

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,
Дудник М.Н., инженер
(ИГТМ НАН Украины)

ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШОГО ДЕБИТА МЕТАНА В ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИНАХ АНЕМОМЕТРОМ АПР-2

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. науч. співр.,
Дуднік М.М., інженер
(ИГТМ НАН України)

ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИКОГО ДЕБИТА МЕТАНУ В СВЕРДЛОВИНАХ ДЕГАЗАЦІЇ АНЕМОМЕТРОМ АПР-2

Bunko T.V., D.Sc (Tech.), Senior Researcher,
Dudnik M.N., M.S (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

MEASUREMENTS OF LARGE DEBIT OF METHANE IN DECONTAMINATION MINING HOLES BY THE APR-2 ANEMOMETER

Аннотация. В статье кратко охарактеризованы работы ИГТМ НАН Украины в области разработки средств измерений дебита метана из дегазационных скважин, и использования для этих целей анемометра АПР-2 в режиме турбинного расходомера.

Показано, что эта методика неприменима для измерения дебита каптированного из скважины метана в расширенном диапазоне, поскольку резкое увеличение скорости газового потока, воздействующего на крыльчатку, в сравнении со скоростью в газывыводной трубе, не только превышает верхний предел измерений анемометра, но и вызывает механические напряжения в крыльчатке и ее опорах, превышающие запас прочности. Поэтому первичный преобразователь должен в таком устройстве работать в режиме измерения скорости, т е быть размещен в свободном газовом потоке. Разработана методика такого размещения, измерения скорости потока и дополнительные технические средства, которые должны быть для этого использованы. Это позволит охватить средствами измерений все существующие дегазационные скважины, в том числе измерять большой дебит метана.

Ключевые слова: анемометр, дегазация, тахометрический преобразователь, воздушный поток, диффузор, сетка, выравнивание скорости потока.

Для предварительной оценки дебита пробуренных дегазационных скважин, а также оценки эффективности дегазационных мероприятий при гидродинамическом воздействии на угольный массив, когда газывыводные трубы от пробуренных скважин еще не соединены с дегазационной системой в [1] предложены устройства, позволяющие использовать анемометр АПР-2. Поскольку диаметр газывыводной трубы, вмонтируемой в устье дегазационной скважины, обычно составляет 100 мм, непосредственные измерения скорости выходящего газового потока невозможны вследствие того, что габаритные размеры первичного преобразователя анемометра соизмеримы с диаметром трубы.

Предложенные в [1] устройства позволяют исключить влияние первичного преобразователя анемометра на параметры выходящего из трубы газового потока и обеспечить качественные измерения его скорости. Их основная идея заключается в том, что первичный преобразователь переводится в режим турбинного расходомера. При этом весь контролируемый газовый поток должен полностью проходить через обечайку преобразователя, что достигается применением специальных устройств, размещенных между срезом газыводной трубы и обечайкой. Оба устройства имеют коэффициенты гидравлического сопротивления не превышающие 0,12 и оказывают малое влияние на параметры газового потока. Выходы устройств снабжены безотрывными диффузорами, которые обеспечивают восстановление давления газовой струи.

Устройства были изготовлены и использовались при проведении работ по дегазации на шахте им. А.Ф. Засядько в Донбассе, где обеспечивали надежные измерения дебита метана из газыводящих труб. Однако вскоре выяснилось, что верхний предел измерений скорости газового потока, который обеспечивают эти устройства, даже при использовании новой модификации анемометра АПР-2 с диапазоном измерений 0,2 – 40,0 м/с, слишком мал.

Действительно, при движении газового потока от внутреннего диаметра газыводящей трубы, равного 100 мм до внутреннего диаметра обечайки, который составляет 35 мм, коэффициент поджатия струи составляет $n = (100/35)^2 = 8,16$. Тогда при верхнем пределе измерений анемометра АПР-2 40 м/с максимальная скорость газового потока в трубе диаметром 100 мм может быть $V_{max} = 40/8,16 = 4,9$ м/с, а максимальный измеряемый дебит каптируемого метана

$$Q_{max} = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot 4,9 = 0,038 \cdot м^3 / с = 2,28 \cdot м^3 / мин.$$

Для устройства, с помощью которого можно было бы производить измерения дебита каптированного из скважины метана в расширенном диапазоне, использование первичного преобразователя анемометра АПР-2 в режиме турбинного расходомера по приведенной выше схеме невозможно. В этом случае резкое увеличение скорости газового потока, воздействующего на крыльчатку, в сравнении со скоростью в газыводной трубе, не только превышает верхний предел измерений анемометра, но и вызывает механические напряжения в крыльчатке и ее опорах, превышающие запас прочности.

Очевидно, что первичный преобразователь анемометра должен в таком устройстве работать в режиме измерения скорости, т. е. быть размещенным в свободном газовом потоке. Тогда объемный расход будет определяться как произведение измеренного значения скорости на поперечное сечение газового потока в плоскости установки преобразователя. Величина поперечного сечения потока должна быть достаточно большой, чтобы его загромождение миделивым сечением преобразователя не снижало точности измерений. При этих условиях отличие скорости в плоскости крыльчатки $V_{ист}$ от измеренного значения скорости $V_{изм}$ в сечении $F_{изм}$ преобразователем, имеющим плоскость миделевого сечения

F_{mid} , может быть учтено по выражению [Горлин, С.М., 1970]

$$V_{изм} == V_{ист}(1 + \varepsilon_M), \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_M = 2 \sqrt{\left(\frac{F_{mid}}{F_{изм}} \right)^3}$$

Оценим на основании (1) величину погрешности, возникающей при измерении скорости газового потока в газывыводной трубе диаметром 100 мм при установке в ней первичного преобразователя анемометра размерами миделевого сечения 41 x 59 мм. Для этого случая

$$\varepsilon_M = 2 \sqrt{\left(\frac{2,42 \cdot 10^{-3}}{7,85 \cdot 10^{-3}} \right)^3} = 0,34 \quad V_{изм} == V_{ист}(1 + 0,34) = 1,34 V_{ист} ,$$

т. е. действительное значение измеряемой скорости в трубе составляет $V_{ист} = V_{изм} / 1,34 = 0,75 V_{изм}$. Таким образом, ошибка измерений в этом случае составляет 25 %, что неприемлемо.

Кроме того, гидравлическое сопротивление измерительного преобразователя, установленного в газывыводной трубе диаметром 100 мм резко изменяет ее собственное гидравлическое сопротивление, основную долю в котором составляют потери на свободный выход газовой струи в свободное пространство. Это изменяет режим истечения газа из скважины и его дебит.

Оценим величину коэффициента гидравлического сопротивления первичного преобразователя, вносимого им в газовую струю. Сопротивление преобразователя, помещенного в газывыводную трубу, составляет значительную долю от общего сопротивления движению газового потока и зависит от степени затенения потока преобразователем и степени аэродинамического совершенства его формы.

В соответствии с [Горлин, С.М., Слезингер, И.И., 1964] коэффициент сопротивления может быть вычислен по выражению

$$\xi_{np} = C_{x np} \frac{S_{mid np}}{F_{mp}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{S_{mid np}}{F_{mp}} \right)^3},$$

где $C_{x np}$ – коэффициент лобового сопротивления преобразователя. В соответствии с диаграммой 10–9 [4] примем $C_{x np} = 1,6$; F_{mp} – миделевое сечение газывыводной трубы – круг диаметром 100 мм; $S_{mid np}$ – миделевое сечение преобразователя анемометра размерами 41 x 59 мм.

Тогда

$$\xi_{np} = 1,6 \frac{41 \cdot 59 \cdot 4}{\pi \cdot 100^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{41 \cdot 59 \cdot 4}{\pi \cdot 100^2}\right)^3} = 1,49$$

Коэффициент гидравлического сопротивления свободного выхода газовой струи из газовыводной трубы в окружающее пространство $\xi_{вых} = \frac{2\Delta h}{\rho V^2}$ равен единице. Тогда суммарный коэффициент гидравлического сопротивления газовыводного канала скважины при установке в его поперечном сечении первичного преобразователя анемометра будет

$$\xi_{скв} = \xi_{np} + \xi_{вых} = 1,49 + 1,0 = 2,49.$$

Таким образом, полное гидравлическое сопротивление скважины возрастает практически в два с половиной раза, что безусловно меняет режим истечения газа из нее и может сделать измерения недостоверными.

Измерение скорости газовой струи в свободном потоке вблизи выходного сечения газовой струи трубы также не может дать положительного эффекта, поскольку все приведенные выше рассуждения справедливы и для этого случая, за исключением того, что в соответствии с [Горлин, С.М., 1970] в выражении (1) знак суммы следует изменить на обратный, а абсолютная погрешность становится отрицательной, не изменяя величину.

Выходом из создавшейся ситуации может служить применение в качестве согласующего устройства безотрывного диффузора с коэффициентом расширения газовой струи около двух. Это позволяет сразу решить несколько задач:

- уменьшить коэффициент загрузки сечения газовой струи первичным преобразователем и, соответственно, снизить погрешность измерений;
- существенно расширить диапазон измерений;
- резко уменьшить коэффициент гидравлического сопротивления, вносимый в газовый поток скважины и тем самым снизить влияние измерительной приставки на дебит скважины.

Вычислим величину дополнительной погрешности, возникающей вследствие загрузки выходного сечения диффузора диаметром 200 мм первичным преобразователем анемометра АПР-2

$$\varepsilon_m = 2 \sqrt{\left(\frac{2,42 \cdot 10^{-3}}{31,42 \cdot 10^{-3}}\right)^3} = 0,043$$

$$V_{изм} = V_{ист}(1 + 0,043) = 1,043 V_{ист}$$

Тогда действительное значение скорости в выходном сечении диффузора, где установлен первичный преобразователь, будет $V_{ист} = V_{изм} / 1,043 = 0,96 V_{изм}$, т. е. в измерения за счет загрузки сечения диффузора преобразователем вносится ошибка с положительным знаком, составляющая не более 4 %. Величина

этой ошибки меньше мультипликативной составляющей пределов допускаемой погрешности анемометра АПР-2 и вполне приемлема.

При использовании модификации анемометра АПР-2 с верхним пределом диапазона измерений 40 м/с, такое устройство с диффузором, имеющим коэффициент расширения $n = 4$, позволит измерить скорость истечения газа в трубе

$$V_{min} = 0,2 \cdot 4 = 0,8 \text{ м/с};$$

$$V_{max} = 40,0 \cdot 4 = 160,0 \text{ м/с}.$$

Это соответствует измеряемым расходам

$$Q_{min} = 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 0,38 \text{ м}^3/\text{мин},$$

$$Q_{max} = 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 160,0 = 1,26 \text{ м}^3/\text{с} = 75,4 \text{ м}^3/\text{мин},$$

Чтобы определить параметры диффузора, вычислим значения чисел Рейнольдса при минимальной и максимальной скоростях истечения газовой струи через меньшее сечение

$$Re_{min} = \frac{v_{min} \cdot D_{min}}{\nu} = \frac{0,8 \cdot 0,1}{15 \cdot 10^{-6}} = 5,33 \cdot 10^3;$$

$$Re_{max} = \frac{v_{max} \cdot D_{max}}{\nu} = \frac{160 \cdot 0,1}{15 \cdot 10^{-6}} = 1,067 \cdot 10^6.$$

По диаграмме 11-3 [2] определим, что минимальным коэффициентом гидравлического сопротивления в полученном диапазоне значений чисел Re обладает безотрывной диффузор с углом раскрыва $\alpha = 10^0$, для которого $\zeta_{диф} = 0,326 - 0,293$ при свободном выходе потока в окружающее пространство. Длина такого диффузора составляет

$$L_{диф} = \frac{D_{max} - D_{min}}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = 617 \cdot \text{мм}$$

Вычислим суммарный коэффициент гидравлического сопротивления диффузора, у которого в плоскости сечения диаметром 200 мм установлен первичный преобразователь анемометра.

Коэффициент гидравлического сопротивления преобразователя

$$\xi_{np} = 1,6 \frac{41 \cdot 59 \cdot 4}{\pi \cdot 200^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{41 \cdot 59 \cdot 4}{\pi \cdot 200^2}\right)^3} = 0,156$$

Коэффициент гидравлического сопротивления трубчатой штанги преобразователя диаметром 13 мм, длина которой, размещенная в сечении диффузора, составляет 70 мм, а коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,76$ [2]

$$\xi_{um} = 0,76 \frac{13 \cdot 70 \cdot 4}{\pi \cdot 200^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{13 \cdot 70}{\pi \cdot 200^2}\right)^3} = 0,024$$

Тогда полное гидравлическое сопротивление рассматриваемого согласующего устройства, выполненного на основе безотрывного диффузора, будет

$$\xi_{\Sigma} = 0,326 + 0,156 + 0,024 = 0,506.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления при свободном истечении газового потока из газовой выводной трубы, как отмечено выше, равен единице. Присоединение рассмотренного измерительного устройства к газовой выводной трубе снижает его на 50 % за счет восстановления давления в потоке при его расширении с одновременным снижением скорости. Чтобы рассмотренное устройство не оказывало влияния на характер истечения газа из скважины, целесообразно довести значение его суммарного коэффициента гидравлического сопротивления до единицы, как у газовой выводной трубы. Это можно сделать различными способами. Однако в настоящем случае наиболее целесообразно и наиболее просто можно решить эту задачу, установив в диффузоре сетку, имеющую коэффициент сопротивления 0,5. Лучшее место для установки сетки – фланец, примыкающий к меньшему диаметру диффузора. В этом случае теньевые дорожки, возникающие за отдельными проволочками сетки вследствие возмущения ими потока, успеют раствориться в общем потоке до подхода к месту установки преобразователя.

Кроме того, сетка обладает очень важным свойством выравнивания скорости потока по его поперечному сечению. Оно основано на том физическом свойстве, что большая скорость за счет потерь на сопротивлении проволок, пропорциональных квадрату скорости, больше тормозится.

Подобрать сетку с нужным коэффициентом гидравлического сопротивления можно по формуле для $50 < Re < 2000$ [Горлин, С.М., 1970]

$$\xi_{np} = (1 - \bar{\varphi}) + \left(\frac{1 - \bar{\varphi}}{\bar{\varphi}}\right), \quad (2)$$

где

$$\bar{\varphi} = \frac{F_1 - F_3}{F_1} = \frac{F_2}{F_1},$$

При этом F_1 – общая площадь сетки; F_2 – площадь сетки в свету; F_3 – площадь сетки, затененная проволокой.

Легко видеть, что значению $\xi_{np} = 0,5$ в выражении (2) соответствует значение $\bar{\varphi} = 0,69$.

Из (2) следует, что

$$F_3 = F_1(1 - \bar{\varphi}) = 0,31F_1$$

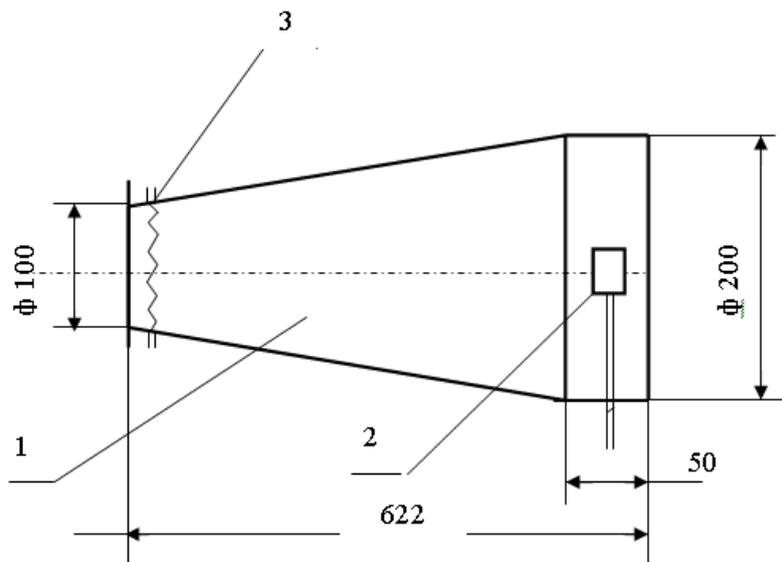
Типоразмер сетки из оцинкованной стальной проволоки, удовлетворяющей полученному соотношению F_3/F_1 можно подобрать по ГОСТ 5336-67. Диаметр

проволоки d_{np} из которой изготовлена сетка, следует выбрать порядка 0,2 мм. При этом число Рейнольдса на скорости потока 150 м/с будет

$$Re = \frac{Vd_{np}}{\nu} = \frac{150 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-6}} = 2000,$$

т. е. удовлетворяет условию применения выражения (2).

Конструктивная схема устройства приведена на рисунке 1.



1 – корпус устройства; 2 – преобразователь; 3 – сетка

Рисунок 1 – Конструктивная схема устройства

Для выравнивания профиля газового потока на выходе диффузора приварена цилиндрическая обечайка длиной 50 мм, в центре сечения которой установлен первичный преобразователь анемометра АПР-2. Обечайка преднамеренно сделана короткой, чтобы избежать вытягивания центра газового потока и снижения точности результатов измерений. Фланец с резиновой прокладкой, приваренный к малому диаметру диффузора позволяет стыковать его с газовыводной трубой.

Таким образом, в результате проведенных исследований и опытно-конструкторских работ были разработаны методика и устройство, позволяющие производить измерять большой дебит метана в дегазационных скважинах, что позволит охватить средствами измерений все существующие дегазационные скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунько, Т.В. Об измерении дебита в дегазационных скважинах анемометром апр-2 в режиме турбинного расходомера / Т.В. Бунько, М.Н. Дудник // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 122. – С. 132-140.

2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / И.Е. Идельчик. - М.: «Машиностроение», 1992. – 672 с.

REFERENCES

1. Bunko, T.M. and Dudnik, M.N. (2014), «About measuring of debit in decontamination mining holes by the anemometer of APR-2 in the mode of turbine debit-measure», *Geotechnical mechanics*, no. 122. – pp. 132-140.

2. Idelchik, I.Ye. (1992), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Reference book on hydraulic resistances], Mashinostroyeniye, Moscow, RU.

Об авторах

Бунько Татьяна Викторовна, доктор технических наук, 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

Дудник Михаил Николаевич, инженер в отделе горной термоаэродинамики и автоматизированных систем Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровськ, Украина, dudnik1953@gmail.com

About the authors

Bunko Tatjana Viktorovna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Reseacher, Senior Reseacher in Department of problems of underground mines in great depths, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, bunko2007@mail.ru

Dudnik Michail Nikolayevich, Master of Science in the Department of Rock Thermoatrodynamics and Automated Systems N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, dudnik1953@gmail.com

Анотація. В статті стисло охарактеризовані роботи ІГТМ НАН України в області розробки засобів вимірювань дебіта метану з свердловин дегазації, і використання для цих цілей анемометра АПР-2 в режимі турбінного витратоміра. Показано, що ця методика непридатна для вимірювання дебіта каптованого з свердловини метану в розширеному діапазоні, оскільки різке збільшення швидкості газового потоку, що впливає на крильчатку, порівняно з швидкістю в газовивідній трубі, не тільки перевищує верхню межу вимірювань анемометра, але і викликає механічні напруги у крильчатці і її опорах, які перевищують запас міцності. Тому первинний перетворювач повинен в такому пристрої працювати в режимі вимірювання швидкості, тобто бути розміщений у вільному газовому потоці. Розроблена методика такого розміщення, вимірювання швидкості потоку і додаткові технічні засоби, які повинні бути для цього використані. Це дозволить охопити засобами вимірювань всі існуючі свердловини дегазації, зокрема вимірювати великий дебіт метану.

Ключові слова: анемометр, дегазація, тахометричний перетворювач, повітряний потік, дифузор, сітка, вирівнювання швидкості потоку.

Abstract. Works of YGTM NAS of Ukraine in area of development of facilities measurements of debit of methane from decontamination mining holes, and use for these aims of the APR-2 anemometer in the mode of turbine consume-measure are briefly described in the article. It is shown that this method is inapplicable for measuring of debit of methane outgoing from a mining hole in the extended range, as sharp increase of speed of gas stream influencing on impeller, by comparison to speed in a gas-withdrawal pipe, not only exceeds the top limit of measurements of anemometer but also causes mechanical tensions in impeller and its supports, exceeding the margin of safety. Therefore a primary transformer must in such device work in the mode of measuring of speed, т e to be is placed in a free gas stream. The method of such placing, measurements of speed of stream and additional hardwares which must be for this purpose used is developed. It will allow to overcome all existent decontamination mining holes by facilities of measurements, including measure the large debit of methane.

Keywords: anemometer, degassing, takhometrycal transformer, current of air, dyffuzor, net, smoothing of speed of stream.

Статья поступила в редакцию 21.10. 2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук А.П. Круковским