

УДК 543.42:621.384.3:622.412

**А.В. Вовна (д-р техн. наук, доц.)**Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск  
кафедра электронной техники  
E-mail: Vovna\_Alex@ukr.net**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЕ ШАХТ**

*Разработана модель распространения метана в тупиковых выработках угольных шахт. Она основана на теории диффузионно-конвективного массопереноса вещества. Данная модель позволяет оценить динамику изменения концентрации метана, а также определить мгновенные значения и скорость его нарастания в заданной точке анализируемой среды. Разработан и реализован способ повышения точности оптического измерителя концентрации метана для угольных шахт. На основании результатов исследований рекомендуется внести поправки в Правила техники безопасности относительно быстрого действия измерителя концентрации метана в сторону уменьшения его величины до 0,15 с, по сравнению с существующим показателем 0,8 с. Использование результатов исследований обеспечивает снижение вероятности возникновения взрывоопасных ситуаций в рудничной атмосфере при внезапных залповых выбросах метана.*

**Ключевые слова:** измеритель, метан, тупиковая выработка, шахта, динамика, модель, точность, быстроедействие.

**Общая постановка проблемы.** Процессы выноса метано-воздушной смеси из призабойного пространства являются наиболее внезапными, которые определяются залповыми выбросами метана и пыли. На основании анализа работ [1, 2], данные процессы описываются стационарными линейными дифференциальными уравнениями или их системами не выше второго порядка. Использование этих уравнений позволяет перейти от анализа динамики к оценке динамических характеристик и параметров процесса измерения концентрации метана в угольных шахтах. При проектировании и разработке оптических измерителей концентрации метана и пыли [3, 4] в рудничной атмосфере необходимо выполнить оценку динамики распространения метана по длине и сечению подготовительных выработок. В связи с этим возникает необходимость разработки математической модели переноса метано-воздушной смеси из призабойного пространства выработок.

Модель позволяет оценить величину динамической погрешности измерителя концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт. При этом, разработка способов повышения точности измерителя позволит обеспечить необходимые метрологические характеристики измерителя при регламентированном быстром действии измерительной системы концентрации метана в тупиковых выработках угольных шахт.

**Постановка задач исследования.** Целью работы является повышение точности оптического измерителя концентрации метана в угольных шахтах путем разработки способа подавления шумовой составляющей выходного сигнала измерителя, что позволит уменьшить величину основной погрешности измерений концентрации метана при сохранении регламентированного быстрого действия измерителя. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработать математическую модель распространения метана в тупиковых выработках угольных шахт;
- оценить динамику изменения концентрации метана, а также определить мгновенные

значения и скорость его нарастания в заданной точке анализируемой среды;

– разработать и реализовать способ повышения точности оптического измерителя концентрации метана для угольных шахт.

– выполнить оценку эффективности предложенного способа и разработать рекомендации при проектировании измерителей концентрации пылегазовых компонент в условиях рудничной атмосферы угольных шахт.

**Результаты разработки и исследований.** При различных способах проветривания тупиковых выработок динамика концентрация метана различна и зависит от длины выработок. Закономерности распространения метана определяются в основном тремя факторами:

1. Направлением движения вентиляционной струи в выработке.
2. Динамикой газовыделения из основных источников (стенок выработки и отбитого угля) в вентиляционную струю.
3. Изменением расхода воздуха (притоков и утечек по длине выработки), связанного с воздухопроницаемостью трубопровода.

Основной особенностью тупиковых выработок является повышение вероятности их загазованности и, следовательно, возрастание взрывчатости метано-воздушной смеси рудничной атмосферы. В связи с увеличением нагрузки на очистные забои в угольных шахтах возрастают темпы проведения и протяженность тупиковых выработок в условиях нарастающей метанообильности и запыленности рудничной атмосферы шахт.

Метанообильность тупиковых выработок в Донецком бассейне составляет от 15 до 20 м<sup>3</sup>/мин [1, 2]. Вместе с тем, подготовительные выработки проветриваются не за счет общешахтной депрессии, создаваемой вентиляторами главного проветривания (ВГМ) со 100 %-ным резервированием вентиляционных установок и систем их питания, а вентиляторами местного проветривания (ВМП) в большинстве случаев без такого резервирования. ВМП подвержены частым остановкам из-за срабатывания электрических защит в системе электроснабжения, нарушений питания и др. Таким образом, вопрос оценки эффективности аппаратуры газовой защиты является актуальным в настоящее время. Существующие методы не позволяют оценить работоспособность системы аэрогазовой защиты, поскольку не учитывают динамику распространения метана по протяженности тупиковых выработок.

Моделирование распространения метана в тупиковой выработке приведено в методике [1, 2]. Однако данная методика имеет ряд допущений. Во-первых, в ней предложено описывать скорость нарастание метана в виде квадратичной зависимости. Такое представление обладает простотой математического описания, но, вместе с тем, имеет высокую погрешность определения концентрации метана ( $\pm 20\%$ ) [5]. Во-вторых, методика не позволяет получить количественную оценку динамики концентрации метана в тупиковой выработке шахт.

С учетом перечисленных замечаний, автором предложено использовать математическую модель распространения метана в тупиковой выработке, которая позволяет оценить динамику распространения концентрации метана в тупиковой выработке, а также определить параметры изменения и скорость нарастания концентрации метана в заданной точке выработки. Реализация модели позволяет провести анализ характеристик и параметров аппаратуры аэрогазовой защиты с точки зрения быстродействия (не более 0,8 с) и динамической погрешности измерительного контроля концентрации метана, величина которой составляет не более удвоенного значения от основной ( $\pm 0,2^{об.}\%$ ) [6]. Это позволит выявить особенности протекания опасных газодинамических процессов, которые приводят к возникновению взрывоопасных концентраций метановоздушной смеси.

Исходным уравнением, описывающим изменения концентрации метана в горной выработке угольных шахт является уравнение диффузионно-конвективного массопереноса [1, 2], которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 C_{CH_4}}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $C_{CH_4}$ ,  $^{об.}\%$  – концентрация метана;  $v$ , м/с – средняя скорость движения воздуха по выработке;  $D$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $t$ , с – время;  $x$ , м – расстояние от забоя до соответствующей точки выработки.

Функциональная зависимость (1) относится к уравнению параболического типа, которое имеет единственное решение в виде вещественного семейства характеристик [7]. Процесс проветривания в горной выработке происходит под действием турбулентной диффузии, при этом изменение концентрации метана по ее сечениям ( $x = const$ ) описывается выражением [1, 2]:

$$C_{CH_4}(t, x = const) = C_{0CH_4}(x) \cdot e^{-k \cdot v \cdot t}, \quad (2)$$

где  $C_{0CH_4}(x = const)$ ,  $^{об.}\%$  – начальная концентрация метана по каждому сечению выработки;  $k = (0,1 - 0,9)$  – к.п.д. систем проветривания горной выработки угольной шахты.

Начальным условием уравнения (1) является:

$$C_{CH_4}(t = 0, x = const) = 0. \quad (3)$$

Граничное условие для (1) определяется при  $x = 0$  из зависимости (2):

$$C_{CH_4}(t, x = 0) = C_{0CH_4} \cdot e^{-k \cdot v \cdot t}. \quad (4)$$

При решении дифференциального уравнения (1) с учетом начальных (3) и граничных условий (4) получено изменение концентрации метана в пространстве ( $x$ , м) и времени ( $t$ , с):

$$C_{CH_4}(t, x) = \frac{C_{0CH_4} \cdot x}{2 \cdot e^{-\frac{v}{2 \cdot D} \cdot x + \left(\frac{v^2}{4 \cdot D} - k \cdot v\right) \cdot t}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot (t - \tau)} + \left(\frac{v^2}{4 \cdot D} - k \cdot v\right) \cdot \tau} \frac{1}{(t - \tau)^{1,5}} d\tau. \quad (5)$$

Исследования динамики изменения концентрации метана в тупиковой выработке проведены при следующих начальных условиях:  $C_{0CH_4} = 5$   $^{об.}\%$  – начальная концентрация метана, величина которой в 2,5 раза превышает допустимое значение в тупиковой выработке [8, 9];  $S = 10$  м<sup>2</sup> – сечение тупиковой выработки;  $\Pi = 6$  м – периметр выработки;  $v = (1 - 4)$  м/с – скорость воздуха в выработке;  $k = 0,3$  – коэффициент полезного действия воздушной струи. Результаты расчета динамики концентрации метана в тупиковой выработке шахт, с использованием выражения (5), по ее длине  $x$  от 0 до 50 м с шагом 1 м в течение времени  $t$  от 0 до 6 с при  $\Delta t = 0,2$  с, приведены на рис. 1.

Из анализа полученной зависимости (см. рис. 1) следует, что при начальной концентрации метана  $C_{0CH_4} = 5$   $^{об.}\%$  на расстоянии 5 м от призабойного пространства тупиковых выработок его значение достигает 1,8  $^{об.}\%$  в течении времени 0,8 с. (т. А на рис. 1), поэтому быстродействие измерителя должно быть не хуже 0,8 с, что согласовывается с требованиями ДСТУ [6] для быстродействующих измерителей концентрации метана. Так, согласно с требованиями к стационарным автоматическим системам контроля концентрации метана, которые выполняют отключения электроэнергии в призабойном пространстве, величина уставки по метану составляет 2  $^{об.}\%$  [8, 9], что подтверждает адекватность разработанной математической модели динамики процесса распространения метана по длине тупиковой выработки.

Разработанная модель позволяет оценить величину динамической погрешности измерений концентрации метана  $\Delta_{CH_4}^{дин}$ , значение которой может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta_{CH_4}^{дин}(t, x) = \pm(C_{CH_4}(t + T_{09}, x) - C_{CH_4}(t, x)), \quad (6)$$

где  $T_{09}, c$  – быстродействие измерителя концентрации метана, которое определяется на уровне 90 % от установившегося значения его выходного сигнала при подачи единичного воздействия на вход измерительного преобразователя (ИП).

В соответствии с требованиями ДСТУ [6] метанометры стационарные, используемые в качестве быстродействующих, должны обеспечивать время срабатывания по объемной доле метана не более 0,8 с ( $T_{09}=0,8 c$ ), при этом график изменения динамической абсолютной погрешности измерений концентрации метана по длине горно-шахтной выработки  $x$  от 0 до 50 м в течении времени  $t$  от 0 до 6 с приведен на рис. 2.

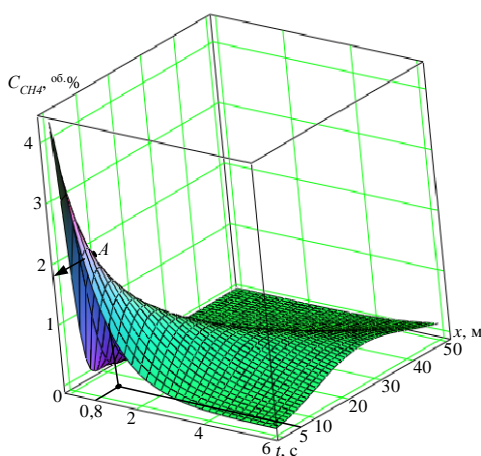


Рисунок 1 – Динамика изменения  $C_{CH_4}$  в тупиковой выработке

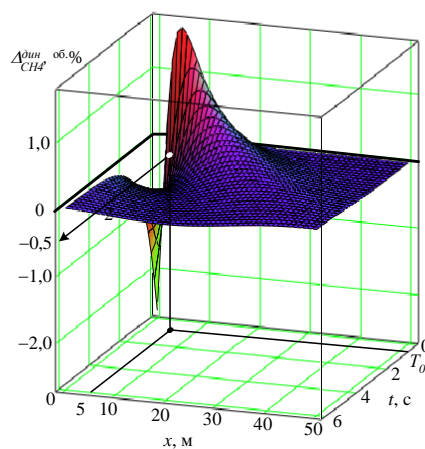


Рисунок 2 – Изменение  $\Delta_{CH_4}^{дин}$  измерения  $C_{CH_4}$  по длине выработки в течение времени

Из анализа полученной зависимости изменения динамической погрешности измерений концентрации метана (см. рис. 2) видно, что вблизи призабойного пространства на расстоянии  $x=0,1$  м в момент времени  $t=0,1$  с величина абсолютной динамической погрешности составляет  $-2,6$  об.%. С увеличением же расстояния от призабойной области величина динамической абсолютной погрешности измерений концентрации метана существенно снижается. Так, на расстоянии  $x=5$  м от призабойного пространства тупиковых выработок, на котором установлены измерители концентрации метана, согласно требований [9], значение абсолютной динамической погрешности измерений концентрации метана уменьшается до  $+1,7$  об.%, а с учетом быстродействия измерителя ( $T_{09}=0,8 c$ ) ее величина составляет  $-0,5$  об.%, что в 2,5 раза превышает значение основной абсолютной погрешности измерения ( $\pm 0,2$  об.%). Поэтому быстродействие данных измерителей, используемых в качестве стационарных метанометров, должно составлять не более 0,8 с, что полностью совпадает с требованиями Техники безопасности [9] и ДСТУ [6] для быстродействующих измерителей концентрации метана. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенная модель адекватно описывает динамику процесса распространения метана по длине подготовительных выработок шахт.

При проектировании и разработке измерителей концентрации метана и пыли в рудничной атмосфере возникает задача повышения точности измерений за счет уменьшения случайной составляющей основной погрешности результатов измерений. Случайную

составляющую погрешности возможно уменьшить путем обработки результатов измерений при многократных наблюдениях. Наиболее эффективным и простым, с точки зрения уменьшения величины случайной составляющей погрешности, является метод осреднения результатов многократных наблюдений [10]. Поэтому возникает необходимость выполнения оценки между числом наблюдений и величиной случайной погрешности при усреднении результата, который при этом рассчитывается по формуле:

$$\overline{C_{CH_4 j}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=n-j}^{N-1+n \cdot j} C_{CH_4 i}, \quad (7)$$

где  $C_{CH_4 i}$  – результаты наблюдений концентрации метана через фиксированный интервал времени, определяемый периодом опроса ИП;  $\overline{C_{CH_4 j}}$  – результаты измерений концентрации метана;  $N$  – число наблюдений в интервале осреднения;  $n$  – количество точек окна перекрытия интервалов, при этом, если  $n=N$ , то интервалы наблюдений не перекрываются.

На рис. 3 приведена диаграмма обработки результатов многократных наблюдений с числом точек в интервале осреднения  $N=10$ , при этом количество точек перекрытия интервала равно  $N - n = 10 - 7 = 3$ .

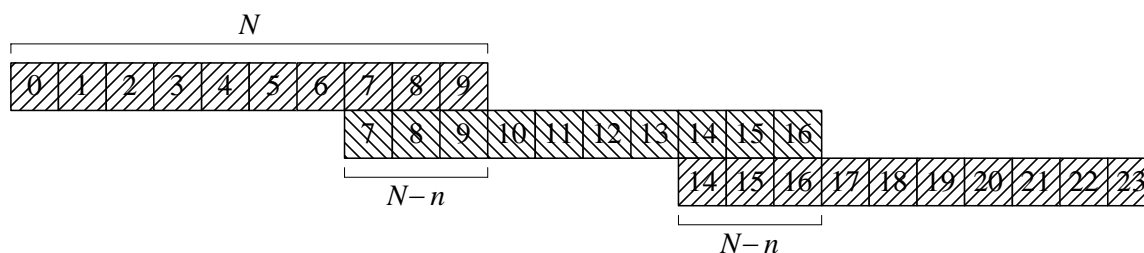


Рисунок 3 – Диаграмма обработки результатов многократных наблюдений при измерении концентрации газовых компонент

Для оценки зависимости между числом наблюдений и величиной случайной погрешности при осреднении результатов исследован случайный стационарный сигнал с нормальным законом распределения со следующими параметрами: математическое ожидание изменения концентрации метана  $m_{CH_4} = 0,3^{об.}\%$ ; среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{CH_4} = 0,08^{об.}\%$ ; количество точек выборки  $NN = 3000$ . На рис. 4 приведены графики изменения выходного сигнала ИП при периоде его опроса 10 мс: 1 – без компенсации шумовой составляющей; 2 – с использованием осреднения результатов наблюдений при числе точек  $N=10$  в интервале и количестве точек перекрытия интервала  $N - n = 10 - 10 = 0$ .

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований, получена оценка максимального значения шумовой составляющей выходного сигнала ИП, которая соответствует величине основной абсолютной погрешности результатов измерений  $C_{CH_4}$  (см. рис. 5), при изменении числа наблюдений в интервале осреднения  $N$  от 2 до 16 и количестве точек перекрытия интервала  $N - n$  от 3 до 10. На рис. 5 обозначено: 1 (—■—) – изменение максимального значения основной абсолютной погрешности результатов измерений ( $\Delta_{CH_4}$ ) с ростом числа наблюдений ( $N$ ) в интервале осреднения при количестве точек перекрытия интервала  $N = n$  (интервалы наблюдений не перекрываются); 2 (×) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 10$  с  $n$  от 3 до 10; 3 (+) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 9$  с  $n$  от 3 до 9; 4 (□) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 8$  с  $n$  от 3 до 8; 5 (◇) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 7$  с  $n$  от 3 до 7; 6 (○) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 6$  с  $n$  от 3 до 6; 7 (●) –  $\Delta_{CH_4}$  при  $N = 5$  с  $n$  от 3 до 5.

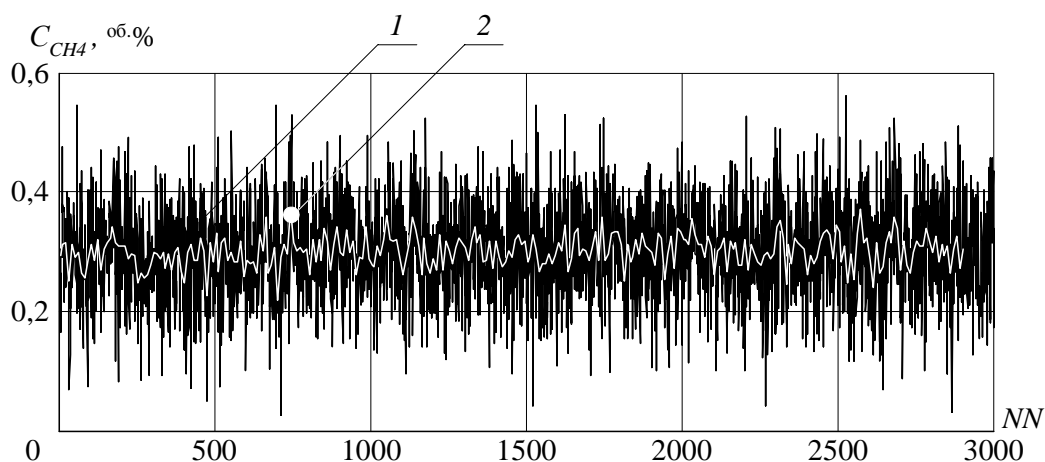


Рисунок 4 – Графики изменения выходного сигнала ИП при периоде опроса 10 мс (1) с использованием осреднения результатов (2), при числе наблюдений в интервале осреднения  $N=10$  и  $N-n=0$

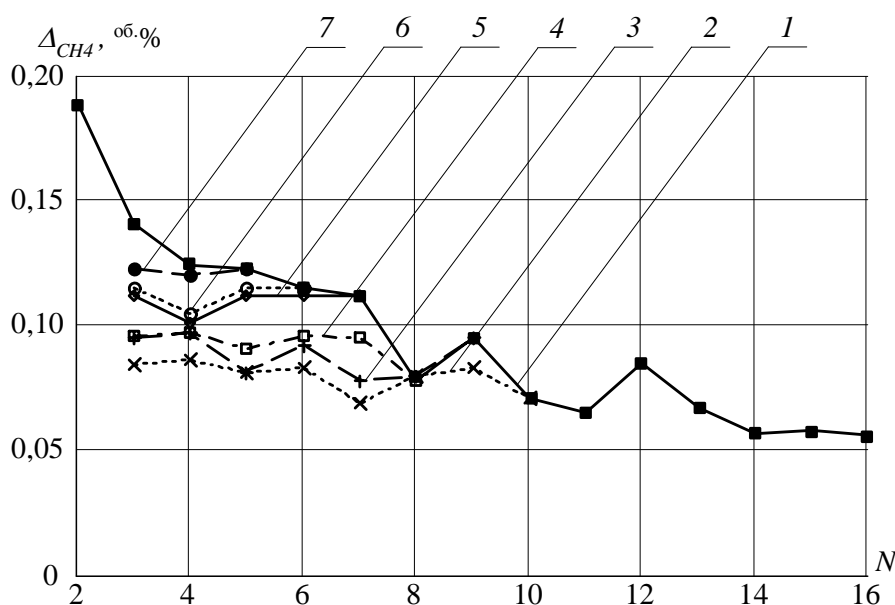


Рисунок 5 – График изменения максимального значения основной абсолютной погрешности результатов измерений  $C_{CH_4}$  от  $N$  от 2 до 16 и  $N-n$  от 3 до 10

Анализ зависимости (см. рис. 5) показывает, что при увеличении числа точек наблюдений до 8, максимальное значение основной погрешности результатов измерений уменьшается в 2,4 раза по сравнению с  $N=2$  ( $0,188^{об.}\%$ ), а в диапазоне изменения  $N$  от 8 до 16 – уменьшается в 1,4 раза при  $N=16$  ( $0,077^{об.}\%$ ) по сравнению с  $N=8$  ( $0,055^{об.}\%$ ). Поэтому максимальное число точек в интервале осреднения результатов наблюдений рекомендуется выбирать от 8 до 10. Как показали проведенные исследования (см. рис. 5), количество точек окна перекрытия интервалов ( $n$ ) практически не влияет на значение основной погрешности, поэтому дальнейшие исследования проведены при  $n=N$ .

Уменьшение величины случайной составляющей основной абсолютной погрешности результатов измерений концентрации метана путем осреднения результатов наблюдений приводит к увеличению динамической погрешности. Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных исследований, целью которых являлось определение величин  $N$ , при которой динамическая погрешность не должна превышать удвоенного значения основной абсолютной погрешности измерений концентрации метана (не более  $\pm 0,2^{об.}\%$ ) [6].

Как отмечалось ранее, быстродействие измерителей, используемых в качестве стационарных метанометров, должно составлять не более 0,8 с [6], также, при проведении исследований установлено, что для снижения величины основной абсолютной погрешности измерений концентрации в 2,4 раза, рекомендуется использовать длину интервала осреднения результатов наблюдений не более 8 точек. Поэтому необходимо оценить значение динамической погрешности результатов измерений при периоде опроса ИП 0,1 с.

В результате исследований на основе предложенных зависимостей изменение концентрации метана в пространстве и времени (5) и оценке величины ее абсолютной динамической погрешности измерений (6), получены графики изменения динамической погрешности измерений концентрации метана ( $\Delta_{CH_4}^{дин}$ ) с периодом опроса измерительного преобразователя 0,1 с при увеличении  $N$  от 2 до 8 в интервале осреднения результатов наблюдений. Результаты исследований приведены на рис. 6, где обозначено:  $\blacksquare$  – изменение динамической погрешности ( $\Delta_{CH_4}^{дин}$ ) с ростом числа наблюдений  $N$  в диапазоне от 2 до 8 интервала осреднения.

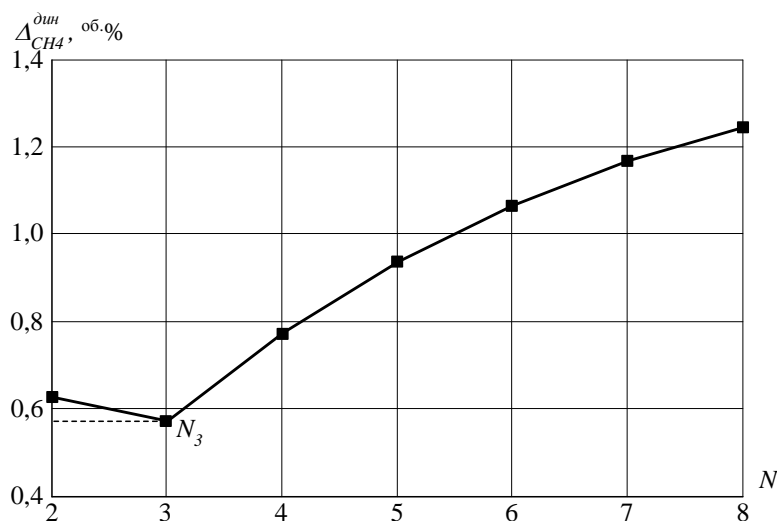


Рисунок 6 – Изменение динамической погрешности измерений  $C_{CH_4}$  с периодом опроса ИП 0,1 с при увеличении  $N$  от 2 до 8

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований (см. рис. 6) можно сделать вывод, что даже при числе наблюдений  $N=3$ , величина динамической погрешности измерений концентрации метана составляет  $\pm 0,57$  об.%, (т.  $N_3$  на рис. 6), что в 1,4 раза больше удвоенного значения основной погрешности измерений ( $\pm 0,2$  об.%). Поэтому использование метода осреднения результатов многократных наблюдений с периодом опроса измерительного преобразователя 0,1 с приводит к тому, что показатели точности, обусловленные влиянием динамической погрешности измерений, выходят за допустимые пределы. И, как следствие, осреднения результатов наблюдений становится неэффективным, что может быть причиной ложных срабатываний измерительной аппаратуры системы аэрогазовой защиты шахт из-за появления грубых погрешностей в результатах измерений.

Для устранения выявленного негативного результата, автором предложено выполнять наблюдения измеряемой концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт с периодом опроса измерительного преобразователя 10 мс. При проведении аналогичных исследований получены графики  $\Delta_{CH_4}^{дин}$  с периодом опроса измерительного преобразователя 10 мс при увеличении числа наблюдений  $N$  от 5 до 10 в интервале осреднения результатов наблюдений, которые приведены на рис. 7, где обозначено:  $\blacksquare$  – изменение динамической погрешности ( $\Delta_{CH_4}^{дин}$ ) с ростом числа наблюдений ( $N$ ) в интервале от 2 до 10.

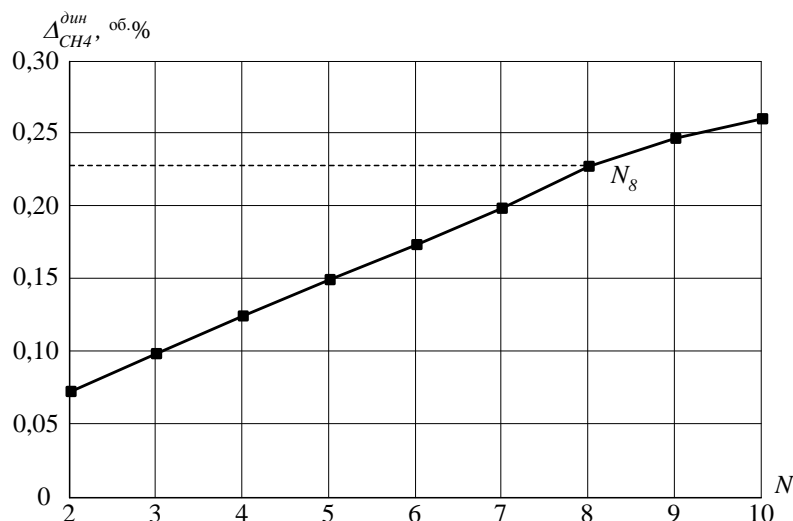


Рисунок 7 – Изменение динамической погрешности измерений  $C_{CH_4}$  с периодом опроса ИП 10 мс при увеличении  $N$  от 2 до 10

Из анализа результатов исследований можно сделать вывод, что при числе наблюдений  $N=8$  величина динамической абсолютной погрешности составляет  $\pm 0,22$  об.%, (т.  $N_8$  на рис. 7), что в 1,8 раза меньше удвоенного значения основной погрешности измерений ( $\pm 0,2$  об.%). Полученный результат полностью удовлетворяет поставленным требованиям, как к основной, так и к дополнительной динамической погрешностям измерения концентрации метана.

Выполненные исследования позволили установить период опроса измерительного преобразователя для получения необходимых величин основной статической и дополнительной динамической абсолютной погрешностей измерения концентрации метана. В результате исследований получены графики изменения абсолютной величины погрешности измерений концентрации метана от  $N=(2-10)$  при изменении периода опроса ИП от 10 до 40 мс, которые приведены на рис. 8, где обозначено: 1 ( $\times$ ) – изменение основной погрешности измерений концентрации метана ( $\Delta_{CH_4}^{осн}$ ) с ростом числа наблюдений ( $N$ ) в интервале осреднения; 2 (+) – изменение динамической погрешности измерений концентрации метана ( $\Delta_{CH_4}^{дин}$ ) при периоде опроса измерительного преобразователя 10 мс; 3 ( $\square$ ) –  $\Delta_{CH_4}^{дин}$  при 20 мс; 4 ( $\diamond$ ) –  $\Delta_{CH_4}^{дин}$  при 30 мс; 5 ( $\circ$ ) –  $\Delta_{CH_4}^{дин}$  при 40 мс.

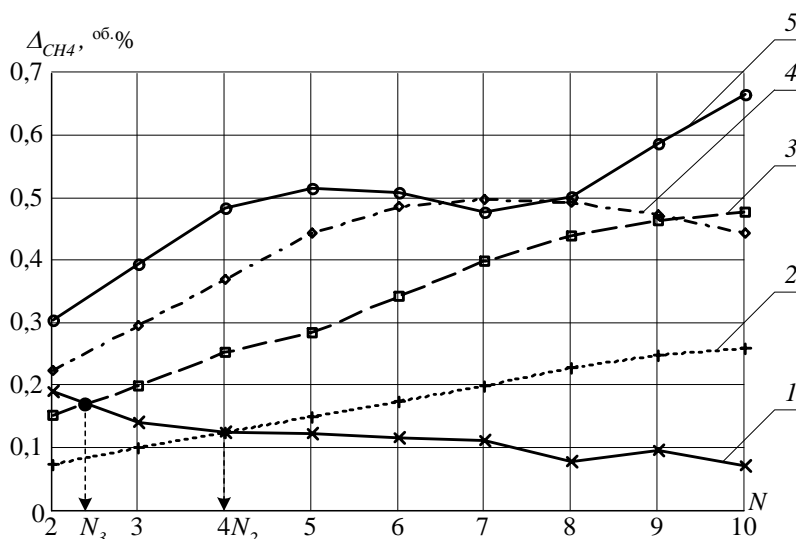


Рисунок 8 – Изменение абсолютной величины погрешности измерений  $C_{CH_4}$  от  $N=(2-10)$  при изменении периода опроса ИП в диапазоне от 10 до 40 мс



Из анализа зависимостей (см. рис. 8) следует, что величины основной абсолютной погрешности измерений концентрации метана при  $N=4$  (см. рис. 8, 1) и динамической погрешности при периоде опроса ИП 10 мс (см. рис. 8, 2), равны и составляют  $\pm 0,13$  об. % (точка  $N_2$  на рис. 8), что полностью удовлетворяет поставленным требованиям к точности измерителя  $C_{CH_4}$ . При увеличении же периода опроса ИП до 20 мс (см. рис. 8, 3) и  $N>2$  (см. рис. 8, 1), величины погрешностей также равны между собой и составляют значение  $\pm 0,17$  об. % (точка  $N_3$  на рис. 8), но полученный результат является неприемлемым из-за малого числа наблюдений измеряемой  $C_{CH_4}$ , что, как уже отмечалось выше, приведет к ложным срабатываниям измерительной аппаратуры системы аэрогазовой защиты угольных шахт.

### Выводы.

1. Из результатов работы следует, что для достижения требуемого значения основной абсолютной погрешности измерений концентрации метана необходимо установить число наблюдений в диапазоне от 8 до 10, что позволит исключить проявление грубых погрешностей в результатах измерений.

2. При этом величина основной абсолютной погрешности измерений составит не более  $\pm 0,10$  об. %, что в 2 раза меньше регламентируемого ДСТУ [6] значения. Период опроса ИП должен быть не более 15 мс, что обеспечит величину динамической абсолютной погрешности измерений  $C_{CH_4}$  не более удвоенного значения от основной ( $\pm 0,20$  об. %).

3. С учетом полученных результатов быстродействие измерителя концентрации метана не превышает:  $T_{09}=(8-10) \cdot 15 \text{ мс}=(0,12-0,15) \text{ с}$ , что в (5–6) раз меньше необходимого значения (0,8 с), регламентированного ДСТУ [6].

4. Таким образом, автором было рекомендовано внести регламентные поправки относительно величины быстродействия измерителя концентрации метана в сторону уменьшения ее значения до 0,15 с, что обеспечит снижение вероятности возникновения взрывоопасных ситуаций в рудничной атмосфере угольных шахт при внезапных залповых выбросах метана.

### Список использованной литературы

1. Мясников, А.А. Проветривание подготовительных выработок при проходке комбайном / А.А. Мясников, С.П. Казаков. – М.: Недра, 1981. – 269 с.
2. Мясников, А.А. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах / А.А. Мясников, В.П. Садохин, Т.С. Жирнова. – М.: Недра, 1977. – 248 с.
3. Вовна, А.В. Быстродействующий измеритель концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зори // Вісн. Кременчуцьк. нац. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2013. – Вип. 6 (83). – С. 114 – 119.
4. Вовна, А.В. Разработка и исследование экспериментального образца измерителя концентрации метана для угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зори // Известия ЮФУ. Технические науки. Вып. «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – Таганрог, 2014. – № 4 (153). – С. 171 – 177.
5. Гавриленко, Б.В. Математическая модель распространения метана в тупиковой выработке шахты / Б.В. Гавриленко, К.Е. Новикова // Наук. пр. Донецьк. держ. техн. ун-ту. Сер. Гірничо-електромеханічна. – Донецьк, 2006. – Вип. 12. – С. 42 – 47.
6. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – Действ. от 2009-02-01. – К.: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с.
7. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
8. Шевцов, Н.Р. Взрывозащита горных выработок при их строительстве: учеб. пособ. / Н.Р. Шевцов. – Донецк: Новый мир, 1998. – 328 с.

9. Правила безпеки у вугільних шахтах: Держ. норматив. акт про охорону пр. – К., 1996. – 208 с.
10. Bewoor, A.K. Metrology & measurement / A.K. Bewoor, V.A. Kulkarni. – Noida: McGraw-Hill Education, 2009. – 558 p.

### References

1. Mjasnikov, A.A. and Kazakov S.P. (1981), *Provetrivanie podgotovitel'nyh vyrabotok pri prohodke kombajnom* [Development workings of airing in the sinking of a combine], Nedra, Moscow, Russia.
2. Mjasnikov, A.A., Sadohin V.P. and Zhirnova T.S. (1977), *Primenenie JeVM dlja reshenija zadach upravlenija metanovydeleniem v shahtah* [The use of computers for the solution of methane control problems in mines], Nedra, Moscow, Russia.
3. Vovna, A.V and Zori A.A. (2013) «The speed methane concentration meter in the atmosphere of coal mines», *Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu im. Mihajla Ostrograds'kogo.*, № 6 (83), pp. 114 – 119.
4. Vovna, A.V and Zori A.A. (2014) «Development and research experimental samples of the methane concentration meter for coal mines», *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Vyp. «Komp'juternye i informacionnye tehnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii».*, № 4 (153), pp. 171 – 177.
5. Gavrilenko, B.V and Novikova K.E. (2006) «Mathematical model distribution of methane in a dead-end development of the mine», *Naukovi praci Donec'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Serija «Girnicno-elektromehanichna».*, № 12, pp. 42 – 47.
6. Ukraine Ministry of Coal Industry (2009), 24032:2009. *Pribory shahtnye gazoanaliticheskie. Obshhie trebovanija, metody ispytanjia* [24032:2009 Mine gas analysis instruments. General requirements, test methods.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
7. Bronshtejn, I.N. and Semendjaev K.A. (1986), *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges], Nauka, Moscow, Russia.
8. Shevcov, N.R. (1998), *Vzryvozashhita gornyh vyrabotok pri ih stroitel'stve: uchebnoe posobie* [Explosion mining in their construction: a training manual], Novyj mir, Donetsk, Ukraine.
9. Ukraine Ministry of Coal Industry (1996). *Pravila bezpeki u vugil'nih shahtah: Derzhavnij normativ akt pro ohoronu praci* [Safety rules in coal mines: State regulation of labor protection.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
10. Bewoor, A.K. and Kulkarni V.A. (2009), *PPP* [Metrology & measurement], McGraw-Hill Education, Noida, India.

Поступила в редакцію:  
23.03.2016

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Зори А.А.

**О.В. Вовна**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Підвищення точності оптичного вимірювача концентрації метану в рудничній атмосфері шахт**

Розроблено модель розповсюдження метану в тупикових виробках вугільних шахт. Вона заснована на теорії дифузійно-конвективного масоперенесення речовини. Ця модель дозволяє оцінити динаміку зміни концентрації метану, а також визначити миттєві значення та швидкість його наростання у заданій точці аналізованого середовища. Розроблено та реалізовано спосіб підвищення точності оптичного вимірювача концентрації метану для вугільних шахт. На основі результатів досліджень рекомендується внести поправки до Правил техніки безпеки щодо швидкодії вимірювача концентрації мета-

ну в сторону зменшення його величини до 0,15 с, у порівнянні з існуючим показником 0,8 с. Використання результатів досліджень забезпечить зниження вірогідності виникнення вибухонебезпечних ситуацій у рудничній атмосфері при раптових залпових викидах метану.

**Ключові слова:** виміррювач, метан, тупикова виробка, шахта, динаміка, модель, точність, швидкодія.

**O.V. Vovna**

*Donetsk National Technical University*

***Improving the accuracy of the optical instrument for measuring the concentration of methane in the mine atmosphere***

*Processes of removal of methane-air mixture from the bottom-hole space mining of coal mines are among the most unexpected, which are determined by huge emissions of methane and dust. These processes are described by stationary linear differential equations, or systems with an order no higher than second. The use of these equations allows us to move from analysis to evaluation of the dynamics of dynamic characteristics and parameters of measuring the concentration of methane in the mines. The model of methane distribution in deadlock mine has been worked out. It is based on the theory of diffusion-convective mass transfer material. The proposed model allows us to estimate the dynamics of changes in methane concentrations, and to determine the instantaneous values and the rate of its growth at a given point of the medium analyzed. In the study of the developed model it was found that the performance of stationary methane should be no more than 0.8 seconds, which coincides with the requirements of the safety rules in the mines. On the basis of these studies it was found that to achieve the desired values of the basic error of measurement of concentration of methane it is necessary to set the number of observations in the range from 8 to 10. This will prevent the manifestation of gross errors in the measurement results. The value of basic absolute measurement error will not exceed 0.1 vol.%, which is 2 times less than the regulated value. In this period the transmitter poll must be not more than 15 ms, providing a dynamic error value of measuring methane concentration of no more than twice the value of the primary (0.20 vol.%). Given the obtained results the required performance of concentration methane should not exceed (0.12 – 0.15) seconds that is (5 – 6) times less than the desired regulated value (0.8 seconds). In paper it is recommended to make routine amendments regarding the value of methane concentration meter speed to decrease its value to 0.15 seconds, which allows reduction in the probability of hazardous situations in the mine atmosphere of coal mines in sudden salvo emissions of methane.*

**Keywords:** meter, methane, deadlock development, mine, dynamics, model, accuracy, speed.



**Вовна Александр Владимирович**, Украина, окончил Донецкий национальный технический университет, д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры электронной техники. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина).

Основное направление научной деятельности – разработка, моделирование и исследование компьютеризированных информационно-измерительных систем аэрогазового контроля.