

**АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РАСХОДА
МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ДЕГАЗАЦИОННЫХ
ТРУБОПРОВОДАХ**

Розглянуто можливість застосування малогабаритного тахометричного датчика контролю витрат метаноповітряної суміші в дегазацийних трубопроводах замість традиційних витратомірів, встановлених стаціонарно.

**ANALYSIS WAY AND MEANS OF CONTROL FLOW METHANE-AIR
MIXTURE IN THE DEGASSING PIPELINES**

The possibility of the use of compact tachometric sensor control of the charge methane-air mixture in the degassing pipelines instead of traditional flow meters installed permanently is examined.

С ростом глубины ведения горных работ и интенсификацией нагрузки на лаву метанообильность угольных шахт увеличивается в такой степени, что поддерживать содержание метана в выработках в допустимых пределах средствами одной только шахтной вентиляции невозможно. Её возможности оказываются исчерпанными, что требует осуществления специальных мероприятий по борьбе с метаном, из которых главным является дегазация выработок.

В пластах основных геолого-промышленных районов Донбасса содержится около 855 млрд. м³ метана, в том числе в Красногвардейском – 231,5 млрд. м³ и Донецко-Макеевском – 202,1 млрд. м³ метана. В 2011 году было высвобождено порядка 1400 млн. м³ газа-метана, что на 10 млн. м³ больше чем в 2010 году. Из извлеченного газа каптировано дегазационными системами 372,1 млн. м³ (26%), из которых утилизировано лишь 149,0 млн. м³ (10%) [1]. Около 1028 млн. м³ метана было выброшено в атмосферу, что привело не только к большим материальным потерям, но и к существенному усилению парникового эффекта Земли.

Дегазация метанообильных пластов с содержанием газа-метана более 10 м³ на тонну беззольного угля является обязательной. Это связано с тем, что при выемке угля действующая система вентиляции не справляется с выносом выделяемого газа-метана, что существенно повышает опасность проведения горных работ. Раньше эту проблему традиционно решали путем увеличения количества подаваемого воздуха или вынужденным сокращением скорости ведения очистных работ. Однако увеличение подачи количества свежего воздуха на разрабатываемые глубины при существующей системе вентиляции очень дорогостоящее мероприятие, к тому же, скорости воздушного потока в очистных выработках уже достигли предельных нормируемых величин, а снижение нагрузки на очистной забой существенно удорожает итак очень высокую себестоимость угля. Поэтому единственный наиболее эффективный способ решения загазованности выработок это проведение дегазационных работ. Сегодня на 47 украинских шахтах осуществляется дегазация угольных пластов, при этом

40% выделенного газа, который имеет концентрацию метановоздушной смеси в среднем около 31,5%, утилизируется. При этом реализуется возможность использования метана в качестве топлива для заправки автомобилей, получения тепловой и электрической энергии, экономятся средства для собственных нужд и зарабатываются существенные финансовые средства на сокращениях выбросов метана в атмосферу. Одним из важнейших факторов, сдерживающих утилизацию каптированного метана, является отсутствие контрольно-измерительной и автоматической регулирующей аппаратуры, обеспечивающей безопасное транспортирование его и использование [1].

Поэтому уже давно встал вопрос о создании надёжного способа и средства измерений дебита метана в дегазационных трубопроводах. Транспортировка метановоздушной смеси осуществляется по трубопроводам с помощью вентиляторов (эжекторов) отсасывающих газ-метан через изолированный отвод устья скважины, внедренной в дегазируемый угольный массив. Эффективность дегазации оценивается коэффициентом эффективности дегазации, равным отношению количества газа, извлеченного в процессе дегазации за данный период времени, к полному газовыделению за этот период. Высокая эффективность дегазации достигается при правильном бурении скважин. Операция бурения скважины является дорогостоящим и длительным технологическим процессом. Поэтому оперативная оценка коэффициента эффективности дегазации по дебиту метана из пробуренных скважин может существенно снизить затраты времени и средств на дегазацию данного угольного пласта путём внесения поправок в топологию размещения дегазационных скважин.

Особое значение этот вопрос приобретает в настоящее время в связи с тенденцией значительного повышения нагрузки на лаву и, соответственно, росту газообильности лавы, поэтому проведение интенсивной дегазации пласта приобретает определяющую роль в технологическом процессе его разработки.

Максимальный дебит скважин наблюдается в период максимальной нагрузки сближенного пласта от давления. Затем он уменьшается и через несколько месяцев скважина истощается. Продолжительность периода целесообразного действия скважины достигает 10 месяцев. Содержание метана в метановоздушной смеси может находиться в пределах 60 – 100 %, а её максимальный дебит обычно составляет 2 – 10 м³/мин. Дегазацию сближенных пластов скважинами целесообразно производить при газовыделении из них не менее 3 м³/мин. Коэффициент эффективности дегазации сближенных пластов при правильном заложении скважин составляет 0,5 – 0,8 [2].

Устье дегазационной скважины имеет большой диаметр для цементации в нём металлической трубы, соединяющей скважину с магистральным трубопроводом. Цементация устья скважины позволяет уменьшить подсосывание воздуха из выработки. К магистральному трубопроводу подключаются все действующие скважины, а сам трубопровод соединяется с вакуум-насосом, расположенным на поверхности. Таким образом, датчик расходомера, измеряющего дебит отдельной скважины, целесообразно расположить в трубе, соединяющей

устье скважины с магистральным трубопроводом. Обычно диаметр трубы составляет около 100 мм, а дебит метана в ней, как отмечалось выше, 2-10 м³/мин.

В настоящее время для измерений расхода метановоздушной смеси в дегазационной сети наиболее широко используются сужающие устройства, в основном диафрагмы. Протекающий через сужающее устройство поток газовой смеси создаёт на нём перепад давления ΔP , который измеряется дифференциальным микроманометром. Тогда объёмный расход может быть выражен формулой (1)

$$Q = \alpha \cdot S \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}, \quad (1)$$

где α - коэффициент расхода; S - площадь сечения сужающего устройства; ρ - плотность газовой смеси.

Этот метод, несмотря на его широкое распространение, имеет ряд существенных недостатков, затрудняющих его применение в шахтных условиях и ограничивающих точность полученных результатов измерений. Важнейшие из них следующие:

- необходимость использования стеклянных жидкостных микроманометров типа ММН или МКВ, что крайне неудобно в шахтных условиях;
- необходимость создания большого местного сопротивления в трубопроводе для повышения точности измерений;
- нестабильность местного сопротивления, создаваемого сужающим устройством вследствие его загрязнения частицами угольной и породной пыли, взвешенной в протекающем газовой смеси;
- сложностью определения коэффициента расхода α и его непостоянство при изменении параметров среды;
- зависимость плотности ρ газовой смеси от её состава, температуры, давления и влажности.

Значительно более удобным в эксплуатации и точным является турбинный измеритель среднего объёмного расхода газовой смеси. Он представляет собой трубу калиброванного сечения, внутри которой соосно закреплена крыльчатка (турбина), занимающая её полное сечение. Скорость вращения крыльчатки и объёмный расход Q газовой смеси (м³/с) связаны зависимостью [4]

$$\frac{Q}{nD^3} = f\left(\frac{nD^2}{\nu}\right), \quad (2)$$

где n – скорость вращения крыльчатки, об/с; D – диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость газовой смеси, м²/с.

Как видно из графика на рис. 1, учет конкретного вида функции f важен только при низких скоростях вращения крыльчатки. Обычно расходомер рабо-

тает в линейной области, где величина $\frac{Q}{nD^3}$ постоянна, так что скорость вращения крыльчатки прямо пропорциональна среднему объемному расходу газовой смеси. При очень малых значениях расходов, то есть малых скоростях газовой смеси в трубопроводе, где $\left(\frac{nD^2}{v}\right) \ll 1000$, функция f становится неопределенной в конкретных условиях измерений, а характеристика расходомера, как видно из рисунка 1 – нелинейной. Поэтому точные измерения в этой области практически невозможны. Конструкция и результаты исследований турбинного зонда – расходомера, разработанного для измерений дебита метана в дегазационных скважинах, приведены в [5].

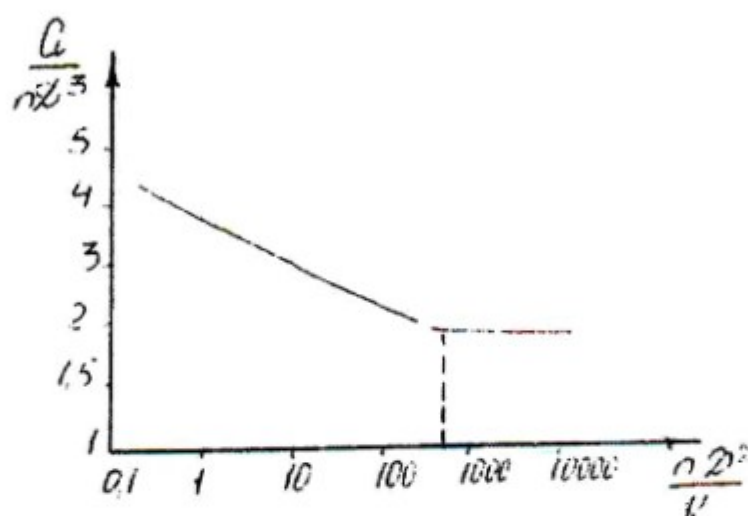


Рис. 1 – Характеристика расходомера

Рассмотренный турбинный расходомер обладает высокими метрологическими характеристиками в области измерений, где $\left(\frac{nD^2}{v}\right) \geq 1000$, а также удобен в эксплуатации. Основным препятствием к их широкому использованию в дегазационных сетях является то, что на каждый диаметр трубопровода нужна соответствующая конструкция расходомера. Именно так поступает ведущая германская фирма «Höntzsch», которая предлагает широкий ряд расходомеров-вставок в трубопроводы различных диаметров. В дегазационных сетях угледобывающих предприятий Украины применяются трубопроводы диаметрами от 100 мм до 500 мм. При этом трубопроводы меньших диаметров используются для отвода метановоздушной смеси от скважин, больших диаметров – в магистральных трубопроводах и сборных коллекторах. Совершенно очевидно, что для полного оснащения дегазационных систем потребовалось бы не менее десяти типоразмеров расходомеров, что нельзя считать разумным решением вопроса.

Практика эксплуатации дегазационных систем показывает, что непрерывные измерения дебита метана как в отводах от скважин, так и в магистральных

трубопроводах в связи с длительностью и относительной временной стабильностью процесса дегазации являются излишними, а их информация – избыточна. Кроме того, на стационарно установленный расходомер постоянно воздействует поток метановоздушной смеси, приводя его к быстрому износу и потере нормированной точности измерений. Поэтому, с учетом вышеизложенного, следует считать, что разработка и использование турбинных расходомеров в дегазационных системах Украины как экономически, так и технически нецелесообразны, несмотря на их высокие метрологические и эксплуатационные характеристики.

Для эпизодических измерений дебита метановоздушной смеси в дегазационных трубопроводах диаметром от 100 до 500 мм наиболее подходит расходомер с крыльчатым преобразователем тахометрического типа. Принцип его работы ничем не отличается от принципа работы турбинного измерителя потока. Однако, в отличие от турбины, в данном случае крыльчатка не охватывает всё сечение потока и поэтому скорость её вращения пропорциональна скорости потока, а не объемному расходу. Рабочий диапазон тахометрического измерителя объемного расхода потока, построенного с использованием тахометрического преобразователя скорости потока, в относительном выражении шире, чем у турбинного расходомера, так как эффект вязкости (см. формулу (1)) для него менее важен, чем для турбины.

При измерениях тахометрическим преобразователем с крыльчаткой, диаметр которой много меньше диаметра дегазационного трубопровода, значение объемного расхода потока метановоздушной смеси в общем случае получают умножением измеренного значения скорости на площадь поперечного сечения трубопровода, в месте установки преобразователя. Следует учитывать, что при этом происходит блокировка поперечного сечения трубопровода миделевым сечением преобразователя, в результате чего скорость потока в месте установки преобразователя растёт, увеличивая погрешность измерений. Исследованиями, проведенными германской фирмой «Höntzsch» установлено, что при отношении диаметра цилиндрического зонда с крыльчатым тахометрическим преобразователем к диаметру трубопровода меньше 0,2, дополнительной погрешностью, вносимой эффектом блокировки поперечного сечения трубопровода, можно пренебречь в рамках нормированной допускаемой погрешностью преобразователя по скорости потока. Для своих преобразователей фирма «Höntzsch» нормирует значения пределов допускаемой приведенной погрешности на уровне $\pm 1,5\%$ [6].

При измерении в трубопроводе с внутренним диаметром D следует всегда учитывать, что оптимальная точность измерений обеспечивается только тогда, когда поток не закручен и измерительное поперечное сечение трубопровода выбрано таким образом, что создаётся прямой входной участок без препятствий длиной не менее $20D$ и прямой выходной участок без препятствий длиной не менее $10D$. Если обеспечение достаточно длинной трубопроводной линии не представляется возможным, то необходимо предусмотреть измерительное по-

перечное сечение в таком месте трубы, чтобы 2/3 прямой трубопроводной линии находилось перед, а 1/3 – за измерительным поперечным сечением [6].

Исходя из приведенного выше требования к допускаемой блокировке измерительным зондом поперечного сечения трубопровода, диаметр цилиндрического зонда для трубопровода диаметром 100 мм не должен быть больше $100 \times 0,2 = 20$ мм. Для проведения измерений в дегазационную трубу необходимо радиально вварить патрубок длиной 50 – 70 мм, в который при измерениях должен быть опущен измерительный зонд так, чтобы крыльчатка находилась в центре измерительного поперечного сечения, а её ось была ориентирована по оси трубы. Наиболее близкий диаметр стандартной трубы для изготовления патрубка указанного диаметра – 3/4", её внутренний диаметр составляет 19,06 мм. Исходя из этого, диаметр измерительного зонда следует принять равным 18 мм, что с запасом удовлетворяет всем поставленным выше требованиям.

Выше отмечено, крыльчатый тахометрический преобразователь с малой крыльчаткой является измерителем скорости потока, в нашем случае – скорости потока на его оси. Объёмный расход может быть получен как произведение средней скорости потока на площадь измерительного сечения. В общем случае измеренная скорость на оси потока не равна средней скорости потока, а превышает её тем больше, чем больше влияние сил вязкости в газовоздушной смеси. Известно, что состояние потока оценивают с помощью критерия подобия Рейнольдса $Re = \frac{VD}{\nu}$, где V – скорость потока, м/с; D – диаметр потока, м; ν – кинематическая вязкость вещества, образующего поток, м²/с. Силы вязкости имеют преобладающее значение при ламинарном течении ($Re < 2320$), при этом эпюра скоростей в поперечном сечении потока имеет сильно вытянутую, параболическую форму, а скорость в центре V существенно превышает среднюю скорость потока V_{cp} . Её величину можно выразить формулой

$$V_{cp} = Vf(Re). \quad (3)$$

Здесь $f(Re)$ – сложная функциональная зависимость, имеющая нелинейный характер. Её значение определяется газовым составом, температурой, давлением в потоке, диаметром трубопровода и т.д. Таким образом, измерения объёмного расхода в потоке, имеющем ламинарный характер или переходный к турбулентному (до $Re \leq 4500$) рассматриваемым способом практически невозможны из-за неопределённости функции $f(Re)$.

Рассмотрим указанные зависимости для трубопровода диаметром 100 мм при минимальном объёмном расходе 2 м³/мин. При этом средняя скорость потока метановоздушной смеси будет

$$V_{cp} = \frac{2 \cdot 4}{60 \cdot \pi \cdot 0,1^2} = 4,24 \frac{м}{с},$$

а значение числа Рейнольдса составит

$$Re = \frac{4,2 \cdot 0,1}{15 \cdot 10^{-6}} = 28000.$$

Отсюда видно, что даже при уменьшении объёмного расхода в 4 раза против оговоренного выше минимально допускаемого из условий целесообразности эксплуатации скважины характер потока в дегазационной трубе, соединённой с устьем скважины, остаётся турбулентным. Сравнивая полученные выводы с зависимостью, изображенной на рисунке 1 для турбинного расходомера, можно считать, что в рассмотренном случае датчик скорости находится в области, аналогичной участку характеристики $\left(\frac{nD^2}{v}\right) \geq 1000$, где $f(Re)$ мало зависит от скорости потока и его теплофизического состояния.

Если принять диапазон измерений тахометрического преобразователя 0,5 – 40,0 м/с, то наименьший дебит метана, который он может измерить в выходном коллекторе диаметром 500 мм составит

$$Q_{\min} = VS = 0,5 \frac{60\pi 0,5^2}{4} = 5,9 \frac{м^3}{мин};$$

при этом число Рейнольдса будет

$$Re = \frac{0,5 \cdot 0,5}{15 \cdot 10^{-6}} = 16670.$$

С другой стороны, при наибольшем дебите отдельной скважины, $Q = 10 \frac{м^3}{мин}$ [2], средняя скорость V в дегазационном трубопроводе диаметром 100 мм, соединяющем её устье с магистральным трубопроводом составит

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{10 \cdot 4}{60 \cdot \pi \cdot 0,1^2} = 21,25 \frac{м}{с},$$

а число Рейнольдса

$$Re = \frac{21,5 \cdot 0,1}{15 \cdot 10^{-6}} = 143300.$$

Действительное значение $f(Re)$ и пределы его изменений в рабочей области, определяющие дополнительную погрешность измерений объёмного расхода метановоздушной смеси в дегазационном трубопроводе, должны быть исследованы с использованием аппаратуры, имеющей уровень рабочего эталона.

Для реализации исследуемого способа измерений конструкция тахометрического зонда должна вносить минимальное аэродинамическое сопротивление в газовый поток. Опыт разработчиков и изготовителей анемометра АПР-2 показывают, что конструктивно можно изготавливать крыльчатку диаметром 12 мм, которая может быть установлена в цилиндрический зонд. Представленная на рисунке 2 принципиальная конструктивная схема тахометрического зонда может быть использована в практической работе для определения дебита метана в дегазационных системах угольных шахт. Исходя из допускаемой блокировки сечения дегазационного трубопровода, а также конструктивных особенностей патрубков замерных сечений трубопроводов, оптимальный наружный диаметр тахометрического зонда должен составлять 18 мм.

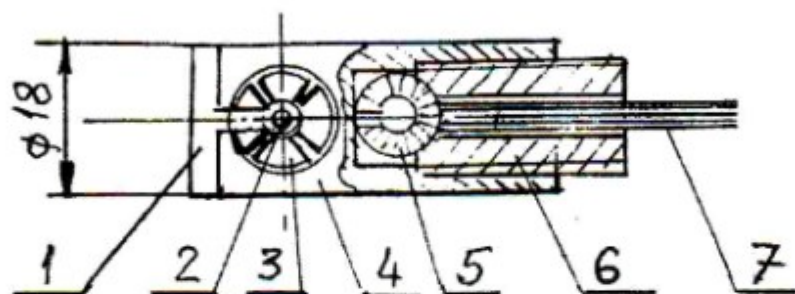


Рис. 2 – Принципиальная конструктивная схема тахометрического зонда

С уменьшением этого диаметра значительно возрастают технологические трудности при изготовлении крыльчатки, оси и опор вращения, а также снижается чувствительность преобразователя к набегающему потоку.

Рассмотренный тахометрический преобразователь может работать совместно с измерительным блоком анемометра рудничного АПР-2. При этом значения функции $f(Re)$, полученные в результате исследований работы преобразователя в граничных условиях измерений дебита метановоздушной смеси, должны быть занесены в память процессора и использоваться для автоматического вычисления объёмного расхода в каждом конкретном случае.

В цилиндрическом корпусе 4, изготовленном из неметаллического, нетокопроводящего материала, расточено отверстие диаметром 13 мм, в котором на траверсе 1 в подпятниках 2 установлена крыльчатка 3 диаметром 12 мм, изготовленная из алюминиевого сплава. Внутри корпуса расположена катушка индуктивности 5, намотанная на разрезном ферритовом сердечнике, электрическая добротность которой изменяется каждый раз при прохождении мимо её зазора лопасти крыльчатки. Катушка крепится внутри корпуса заглушкой 6, через отверстие в которой проходят выводы 7 катушки индуктивности 5, подключаемые ко входу измерительного блока серийного анемометра АПР-2. Малогабаритный цилиндрический датчик должен обладать высокой надёжностью, работоспособностью и стабильной долговечной метрологической характеристикой. При этом проблема его использования существенно упрощается тем, что он может быть совмещен с измерительным блоком анемометра АПР-2 выпускаемым серийно ИГТМ НАН Украины, который в настоящее время является ос-

новным средством контроля систем вентиляции в угольных шахтах не только Украины, но и всех стран СНГ.

Таким образом, повышению эффективности систем дегазации, которые извлекают метановоздушную смесь из угольных месторождений в шахтах и транспортируют ее на поверхность для утилизации, в ближайшее время будет уделяться большое значение. Для оценки эффективности работы этих систем возможно использование эпизодического способа контроля с помощью малогабаритного зонда, который не загромождает сечение и имеет небольшое аэродинамическое сопротивление. Способ интересен тем, что исключает постоянные потери депрессии, простой в эксплуатации и позволяет оперативно оценивать расход метановоздушной смеси в трубопроводах дегазационных систем. Этот способ измерений можно осуществить с помощью зонда, представляющим собой малогабаритный цилиндрический преобразователь с крыльчаткой диаметром 12 мм. С помощью такого зонда можно производить измерение скорости газового потока в трубопроводах диаметром от 100 мм до 500 мм и соответственно дебета от 0,5 до 10 м³/мин. При этом скорости потока, воздействующие на крыльчатку зонда, будут находиться в допустимых пределах измерений от 0,5 до 40,0 м/с, а качество потока в трубопроводах будет оставаться постоянным, что позволяет сделать вывод о перспективности измерений таким способом. Малогабаритный тахометрический преобразователь может работать в качестве взаимозаменяемого штатного тахометрического преобразователя, применяемого в серийном анемометре АПР-2, разработанного ИГТМ НАН Украины для измерений средней скорости воздуха в горных выработках шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яшенко И. А. Повышение уровня эффективности дегазации на угольных предприятиях Украины. Реализация программы утилизации газа-метана / И.А. Яшенко // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов // ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып.97. – С.17-31.
2. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – М.: Недра, 1984. – 248 с.
3. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин / А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левишина. – Л.: «Энергия», 1976. – 576 с.
4. Doebelin E.O. Measurement systems: Application and design. / E.O. Doebelin. – New York: Mc Graw – Hill, 1983. – 3 rd. ed.
5. Мирошник Г.А. Измерительный зонд для контроля параметров газового потока в дегазационных скважинах / Г.А. Мирошник. – Днепропетровск, 1982. – №162. – 10 с.
6. Höntzson HMBH. Обзор программы: разработка, изготовление, сбыт / Höntzson HMBH. – ФРГ, 7050; Вайблинген, 1998.