВС, в которых поступление метана в горные выработки учитывалось неявно, именно: для топологического объекта (такая формулировка выбрана из соображений, что объектом может являться не только горная выработка, транспортирующая метановоздушную смесь, но и элемент выработанного пространства лавы, являющийся основным поставщиком техногенного метана), в котором дебит выделяющегося метана незначителен, этим дебитом можно пренебречь. Это объясняется тем, что при разделении выработанного пространства на кластеры содержание метана в них может быть различным, а значит – различным будет и поступление его к границам кластера и в исходящую струю. Такое допущение существенно упрощает вентиляционные расчеты. Действительно, концентрация C_i метана, поступающего узел i на границе кластера «выработанное пространство», определяется по простой формуле [7]

$$C_i = \frac{\sum C(j_k, i) Q(j_k, i)}{\sum Q(j_k, i)}, \quad (2)$$

т.е. концентрация метана является «виртуальной», просто цифрой, характеризующей состояние метановоздушного потока на момент поступления его к узлу i для дальнейшего расчета его изменения за указанным узлом. Вместе с тем дебит метана может достигать значительной величины. Как показали замеры концентрации метана в неподдерживаемой вентиляционной выработке после отхода лавы (в пределах доступности измерений), эта величина может достигать значительных значений (до 20% от основного дебита воздуха). Тем самым изменяется не только состав вентиляционного потока, но и скорость воздуха в выработках, и их депрессия, что не может не сказаться на эмиссии метана из шахты на поверхность. При возникновении ситуации, когда поступление метана из разных элементов кластера «выработанное пространство» характеризуется существенной разницей дебита, необходимо производить распараллеливание вычислений, учитывая указанное различие, т.е. производить отдельный учет малого и большого дебита поступления метана на различные участки исходящей вентиляционной струи.

Если дебит мал – следует руководствоваться применяемой в настоящее время формулой (2). Если дебит метановоздушной смеси из выработанного пространства значителен (что обуславливает, при неучете этого фактора при расчетах, нарушение первого закона сетей и требований [8]), при проведении вентиляционных расчетов необходимо формулу (2) заменять формулой

$$C_i = \frac{\sum C(j_k, i) [Q(j_k, i) + \Delta Q(j_k, i)]}{\sum [Q(j_k, i) + \Delta Q(j_k, i)]}, \quad (3)$$

что, в свою очередь, предполагает знание величины приращений дебита метановоздушной струи $\Delta Q(j_k, i)$, которые могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta Q(i,j) = Q(i,j) \left\{ \frac{\Sigma [Q(i_k, i) + \Delta Q(i_k, i)]}{\Sigma Q(i, j_k)} - 1 \right\}. \quad (4)$$

Использование формул (2 - 4) для расчета концентрации метановоздушной смеси на выходе из выработанного пространства предполагает формализацию расчетной схемы выемочного участка, что и является особенностью расчетов реконфигурируемой вентиляционной сети. В [1,2] рассмотрен случай, когда для упрощения модели все линии утечек метановоздушной смеси из выработанного пространства сведены в одну точку (узел) неподдерживаемой вентиляционной выработки (расчеты производились графоаналитическим методом расчета линий утечек в пределах кластера «выработанное пространство») или к месту установки средств вакуумирования. В реальных условиях, как показали немногочисленные эксперименты (замеры дебита метановоздушной смеси вдоль неподдерживаемой вентиляционной выработки после прохода лавы лимитируются ограниченной доступностью требуемых замерных станций; естественно, чем их больше, тем точнее имитационная модель), дополнительный дебит поступающего из выработанного пространства метана изменяются по нелинейной зависимости по длине вентиляционной выработки с нарастающим затуханием по мере отхода лавы. Правда, при этом приходится, ввиду снижения площади поперечного сечения и, тем самым, пропускной способности неподдерживаемой вентиляционной выработки за лавой, изменять схему проветривания выемочного участка [9], что усложняет картину оценки метанораспределения в его пределах.

Использование в угольной промышленности понятия экологического риска (или влияния) требует точного количественного определения двух важнейших параметров: максимального допустимого и несущественно малого риска. Поэтому автором введен показатель β - вероятности выбросов метана в атмосферу, что принимает следующие значения: для условий метанообильных шахт ($\beta=1$) и для условий негазовых шахт ($\beta=0$). В работе реализована следующая последовательность расчета: определение параметров интенсивности эмиссии метана → определение параметров экологической оценки → управления параметрами экологического воздействия. Количественной оценкой уровню риска является величина $R = \beta U$, где β - вероятность наступления неблагоприятного события, U - экологический ущерб в результате этого события. Если возможно наступление нескольких неблагоприятных событий с разной вероятностью и соответствующими убытками, то $R = \sum_{i=1}^{i=N} \beta_i U_i$. Анализ структуры экологического риска показал, что можно выделить постоянную и динамическую составляющие. Постоянная составляющая, отражает выбросы метана в атмосферу из вентиляционных стволов во время нормальной работы шахты и определяется как

$R = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i^b C_i^b$; или является произведением относительного метановыделения из горных выработок шахты (q , м³/т), ее производительности (A_ϕ , т/год) и продолжительности (t , лет) ведения горных работ

$$R = q \cdot A_\phi \cdot t \cdot \beta. \quad (5)$$

Вероятность наступления такого события как эмиссия парниковых газов в атмосферу из горных выработок находится в интервале $0 \leq P \leq 1$. Для негазовых шахт она составляет 0, а для газовых - 1 в том случае, когда улавливание и сжигание метана не производятся.

Если же производится улавливание и переработка шахтного газа, то, по нашему мнению, можно предположить, что при этом искусственно снижается газообильность шахты до уровня $q_u = q - q_y$, где q_y – отнесенное на величину добычи количество уловленного и переработанного метана, м³/т. Для удобства дальнейших рассуждений введем понятие коэффициента улавливания, который показывает какую часть газа улавливают относительно общего выделяющегося в шахте: $k_y = \frac{q_y}{q}$.

Постоянная составляющая, отражает выбросы метана в атмосферу из вентиляционных стволов во время нормальной работы шахты и определяется как $R = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i^b C_i^b$; или является произведением относительного метановыделения из горных выработок шахты (q , м³/т), ее производительности (A_ϕ , т/год) и продолжительности (t , лет) ведения горных работ $R = q \cdot A_\phi \cdot t \cdot \beta$. Уменьшение экологического воздействия возможно путем сокращения относительного метановыделения q из горных выработок. Динамическая составляющая отражает экологический риск, связанный с технологическими факторами возникновения неблагоприятных событий (обрушение угля и пород, взрывы метана и угольной пыли, газодинамические явления, пожары). Следует отметить, что параметр интенсивности экологического риска (влияния) (R , м³), связанный с выбросами метана в биосфере, может быть приблизительно оценен по известной методике «доза - эффект». Научные исследования специалистов ДонТУ закономерностей экологического воздействия метана на окружающую среду доказали, что они имеют линейный характер, поэтому для оценки экологического риска можно использовать метановыделения, как базовый параметр. В процессе сжигания метана образуется менее вредный парниковый газ - диоксид углерода. Величина критерия экологического риска в этом случае определяется суммированием влияния метана и диоксида углерода:

$$R'' = R + R' = (1 - k_y) \cdot q \cdot A_\phi \cdot t + \frac{1}{21} \cdot q \cdot A_\phi \cdot t_o \quad (6)$$

и находится в интервале от $(q \cdot A_{\phi} \cdot t)$ при $\beta = 1$ до $(0,05 \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t)$ при $\beta = 0$, то есть при полной утилизации метана.

Уменьшение экологического риска возможно только путем сокращения q из горных выработок. Уменьшение A_{ϕ} противоречит ее назначению – обеспечить потребителя энергетическим или металлургическим ресурсом в необходимом количестве. Этим же можно объяснить нецелесообразность закрытия или сокращения срока работы шахты, ее преждевременная ликвидация – это лишение потребителя необходимого сырья. Следовательно, наиболее эффективным, а в настоящее время практически единственным направлением сокращения экологических ущербов является уменьшение выбросов метана из горных выработок.

В том случае, когда часть метана улавливается системами дегазации и сжигается в энергетических установках, а пары воды конденсируются, общее количество выбрасываемых парниковых газов не уменьшается, однако сгорание одной молекулы метана приводит к образованию одной молекулы диоксида углерода $CH_4 + O_2 = CO_2 + H_2O \downarrow$, при этом негативное парниковое воздействие снижается в 21 раз.

В процессе сжигания метана образуется менее вредный парниковый газ – диоксид углерода. Величина экологического риска при этом составит :

$$R' = \frac{1}{21} \cdot k_y \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t_o, \quad (7)$$

где t_o – период выполнения работ по утилизации газа, лет.

Суммарная величина экологического риска может быть определена суммированием влияния метана и диоксида углерода:

$$R'' = R + R' = (1 - k_y) \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t + \frac{1}{21} \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t_o \quad (8)$$

Выражение (8) является наиболее общим для оценки эмиссии парниковых газов из угольной шахты за период ее работы. Анализируя выражение (8) можно установить, что суммарный риск может находиться в интервале от $(q \cdot A_{\phi} \cdot t)$ при $P = 1$ до $(0,05 \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t)$ при $P = 0$, т.е. при полной утилизации метана

Чаще имеют место случаи, когда приходится рассматривать какие-либо отдельные периоды работы предприятия, например, оценить годовой риск или за период работы установки для каптажа ($t = t_o$). В этом случае выражение для оценки суммарного риска упрощается:

$$R'' = R + R' = (1 - k_y) \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t + \frac{1}{21} \cdot q \cdot A_{\phi} \cdot t \approx q \cdot A_{\phi} \cdot t \cdot (1 - 0,95 \cdot k_y) \quad (9)$$

Текущая (за период t) экологическая эффективность проведения мероприятий по каптажу и сжиганию метана оценивается как отношение разни-

цы рисков полного и от выполнения работ по утилизации метана к полному экологическому риску :

$$\mathcal{E}_s = \frac{R-R''}{R} = \frac{q \cdot A_{\phi} \cdot t - q \cdot A_{\phi} \cdot t \cdot (1-0,95 \cdot k_y)}{q \cdot A_{\phi} \cdot t} = 0,95k_y = 0,95 \frac{q_y}{q} \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что максимальная эффективность, в том случае, когда $t_o=t$, а $q_y=q$ составляет $\mathcal{E}_s=0,95$, а когда утилизация не производится совсем - $\mathcal{E}_s=0$.

Важно заметить, что эффективность не зависит от производительности шахты, а определяется ее относительными метановыделением и количеством каптированного метана, а также, в общем случае, продолжительностью выполнения мероприятий по его утилизации.

Например, для шахты, подобной АП им. А.Ф. Засядько, имеющей относительное метановыделение около $q=33 \text{ м}^3/\text{т}$. улавливающей $q_y=18 \text{ м}^3/\text{т}$, ($k_y=0,54$), текущая экологическая эффективность этих мероприятий составит:

$$\mathcal{E}_s = 0,95 \cdot k_y = 0,513$$

На основании изложенного можно заключить, что комплексный критерий оценки экологических рисков, вызванных эмиссией парниковых газов из угольных шахт, адитивно учитывает постоянную составляющую, отображающую выбросы метана в атмосферу из вентиляционных стволов во время нормальной работы шахты и динамическую составляющую, отображающие выбросы метана в атмосферу, связанные с технологическими факторами возникновения неблагоприятных событий (обрушение угля и пород, взрывы метана и угольной пыли, газодинамические явления, пожары).

Таким образом, впервые предложен критерий оценки экологического риска функционирования высокопроизводительных угольных шахт с использованием комплексной дегазации и дальнейшей утилизации метана, который учитывает эмиссию парниковых газов из угольных шахт.

На последнем этапе производится формирование теоретико-множественной модели ШВС, с использованием которой можно оценивать различные аспекты азрогазораспределения в ШВС в целом.

Из сказанного могут быть сделаны следующие выводы:

1. Разработан метод расчета воздухораспределения в ШВС, содержащей кластеры «выработанное пространство – горные выработки» с разностепенным законом движения метановоздушной смеси, с учетом поступления метана с переменным дебитом из выработанного пространства в действующие вентиляционные выработки и путей эмиссии метана от мест его эмиссии на поверхность.

2. Решение задач расчета установившегося потокораспределения в реконфигурируемых сетях, включающих ветви с разными законами движения воздуха ведется в условиях информационной неопределенности адаптированным мето-

дом узловых давлений.

3. Предложенный метод позволяет повысить точность расчетов вентиляционных систем при оценке эмиссии метана в рудничную атмосферу и на земную поверхность за счет учета (а в перспективе, с использованием разработанных методов – и регулирования указанной эмиссии).

4. Впервые предложен критерий оценки экологического риска функционирования высокопроизводительных угольных шахт с использованием комплексной дегазации и дальнейшей утилизации метана, который учитывает эмиссию парниковых газов из угольных шахт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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

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

3. Обґрунтування ергономічного базиса маршрутів руху гірничих майстрів під час збирання даних про стан шахтної вентиляційної мережі, яка реконфігурується / Т.В. Бунько, І.Є. Кокоулін, М.М. Дуднік, А.Ш. Жалілов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 114. – С. 84-89.

4. Абрамов, Ф.А. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников / Ф.А. Абрамов, Р.Б. Тянь, В.Я. Потемкин. – М.: Недра, 1978. – 238с.

5. 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.

6. Совершенствование метода расчета реконфигурируемых шахтных вентиляционных систем с использованием параллельных вычислений / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов, А.Б. Бокий // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 119. – с. 87-99.

7. Зони загазування гірничих виробок вугільних шахт продуктами термодеструкції від підземних пожеж. Методика розрахунку; ДСТУ 10.1-00174102-008-2003.- [Чинний від 2003-10-23] / Л.С. Беляєва, О.В. Бондаренко, М.В. Кравченко [та ін.]. – Офіц. вид. – К.,: Мінпаливенерго України, 2003. – 24с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Стандарт.)

8. 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. – 215 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).

9. Повышение эффективности проветривания угольных шахт с высоконагруженными лавами / А.Ф. Булат, Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий [и др.]. – Днепропетровск: Норд-Пресс, 2004. – 264с.

REFERENCES

1. 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.

2. 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.

3. Bunko, T.V., Kokoulin, I.Ye., Dudnik, M.N. and Zhalilov, A. Sh. (2014), «Validation of ergonomical base of marchroutes motion of mining masters in the time of collection of information about the condition of reconfigurational mine ventilation network», *Geo-Technical mechanics*, no. 114, pp. 84-89.

4. 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.

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

6. Bunko T.V., Kokoulin I.Ye., Zhalilov A.Sh. and Bokiy A.B. (2014), «Perfection of method calculation of the reconfigured mine ventilation systems with the use of parallel calculations», *Geo-Technical Mechanics*, no. 119, pp. 87-99.

7. Minpalyvenergo Ukrainy (2003), DSTU 10.1-00174102-008-2003. *Zony zagazuvannya girnychyykh vyrobok vuuilnykh shakht produktami termodestruktsiy vid pozhezh. Metod rozrakhunku* [Areas of the gassy of mine workings of coal mines by the products of thermo-destruction from underground fires. Method of calculation], Minpalivenergo Ukrainy, Kiev, UA.

8. 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

9. Bulat A.F., E.I. Zvyagylsky Ye.L., Bokiy B.V. [and others] (2004), *Povysheniye effektivnosti provedivaniya ugolnskh shakht s vysokonagruzhennymi lavami* [Increase of efficiency ventilation of coal mines with the high-loaded lavas], Nord-Press, Dnepropetrovsk, UA.

Об авторах

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

Кокчулін Іван Євгенєвич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт 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, Государственное высшее учебное заведение «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 Reseacher, Senior Reseacher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.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 Reseacher, Senior Reseacher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, M.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, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University» (SHEI «DonNTU»), Donetsk, Ukraine, bokiy@yahoo.com

Анотація. Розглянуто особливості функціонування шахтних вентиляційних систем, які містять кластери типу «вироблений простір» з різноступеневими законами руху повітря в межах кожного кластера. Запропоновані методи визначення шляхів міграції метаноповітряної суміші від меж кластера «вироблений простір» на земну поверхню, розрахунку часу загазування виробок, розташованих на цих шляхах, розрахунку концентрацій метаноповітряної суміші у них і метод розпаралелювання розрахунків повітроділення у шахтній вентиляційній мережі методом повузлових нев'язок з урахуванням різного дебіта метану, який поступає в гірничі виробки з кластера «вироблений простір». Запропонована схема рішення задач оцінки стану шахтної вентиляційної системи з урахуванням надходження в неї метану з кластера «вироблений простір» дозволить підвищити точність вентиляційних розрахунків і виключити

чити порушення вимог Правил безпеки при їх проведенні.

Ключові слова: реконфігурація шахтної вентиляційної мережі, повітроділення, методи повузлової нев'язки, шляхи міграції метану, концентрація метану, емісія метану.

Abstract. Specific functioning of the mine ventilation systems containing clusters of the «goaf» type with different-power laws of air motion within each cluster are considered. The authors propose methods for determining routs of methane-air mixture migration from the edges of the «goaf» cluster to the ground surface, and for calculating time period for gassing the tunnels located along and concentrations of methane-air mixture in these routs, and method for parallel calculating of air distribution in the mine ventilation network by method of site-to-site difference with taking into account different debits of methane flowing into the mine tunnels from the «goaf» cluster. The proposed method for estimating state of the mine ventilation system with taking into account methane flowing from the «goaf» cluster ensures more accurate calculating of ventilation systems with observing all requirements of safety regulations.

Keywords: reconfiguration of mine ventilation network, air distribution, methods of site-to-site difference, routs of methane migration, concentration of methane, emission of methane.

Статья поступила в редакцию 15.10.2014

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