

УДК 622.41:622.822

Моделирование переходных газодинамических процессов на добычных участках при изменениях режимов дегазации и вентиляции

С. П. Греков, И. Н. Зинченко, А. Л. Иванников

Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», Украина

Московский государственный горный университет (МГГУ), Россия

Рассмотрены переходные газодинамические процессы, возникающие на добычных участках угольных шахт при нарушениях режимов дегазации и вентиляции. Несмотря на наличие в настоящее время данных аналитических и экспериментальных исследований в этом направлении большой интерес возникает в численных методах решения данной задачи. Предложен численный метод решения уравнения нестационарного переноса газа в консервативной форме с источниками газовой выделенности из сближенных пластов при их дегазации и переменной скорости воздуха.

Ключевые слова: *переходные газодинамические процессы, дегазация, вентиляция, нестационарное уравнение переноса, численный метод, консервативность.*

Розглянуті перехідні газодинамічні процеси, що виникають на дільницях видобутків вугільних шахт при порушеннях режимів дегазації і вентиляції. Не дивлячись на наявність в даний час даних аналітичних і експериментальних досліджень в цьому напрямі великий інтерес виникає в чисельних методах рішення даної задачі. Запропонований чисельний метод вирішення рівняння нестационарного перенесення газу в консервативній формі з джерелами газовиділення з пластів, що зближуються, при їх дегазації і змінній швидкості повітря.

Ключові слова: *перехідні газодинамічні процеси, дегазация, вентиляция, нестационарне рівняння перенесення, чисельний метод, консервативність.*

The transitional gas dynamical processes arising on the production units of coal mines by breaches of the degassing and ventilation conditions are considered. The numerical technique of solving the equation of the non-stationary transfer of a gas in the conservative form with sources of gas emission out of seams brought together by their degassing and variable speed of air is proposed. Found the causes of "paradoxical" differences between calculated and measured characteristics in the unsteady flow of an incompressible fluid. On the example of numerical simulation of the cross-flow flat plate by incompressible fluid shows the effect of the contributions of the dominant physical factors and an explanation of this "paradox".

Key words: *transitional gas dynamical processes, degassing, ventilation, non-stationary transfer equation.*

1. Общая постановка задачи, актуальность, цель работы

Раздельное или совместное изменение режимов дегазации и вентиляции на добычных участках угольных шахт приводит к изменению газовой ситуации в горных выработках. Аналитические и экспериментальные исследования в этом направлении проведены многими авторами [1 - 9]. Однако полученные аналитические и эмпирические зависимости концентраций метана от глубины регулирования расхода воздуха или от коэффициента дегазации на добычном участке либо очень упрощены, либо очень сложны и не отражают

многофакторных связей параметров. Более глубокое изучение переходных газодинамических процессов на добычных участках возможно только численными методами. Поиск численных методов решения сопряжен со значительными трудностями и, как показал анализ литературных источников, решения отсутствуют. Целью данной работы является получение численного решения динамики концентраций метана в исходящих струях лав и добычных участков при изменении режимов дегазации и вентиляции.

2. Построение модели

Рассмотрим уравнение нестационарного переноса газов в одном измерении с источниками газовой выделению [1]

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \frac{\partial(u\tilde{C})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) + i(x, t), \quad (1)$$

где \tilde{C} – осреднённая по поперечному сечению выработки концентрация метана, об. доли; t – время с момента нарушения режима вентиляции или дегазации, с; u – переменная вдоль выработки скорость воздуха, м/с; x – продольная координата, м; D_x – коэффициент турбулентной диффузии метана, м²/с; i – интенсивность источников газовой выделению из стенок выработки, м³/(с·м³).

Дифференциальное уравнение (1) является «консервативным» [10], так в этом случае не нарушается закон сохранения массы. В то же время при вынесении функции скорости за знак производной, как в ряде работ, закон сохранения массы будет нарушаться при переменной скорости по длине выработки.

В качестве граничного условия $\tilde{C}(0, t)$ для вентиляционной выработки используем уравнение изменения средней концентрации метана в объёме лавы и призабойного пространства

$$V \frac{dC}{dt} = q(1 - k_1) - CQ, \quad (2)$$

где C – средняя концентрация метана на выходе из лавы, об. доли; V – объём лавы и призабойного пространства, м³; q – газовой выделение в лаву и призабойное пространство при отключённой дегазации, м³/мин; k_1 – коэффициент дегазации при новом режиме; Q – расход воздуха, проветривающего лаву и призабойное пространство после изменения режима вентиляции, м³/мин.

В качестве начального условия для уравнения (2) примем

$$C(0) = \frac{q(1 - k_0)}{Q_0}, \quad (3)$$

где k_0 – первоначальный коэффициент дегазации; Q_0 – первоначальный расход воздуха, м³/мин.

Решение уравнения (2) с начальным условием (3) и тем самым граничное условие для уравнения (1) можно представить в виде

$$\tilde{C}(0, t) = \frac{q}{Q} \left\{ (1 - k_1) + [(1 - k_0) \frac{Q}{Q_0} - (1 - k_1)] \exp\left(-\frac{Qt}{V}\right) \right\}. \quad (4)$$

На другом конце вентиляционной выработки примем

$$\frac{\partial \tilde{C}(L, t)}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

где L – длина вентиляционной выработки, м.

Начальное распределение концентрации метана в вентиляционной выработке должно определяться из решения уравнения (1) в стационарном случае при $t \rightarrow \infty$.

Коэффициент турбулентной диффузии газа можно найти по формуле [9]

$$D_x = 4,43(u_0 d)^{2/3}, \quad (6)$$

где u_0 – средняя скорость воздуха по длине выработки, м/с; d – средний диаметр выработки, м.

3. Метод решения

Естественно, при произвольных функциях газовыделения и переменном расходе воздуха невозможно получить аналитическое решение задачи. Поэтому применим далее интегральный метод для получения численного решения задачи. Выберем область интегрирования l согласно рис.1 для интегрального метода.

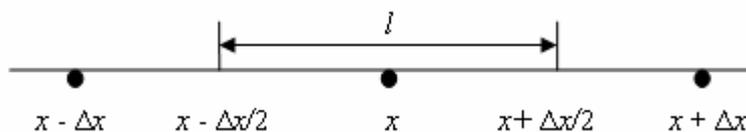


Рис. 1. Область интегрирования для интегрального метода

Интегрируя уравнение (1) на длине Δx и пользуясь теоремой о среднем, при постоянном коэффициенте диффузии получим

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{C}_X^{t+\Delta t} - \tilde{C}_x^t}{\Delta t} + \frac{(u\tilde{C})_{x+\Delta x}^t - (u\tilde{C})_{x-\Delta x}^t}{2\Delta x} = (1-p)D_x \frac{(\tilde{C}_{x-\Delta x}^t - 2\tilde{C}_x^t + \tilde{C}_{x+\Delta x}^t)}{\Delta x^2} + \\ + pD_x \frac{\tilde{C}_{x-\Delta x}^{t+\Delta t} - 2\tilde{C}_x^{t+\Delta t} + \tilde{C}_{x+\Delta x}^{t+\Delta t}}{\Delta x^2} + i_x^t, \end{aligned} \quad (7)$$

где Δx – шаг по пространственной координате, м; Δt – шаг по времени, с; p – удельный вес неявной схемы.

Полученная схема численного расчёта концентрации газа является комбинированной с удельным весом p неявной схемы. В ней неизвестна на новом временном слое только передняя точка $\tilde{C}_{x+\Delta x}^{t+\Delta t}$, которую можно найти при $p = 0$ и подставляя полученное значение в формулу (7), находить искомое значение $\tilde{C}_x^{t+\Delta t}$ для всех точек на всех временных слоях. В результате комбинированная схема превращается в явную схему и имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{C}_x^{t+\Delta t} = & \frac{1}{1 + 2pPe} \{ \tilde{C}_x^t + [(\bar{u}\tilde{C})_{x-\Delta x}^t - (\bar{u}\tilde{C})_{x+\Delta x}^t] Cu / 2 + (1-p) \times \\ & \times (\tilde{C}_{x-\Delta x}^t - 2\tilde{C}_x^t + \tilde{C}_{x+\Delta x}^t) Pe + [\tilde{C}_{x-\Delta x}^{t+\Delta t} + \tilde{C}_{x+\Delta x}^t + [(\bar{u}\tilde{C})_x^t - (\bar{u}\tilde{C})_{x+2\Delta x}^t] Cu / 2 + \\ & + (\tilde{C}_x^t - 2\tilde{C}_{x+\Delta x}^t + \tilde{C}_{x+2\Delta x}^t) Pe + \bar{i}_{x+\Delta x}^t \} pPe + \bar{i}_x^t \}. \end{aligned} \quad (8)$$

где $Cu = \frac{|u_{\max}| \Delta t}{\Delta x}$ – схемное число Куранта [10]; $Pe = \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2}$ – схемное число Пекле [10]; $\bar{u} = u / |u_{\max}|$ – относительная скорость; $\bar{i} = i \Delta t$ – относительная интенсивность газовой выделенности.

Анализ предлагаемой расчётной схемы (8) показывает, что условием устойчивого счёта является требование

$$Cu < 1; \quad Pe < 1/2. \quad (9)$$

Входящие в формулу числа Куранта и Пекле должны заранее выбираться из условия (9) устойчивости расчётной схемы (8).

В соответствии с предложенной одношаговой модифицированной схемой (8) с центральными разностями разработана программа расчёта на ЭВМ переходных газодинамических процессов при различных нарушениях режимов вентиляции и дегазации.

4. Анализ результатов численных и шахтных экспериментов

Для установления адекватности натурному объекту разработанной математической модели переходных газодинамических процессов в горных выработках воспользуемся данными экспериментальных исследований [8]. Исследования были проведены на шахтах Донбасса, разрабатывающих пологие и крутопадающие пласты.

По средним дебитам метана после стабилизации новых режимов вентиляции и дегазации определялось газовыделение из сближенных пластов и вычислялась эффективность дегазации.

Наблюдения за газовой обстановкой на выемочных участках при изменении только режима дегазации проведены на трёх шахтах имени А.Ф. Засядько, «Краснолиманская» и «Кировская». Режимы дегазации на этих участках

осуществлялись путём увеличения или уменьшения разрежения в газопроводах. Это достигалось отключением дегазации других добычных участков, включением резервных вакуум-насосов и регулированием задвижек на газопроводах.

Как показывают результаты наблюдений, при изменении разрежения в участковом газопроводе изменяется содержание метана в исходящих струях лав и участков.

Так, при столбовой системе разработки, на участке 6-й южной лавы шахты «Краснолиманская» при уменьшении разрежения в газопроводе от 7,2 кПа до 0,9 кПа содержание метана увеличилось от 0,44 % до 0,74 %. Последующее увеличение разрежения до 8 кПа позволило снизить концентрацию метана на исходящей вентиляционной струе до 0,24 %. За всё время наблюдений расход воздуха почти не менялся и находился в пределах 7,9 – 8,5 м³/с.

На рис. 2 представлена динамика концентраций метана в вентиляционной выработке на участке 6-й южной лавы шахты «Краснолиманская» при изменении только режима дегазации.

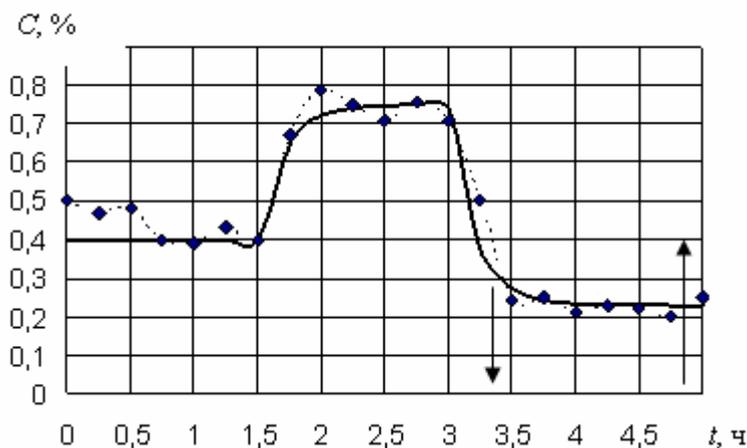


Рис. 2. Динамика концентраций метана в исходящей струе 6-й южной лавы шахты «Краснолиманская» при изменениях режима дегазации

Здесь стрелки указывают на время с момента уменьшения ($t = 1,5$ ч) разрежения в газопроводе и на время с момента его увеличения ($t = 3$ ч) с начала наблюдений.

Как видно из рис. 2, после изменения режима дегазации почти сразу же начинается изменение концентрации метана в исходящей из лавы струе воздуха и спустя 0,5 ч она устанавливается на новом уровне. Газовыделение на выемочном участке в результате снижения разрежения в газопроводе увеличилось в первом случае от 2,07 м³/мин до 3,33 м³/мин. После увеличения разрежения газовыделение, наоборот, уменьшилось от 3,33 м³/мин до 1,16 м³/мин.

На рис. 2 приведены также данные численных экспериментов динамики концентраций метана (сплошная линия) на выходе из лавы. Для определения объёма V лавы и проветриваемой части призабойного пространства кривая,

найденная по формуле (4), накладывалась на экспериментальные точки по методу наименьших квадратов и тем самым определялся искомый объём.

Аналогично, при столбовой системе на участке одной из лав шахты имени А.Ф. Засядько при увеличении разрежения в газопроводе от 11,0 кПа до 13,1 кПа удалось снизить содержание метана в исходящей струе лавы от 0,83 % до 0,7 %, а уменьшение разрежения от 13,1 кПа до 1,8 кПа привело к увеличению содержания метана до 1,05 %. Здесь расход воздуха также почти не менялся и находился в пределах 10,3 – 11,1 м³/с.

На участке 5-й восточной лавы шахты «Кировская», обрабатывающей пласты сплошной системой разработки, разрежение уменьшалось от 6,6 кПа до 0,4 кПа в газопроводах, расположенных в вентиляционной выработке и в выработке с поступающей струёй воздуха от 2,9 кПа до 0,9 кПа. Это вызвало увеличение содержания метана в вентиляционной выработке от 0,75 % до 0,85 %. При последующем увеличении разрежения в газопроводах соответственно до 10 кПа и 3,9 кПа удалось снизить концентрацию метана всего до 0,72 %. Расход воздуха в 5-й восточной лаве почти не менялся и был равен на выходе из лавы 3,2 – 3,6 м³/с и на выходе из участка 11,1 – 11,5 м³/с.

На рис.3 представлена динамика концентраций метана в вентиляционной выработке на участке 5-й восточной лавы шахты «Кировская» при изменении режима дегазации.

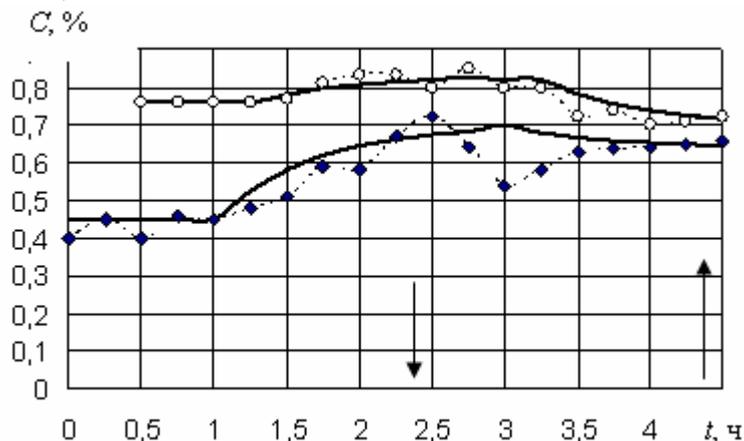


Рис. 3. Динамика концентраций метана в исходящих струях 5-й восточной лавы (ромбики) и участка (кружочки) шахты «Кировская» при изменениях режима дегазации

Здесь стрелки указывают на время с начала снижения разрежения, а затем на время с начала его увеличения. Как видно из рис. 3, изменение режима дегазации сразу же ведёт к изменению концентрации метана в исходящей струе лавы. В то же время в исходящей струе участка изменения концентрации метана наблюдаются с некоторым запаздыванием, что объясняется инерционностью процесса переноса, примерно равного времени однократного обмена воздуха в объёме вентиляционной выработки. Согласно данным рис. 3 видно, что уменьшение разрежения в газопроводах привело к заметному увеличению концентрации метана в исходящей струе лавы и к незаметному её увеличению в

исходящей струе участка. Это можно объяснить тем, что приток метана увеличился, по сути, только в лаву, а по выработке метан только разбавлялся. Отсюда почти незаметно изменение концентрации метана в исходящей струе участка.

Для расчёта динамики концентраций метана в вентиляционной выработке на различных расстояниях от окна лавы использован численный метод. При этом в качестве граничного условия использовалась функция (4) на входе в выработку как $C(0, t)$, а расход воздуха при сплошной системе разработки менялся по экспоненциальной зависимости от 200 м³/мин до 680 м³/мин в соответствии с зависимостью утечек воздуха через выработанное пространство. Результаты численных расчётов представлены на рис. 3 в виде восходящей и нисходящей кривых в исходящей струе участка соответственно при уменьшении вакуума и увеличении вакуума в газопроводах.

Экспериментальные исследования возможности предотвращения образования недопустимых и взрывоопасных концентраций метана средствами дегазации при уменьшении расхода воздуха проводились ещё на 4-х шахтах Донбасса: «Пролетарская-Глубокая», № 17, «Чайкино» и имени Артёма.

Так, на участке лавы № 7 шахты «Пролетарская-Глубокая» сначала отключалась дегазация путём закрытия задвижек на участковом газопроводе, затем восстанавливался прежний режим дегазации, после чего уменьшался расход воздуха от 14,4 м³/с до 3 м³/с. Уменьшение расхода воздуха почти 5 раз достигалось закорачиванием вентиляционных струй и установкой брезентовой перемычки на бортовом штреке. Спустя 3 ч увеличивалось разрежение в дегазационном трубопроводе от 1,3 кПа до 6,5 кПа путём открытия задвижек и отключения дегазации на других участках.

Как показали наблюдения, отключение дегазации на участке лавы № 7 привело к увеличению концентрации метана в исходящей струе лавы от 0,5 % до 0,75 % и в исходящей струе участка от 0,75 % до 1,3 %.

После восстановления прежнего режима дегазации уменьшение расхода воздуха почти в 5 раз вызвало увеличение концентрации метана в исходящих струях лавы и участка соответственно до 1,75 % и 2,2 %. Попытка усилить дегазацию на участке привела лишь незначительному снижению концентрации метана до предельно допустимой нормы 2 %, как видно из рис. 4.

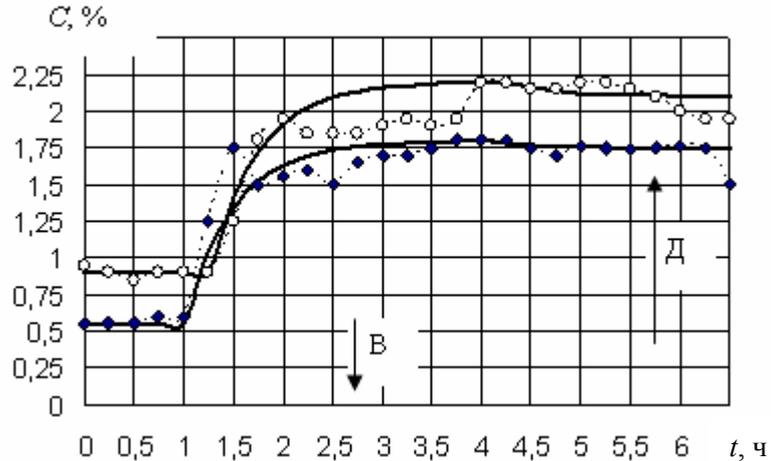


Рис. 4. Динамика концентраций метана в исходящих струях лавы №1 (ромбики) и участка (кружочки) шахты «Пролетарская-Глубокая» при изменении режима вентиляции, а затем при включении дегазации

Здесь стрелками показано время с начала уменьшения расхода воздуха (В) и время с момента включения дегазации (Д).

Для расчёта динамики концентраций метана в вентиляционной выработке на различных расстояниях от окна лавы также использован численный метод. При этом в качестве граничного условия использовалась функция (4) на входе в выработку как $C(0, t)$. Результаты численных расчётов представлены на рис. 3 в виде восходящей кривой после уменьшения расхода воздуха и нисходящей кривой в исходящей струе участка соответственно при уменьшенном расходе воздуха и при увеличении вакуума в газопроводах.

Результаты наблюдений показали, что на добычных участках с высоким коэффициентом дегазации (0,75 и более) дальнейшее увеличение вакуума в газопроводах существенного влияния на газовую ситуацию не оказывает, тем более при глубоком регулировании расхода воздуха.

Большой разброс эмпирических данных о ширине лавы, а, в основном, о ширине активно проветриваемой призабойной зоны можно объяснить различной скоростью подвигания забоя лавы. Обработка экспериментальных данных показала, что между шириной активно проветриваемой зоны выработанного пространства и скоростью подвигания забоя лавы существует линейная зависимость. Поэтому объём лавы и призабойной части выработанного пространства при схемах проветривания В-Н-пт и В-Н-вт может быть ориентировочно определён по формуле

$$V = mL(b_0 + 20v_3), \quad (10)$$

где b_0 – ширина лавы, м; v_3 – скорость подвигания забоя, м/сут.

5. Выводы и направления дальнейших исследований

Анализ полученных результатов исследований показывает, что задав граничные условия (4) в вентиляционной выработке для определенного места от окна лавы, а также распределение расхода воздуха и интенсивности

газовыделения из выработанного пространства, возможно сделать прогноз нестационарной газовой ситуации в вентиляционной выработке численными методами. Это значительно повышает безопасность работ при добыче угля в газовых шахтах.

В дальнейшем предполагается выполнить прогноз газовой ситуации выемочных участков угольных шахт в различных регионах Украины для обобщения результатов и разработки соответствующих рекомендаций по безопасной отработке угольных пластов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. 2-е изд. Перераб. и доп. б.м.: Издательство МГГУ, 2004. – 481 с.
2. Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика. – М.: Недра, 1972. – 274 с.
3. Барский А.С. О турбулентной диффузии примесей в тупиковых и сквозных выработках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1972. – № 3. – С. 70 – 73.
4. Клебанов Ф.С. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях. – М.: Наука, 1974. – 136 с.
5. Колмаков В.А. Математические модели газодинамических и диффузионных процессов. – В кн. Подземная разработка мощных угольных пластов. – Кемерово, изд. КузПИ, 1975. – С. 158 – 163.
6. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Основные принципы и методы диффузионного подхода к расчёту проветривания шахт и рудников // Изв. вузов. Горный журнал. – 1980. – № 1. – С. 42 – 46.
7. Фельдман Л.П., Касимов О.И., Слепцов А.И. Основные закономерности и математическая модель газодинамических процессов на выемочных участках шахт. – В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1973. – Вып. 34. – С. 35 – 41.
8. Греков С.П., Зинченко И.Н. Переходные газодинамические процессы в выемочном участке при изменении режимов вентиляции и дегазации // ФТПРПИ. – 1974. – № 4. – С. 91 – 98.
9. Греков С.П., Калюсский А.Е. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях. – М.: Недра, 1975. – 121 с.
10. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.