

В.И. Голинько, А.К. Котляров

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ СКОРОСТИ В СИСТЕМАХ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ

Наведено результати досліджень, спрямованих на підвищення ефективності систем вибухозахисту шляхом використання в них малоінерційних датчиків швидкості. Обґрунтовано параметри датчиків, що дозволяють на ранній стадії виявити розвиток аварійних ситуацій.

Приведены результаты исследований, направленных на повышение эффективности систем взрывозащиты путем использования в них малоинерционных датчиков скорости. Обоснованы параметры датчиков, позволяющие на ранней стадии обнаружить развитие аварийных ситуаций.

The results of researches, directed on the increase efficiency the systems protecting from explosions at the use little inertia sensors speed are resulted. The parameters of sensors which allow on the early stage to find out development of emergency situations are grounded.

Одной из наиболее актуальных проблем для угольной промышленности является борьба со взрывами метана и угольной пыли. Среди мероприятий, направленных на профилактику взрывов, важная роль отводится контролю взрывоопасности горных выработок угольных шахт. Особенно важно своевременно обнаружить и принять меры по предупреждению взрывов на шахтах, опасных по газодинамическим явлениям, в том числе таким, как внезапные выбросы. При внезапных выбросах содержание метана в месте выброса за относительно короткий промежуток времени может достигать 100%. Скорость нарастания содержания метана в выработке при этом иногда достигает 5%/с [1].

В существующих системах взрывозащиты в основном используются стационарные анализаторы метана, основанные на термокаталитическом методе измерения [2, 3]. В условиях шахт, разрабатывающих пласты опасные по внезапным газодинамическим явлениям, анализаторы метана, предназначенные для использования в качестве средств газового контроля и отключения электроэнергии согласно [4] должны обеспечивать время срабатывания защиты по объемной доле метана не более 0,8 секунд. Кроме того, для таких анализаторов дополнительно вводится требование ко времени срабатывания по скорости нарастания объемной доли метана, которое при скорости 0,5%/с не должно превышать 2 с [4].

С учетом требований [4] на основе термокаталитического метода была разработана аппаратура для быстродействующей защиты АТБ [5]. Однако из-за низкой помехоустойчивости и частых ложных срабатываний при отсутствии газодинамических явлений, применение такой аппаратуры приводило к необоснованным простоям и существенным экономическим потерям, что ограничило возможность ее применения. В настоящее время вопрос обеспечения требуемого быстродействия средств защиты в полной мере не решен.

Целью настоящей публикации является поиск решений, направленных на повышение эффективно-

сти систем взрывозащиты, путем использования в них малоинерционных датчиков скорости.

Все существующие системы взрывозащиты в основном ориентированы на использование информации о содержании метана или других взрывчатых газов, поступающей от аппаратуры газового контроля. Другие информационные признаки, свойственные опасным газодинамическим явлениям и процессам развития аварийных ситуаций, вызванных недостатками или нарушениями в системе проветривания шахт, в настоящее время практически не используются. В то же время существует ряд информационных признаков, которые позволяют выявить опасность загазирования горных выработок вследствие газодинамических явлений и нарушений проветривания горных выработок. К таким признакам можно отнести изменения скорости и направления воздушных потоков, изменения давления, изменения уровня звукового давления, спектральных характеристик шума и др.

Из указанных признаков в первую очередь рассмотрим возможность использования группы признаков, характеризующих изменения параметров воздушных потоков. В настоящее время для контроля скорости и направления движения воздуха на угольных шахтах применяются стационарные измерители ИСНВ.1, а кроме того, для контроля и управления проветриванием в тупиковых выработках применяется аппаратура контроля работы вентиляторов местного проветривания АПТВ. В указанной аппаратуре контроль скорости движения воздуха осуществляется тахометрическими датчиками, которые являются относительно инерционными, а при значительной скорости воздуха способны разгужаться.

Учитывая то, что при газодинамических явлениях процесс загазирования может протекать весьма быстро, при использовании группы признаков, характеризующих изменения параметров воздушных потоков, следует ориентироваться на применение малоинерционных датчиков скорости.

Среди известных методов измерения скорости воздуха, с использованием которых возможна разработка малоинерционных датчиков, наиболее предпочтительным является ультразвуковой метод. Характерной особенностью данного метода является то, что он позволяет контролировать скорость воздуха не только в фиксированной точке горной выработки, а и получить интегральную оценку – среднюю скорость или расход воздуха в выработке. Учитывая это, на основе данного метода еще в 80-х годах прошлого столетия интенсивно велись работы по созданию акустических анемометров для интегральной оценки параметров воздушных потоков [6, 7]. Однако ввиду сложностей, возникающих при установке и наладке таких анемометров, а также возможных сбоев в их работе при нахождении между приемником и источником излучения рабочих, горных машин и др. посторонних предметов, такие анемометры не получили распространения. Поэтому более целесообразно использование малоинерционных ультразвуковых датчиков, осуществляющих контроль скорости движения воздуха в фиксированной точке горной выработки.

В типовых схемах размещения аппаратуры газового контроля на участке подготовительных работ шахт, опасных по внезапным выбросам, как правило, используются четыре датчика метана, один из которых устанавливается у забоя, второй – около подстанции, третий – на исходящей вентиляционной струе, а четвертый – у вентилятора местного проветривания.

При выбросе газа в тупиковой выработке, вся она полностью или частично будет загазирована до стопроцентной концентрации. Начальное её распределение обычно представляют в виде [1]

$$C(x, 0) = \begin{cases} 100\%, & \text{если } 0 \leq x \leq l_0 \\ C_0, & \text{если } l_0 < x \leq l, \end{cases}$$

где $C(x, 0)$ – объемная доля метана в первый момент после выброса газа, %; x – расстояние, отсчитываемое от груди забоя, м; C_0 – объемная доля метана в подготовительной выработке до выброса, %; l_0 – длина загазированной части тупиковой выработки.

Как правило, внезапные выбросы сопровождаются выносом значительного количества угля и газа в выработку. Скорость газа и летящего угля при выбросах может превышать 20 м/с, что может привести к повреждению электрооборудования, кабельной сети и датчика установленного вблизи забоя. Высокая скорость нарастания концентрации метана в месте установки этого датчика, а также указанные повреждения могут привести к отказу или несвоевременному срабатыванию средств взрывозащиты.

Распределение концентрации метана в тупиковой выработке после выброса газа в различные промежутки времени зависит от параметров выработки и режима проветривания выработки.

Выполненное в работе [1] моделирование загазирования проветриваемой тупиковой выработки показывает, что при своевременном срабатывании защи-

ты и отключении вентилятора местного проветривания (ВМП) взрывоопасная концентрация метана на исходящей из тупиковой выработки вентиляционной струе наблюдается по истечении длительного промежутка времени. Кривая, характеризующая изменение концентрации метана по длине выработки в этом случае имеет малую крутизну, что создает условия для безопасного проведения работ по разгазированию тупиковой выработки.

При несрабатывании защиты и работающем ВМП взрывоопасная концентрация метана на исходящей появляется значительно раньше, а кривая характеризующая изменение концентрации метана по длине выработки в этом случае имеет на порядок большую крутизну, что усложняет процесс разгазирования, и создает опасную ситуацию в месте сопряжения выработок.

Характер протекания процесса загазирования в очистных выработках зависит от параметров выработок, места выброса и метановыделения при выбросе. Известны случаи, когда метановыделение при выбросах было настолько интенсивным, что приводило к опрокидыванию вентиляционной струи [8]. Моделирование процесса загазирования, выполненное авторами работы [9], показывает, что при опрокидывании вентиляционной струи до стопроцентной концентрации метана может быть загазирована лава, часть вентиляционной и конвейерной выработок и даже квершлаг, ходок и ствол вплоть до поверхности. В течение короткого промежутка времени взрывоопасная концентрация метана наблюдается в значительной части вентиляционной выработки, кривые характеризующие изменение концентрации метана по длине выработки имеют большую крутизну, что повышает опасность взрыва. Эта опасность существенно возрастает при отказе датчика метана, установленного на исходящей из очистной выработки, вследствие высокой скорости нарастания концентрации метана в месте установки, а также повреждение датчика и кабельной сети продуктами выброса.

Выполненный анализ показывает, что при значительных объемах выбросов использование в системах взрывозащиты только информации о содержании метана, поступающей от аппаратуры газового контроля, недостаточно. Поэтому для повышения надежности работы систем взрывозащиты в этих случаях целесообразно использовать и другие информационные признаки. Среди таких признаков в первую очередь рассмотрим признаки, которые можно получить при использовании малоинерционных датчиков скорости – изменение скорости и изменение направления воздушных потоков.

При исследованиях газодинамических явлений, связанных с внезапным выделением метана [1], принято выделять следующие их типы:

- внезапные выбросы угля, породы и газа;
- выбросы угля, породы и газа при дистанционном управлении горными машинами;
- выбросы угля, породы и газа, специально вызванные взрывными работами в режиме сотрясательного взрывания.

Анализ газодинамических явлений [1], показывает, что выбросы при дистанционном управлении горными машинами и при сотрясательном взрывании составляют более 90% от всех выбросов. Объемы выброшенного газа в этом случае составляют от нескольких десятков до нескольких тысяч кубических метров. Внезапные выбросы возникают существенно реже, однако объемы выброшенного газа в этом случае существенно больше и находятся в пределах от 2 тыс. м³ до 1,5 млн м³.

Выбросы при дистанционном управлении горными машинами и сотрясательном взрывании, как правило, являются прогнозируемыми явлениями. При газовыделении, составляющем десятки и сотни кубических метров, они обычно не приводят к взрывам и травмированию рабочих. Однако при значительном непрогнозируемом газовыделении эти выбросы часто приводят к катастрофическим последствиям, о чем свидетельствует статистика смертельного травматизма, вызванного этими выбросами [1]. С другой стороны, именно при значительных объемах газовыделения наблюдаются случаи несрабатывания средств АГК и взрывы метана [1].

Материалы расследования аварий, связанных с внезапными выбросами [10], показывают, что одним из поражающих факторов, который приводит к травмированию рабочих на значительном удалении от места выброса, является воздушная волна. Причем, при больших выбросах динамическое воздействие воздушной волны несколько значительное, что способно разрушать выработки и находящееся в них оборудование, а воздушная волна, проявляющаяся в виде внезапного кратковременного изменения скорости воздушного потока, наблюдается не только в выработках, расположенных вблизи места выброса, но и в магистральных выработках, стволе вплоть до поверхности. При всасывающем способе проветривания в данном случае в выработках с исходящей струей выброс приводит к внезапному кратковременному увеличению скорости. В выработках со свежей струей скорость воздушного потока кратковременно снижается, а часто выделившийся метан приводит к опрокидыванию свежих струй вплоть до поверхности.

Учитывая вышеизложенное, информационными признаками выброса может служить резкое увеличение скорости воздушных потоков в выработке с исходящей вентиляционной струей, а также резкое снижение скорости или реверсирование потока воздуха в выработках со свежей струей.

Для эффективного использования выбранных признаков в системах взрывозащиты необходимо обосновать наиболее целесообразное место установки малоинерционного датчика скорости и порог срабатывания защиты по величине изменения скорости вентиляционных потоков.

Место установки датчика скорости в тупиковых выработках следует выбирать так, чтобы с одной стороны исключить его повреждение продуктами выброса, а с другой – обеспечивать как можно более раннее срабатывание защиты при возникновении вы-

броса. Следует учитывать также то, что кроме использования в системе взрывозащиты данный датчик должен обеспечить выполнение основной своей функции – контроль скорости вентиляционного потока в подготовительной выработке.

С позиции обеспечения быстродействия защиты датчик скорости необходимо максимально приближать к груди забоя. Однако в данном случае возможно его повреждение продуктами выброса, а кроме того при таком расположении датчика, ввиду наличия оборудования, загромождающего сечение выработки, несформированности и нестационарности потока, невозможно получение достоверной информации о параметрах проветривания подготовительной выработки. Согласно [11] датчик расхода воздуха должен устанавливаться на прямолинейных незагроможденных участках с крепью, плотно прилегающей к стенкам выработки. Кроме того, для получения достоверных данных при замере скорости датчики следует устанавливать на расстоянии от местных сопротивлений, в 12-15 раз превышающем приведенный диаметр выработки, а прямолинейный незагроможденный участок выработки за датчиком должен в 3 раза превышать указанный параметр.

С учетом изложенного, расстояние от груди забоя до места установки датчика в тупиковых выработках следует выбирать не менее 40-50 м. При таком расстоянии исключается его повреждение в начальной стадии выброса кусками угля и породы, а время срабатывания защиты при скорости воздушной волны в призабойном пространстве, достигающей 300 м/с, с учетом возможной инерционности измерителя скорости, не превысит 0,5 с.

На выемочном участке место установки следует выбирать так, чтобы исключить его повреждение продуктами выброса, обеспечить высокое быстродействие защиты и получение достоверной информации о скорости вентиляционных потоков. Учитывая относительно большую протяженность очистных выработок для обеспечения высокого быстродействия, целесообразно устанавливать два датчика скорости: первый – в вентиляционном штреке на расстоянии до 30-40 м от места сопряжения с лавой, а второй – в конвейерном штреке на расстоянии до 10 м от места сопряжения штрека с лавой. Необходимость установки датчика в конвейерном штреке обусловлена тем, что при выбросе породы и угля в больших объемах резко уменьшается сечение лавы и увеличивается ее аэродинамическое сопротивление. Мгновенно выделившийся метан может в этом случае привести не к появлению воздушной волны в вентиляционной выработке, а к опрокидыванию свежих струй и загазированию конвейерной выработки.

При выборе порога срабатывания защиты по величине изменения скорости (ускорения) вентиляционных потоков необходимо исходить из того, что для повышения чувствительности защиты и уменьшения выдержки времени порог срабатывания защиты по величине ускорения потока необходимо выбирать по возможности меньшим. С другой стороны,

этот порог должен быть таким, чтобы не происходило ложное срабатывание защиты вследствие возмущения воздушных потоков работающими машинами и оборудованием, возмущений, вызванных изменением положения вентиляционных сооружений (вентиляционных дверей, шлюзов и др.) и вследствие наличия турбулентных пульсаций в воздушном потоке.

При описании развитого турбулентного движения воздуха, которое является характерным для горных выработок, скорости потока в данной точке пространства представляют как [12]

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \omega = \bar{\omega} + \omega',$$

где u, v, ω – мгновенные скорости в данной точке, м/с; $\bar{u}, \bar{v}, \bar{\omega}$ – осредненные во времени скорости, м/с; u', v', ω' – отклонение действительных скоростей от осредненных (пульсационная скорость), м/с.

Обобщающей величиной, характеризующей такие потоки, является степень турбулентности, которая определяется как

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2)} / 3,$$

где $\varepsilon_x = \sqrt{\bar{u}'^2} / \bar{u}$, $\varepsilon_y = \sqrt{\bar{v}'^2} / \bar{v}$, $\varepsilon_z = \sqrt{\bar{\omega}'^2} / \bar{\omega}$ – интенсивности турбулентности по направлениям.

Степень турбулентности в атмосфере и гладких трубах обычно составляет $\varepsilon = 0,01-0,02$ [13], а в сильно шероховатых трубах может достигать до 0,1.

Величина ускорения потоков при турбулентном движении воздуха в свою очередь зависит от величины пульсационной скорости и частотных характеристик пульсаций. Упрощенно, при исследованиях турбулентных потоков [13] считают, что пульсационная скорость изменяется по гармоническому закону и определяется в этом случае как

$$u' = u'_a \cos 2\pi ft, \tag{1}$$

где u'_a – амплитуда пульсационной скорости, м/с; f – частота колебаний, с⁻¹.

При обтекании воздушным потоком различных тел частота колебаний зависит от скорости потока, его вязкости и геометрических размеров тел [12], например, затыжек, корпусов измерительных приборов и др. При обтекании тела цилиндрической формы с диаметром d эта связь выражается через число Струхала

$$Sh = fd / u.$$

Учитывая то, что при больших числах Рейнольдса число Струхала стремится к $Sh = 0,2$ [12], частота колебаний при обтекании такого тела составит

$$f = 0,2u / d. \tag{2}$$

При величине пульсационной скорости равной $0,1u$ ее амплитуда составит $0,144u$. В таком случае, исходя из (1) и (2), ускорение потока будет равно

$$a = \frac{du'}{dt} = 0,0576 \frac{\pi u^2}{d} \sin \frac{0,4\pi ut}{d}. \tag{3}$$

С использованием (3) можно рассчитать амплитудное значение величины ускорения потока, вызванного турбулентными пульсациями при $d = 0,2$ м в случае установки датчика скорости в выработках. Так, при скоростях потока $u = 0,25$ м/с и $u = 4$ м/с, которые характерны для тупиковых и подготовительных выработок, ускорения соответственно составят 0,06 и 14,5 м/с² при частоте колебаний 0,25 с⁻¹ и 4 с⁻¹.

Из изложенного видно, что при расположении малоинерционного датчика в тупиковой выработке в качестве диагностического признака внезапного выброса может быть принято ускорение потока, однако при большой скорости потоков амплитудное значение ускорения, вызванного турбулентными пульсациями, достигает десятков м/с², что сопоставимо с ускорением потока при внезапном выбросе. В то же время направление и величина ускорения, вызванного турбулентными пульсациями, непостоянные во времени. Поэтому при осреднении этого ускорения за промежуток времени, сопоставимый с периодом колебаний, его среднее значение стремится к нулю. Поэтому для исключения ложных срабатываний в качестве диагностического признака газодинамических явлений следует выбрать изменение скорости потока за заданный промежуток времени Δt (среднее значение величины ускорения за время Δt).

Учитывая требования к быстрдействию средств защитного отключения, среднее значение величины ускорения и время усреднения целесообразно выбрать равными: $\Delta t = 0,5$ с, $\bar{a} = 10$ м/с², при этом приращение скорости за 0,5 с составит $\Delta u = 5$ м/с.

В таком случае, исходя из выражения (3), среднее значение величины ускорения вызванного турбулентными пульсациями составит

$$\bar{a} = 0,0576 \frac{\pi u^2}{d} \int_0^{0,5} \sin \frac{0,4\pi ut}{d} dt,$$

а изменение скорости в результате турбулентных пульсаций за выбранный промежуток времени по величине не превышает амплитудного значения пульсационной скорости и составляет $\Delta u \leq 0,144u$. При регламентированной [11] максимальной скорости движения воздуха в подготовительных выработках $u = 6$ м/с, изменение скорости потока, вызванное турбулентными пульсациями, не превысит $\Delta u = 0,9$ м/с, что существенно ниже выбранного порога срабатывания защиты по изменению скорости потока за выбранный промежуток времени.

Учитывая то, что в зависимости от места установки малоинерционного датчика изменение скорости потока, вызванное турбулентными пульсациями, может значительно отличаться, для повышения надежности защиты целесообразно корректировать порог срабатывания в зависимости от условий эксплуатации. Наиболее целесообразным при этом является

выбор порога срабатывания защиты в зависимости от величины пульсационной скорости в месте установки датчика. С этой целью кроме традиционных для измерителей скорости измеряемых параметров (скорости и направления потока) целесообразно осуществлять контроль такого параметра как величина пульсационной скорости или степень турбулентности потока. В таком случае уставку срабатывания защиты по приращению скорости потока за выбранный интервал времени $\Delta t = 0,5$ с, целесообразно выбирать исходя из результатов измерения пульсационной скорости с коэффициентом запаса не менее пяти.

Как показывает анализ обстоятельств взрывов [10], одна из причин этих явлений – местные скопления метана. Слоевые скопления метана у кровли выработок при обычном газовыделении часто образуются в подготовительных выработках, проводимых по газоносным угольным пластам. В участковых вентиляционных выработках, поддерживаемых в выработанных пространствах, слоевые скопления образуются, начиная с 10-20 м от очистного забоя. При газодинамических явлениях, сопровождающихся небольшими газовыделением но выбросом значительного количества горной массы, воздушная волна может не возникать. В этих случаях в результате сокращения расхода воздуха на выемочном участке, вызванного перекрытием части поперечного сечения выработки выброшенной массой, на выемочном участке возникнет длительный переходной газодинамический процесс, который может протекать на протяжении нескольких часов и даже суток [9]. При этом уменьшение расхода воздуха также приводит к образованию взрывоопасных слоевых скоплений метана в вентиляционной выработке, начиная от окна лавы.

Как сама возможность образования скопления, так и длина слоевого скопления метана с взрывоопасной концентрацией зависят от степени турбулентности воздушного потока [14]. Поэтому получение от малоинерционных датчиков скорости дополнительной информации о величине пульсационных скоростей или степени турбулентности потока позволит дополнительно осуществлять прогноз опасности возникновения таких ситуаций и своевременно проводить работы по их предупреждению.

Подводя итоги выполненных исследований, можно сделать следующие **выводы**.

При значительных объемах выбросов использование в системах взрывозащиты только информации о содержании метана, поступающей от аппаратуры газового контроля, недостаточно. Для повышения надежности работы систем взрывозащиты в этих случаях целесообразно использовать признаки, которые можно получить с помощью малоинерционных датчиков скорости – изменение скорости за выбранный промежуток времени (ускорение потока) и изменение направления воздушных потоков.

Выбор порога срабатывания защиты по изменению скорости целесообразно осуществлять исходя из величины пульсационной скорости в месте установки датчика или степени турбулентности потока.

Учитывая это с целью использования в системах взрывозащиты, малоинерционные измерители скорости кроме традиционного контроля скорости и направления потока должны осуществлять измерение изменения скорости за выбранный промежуток времени и степени турбулентности потока.

Список литературы

1. Брюханов А.М. Закономерности формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах породы, угля и газа в тупиковых выработках шахт / Брюханов А.М. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. ЛДУБЖД. – Львів, 2007. – № 10. – С. 121-125.
2. Карпов Е.Ф., Биренберг И.Э., Басовский Б.И. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
3. Голинько В.И., Котляров А.К., Белоножко В.В. Контроль взрывоопасности горных выработок шахт. – Д.: Наука и образование, 2004. – 207 с.
4. ГОСТ-24032-80. Приборы шахтные газоаналитические. Общие технические требования, методы испытания. – М.: Госстандарт, 1980. – 34 с.
5. Айруни А. Т., Гусев М. Г., Медведев В. Н. Аппаратура для регистрации быстропротекающих процессов изменения концентрации метана // Безопасность труда в промышленности. – 1984. – № 7. – С. 35-37.
6. Романов В.К. Акустическая анемометрия шахтных вентиляционных потоков // Вопросы совершенствования разработки и обогащения твердых полезных ископаемых при комплексном освоении недр. – М.: ИПКОН, 1979. – С. 141-142.
7. Шкундин С.З. К теории акустического анемометра для горных выработок // Научные сообщения института горного дела им. А.А. Скочинского. – 1980. – № 187. – С. 40-45.
8. Брюханов А.М. Научно-технические основы исследования и предотвращения аварий на угольных шахтах. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – 347 с.
9. Брюханов А.М. Математическое моделирование закономерностей формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах угля и газа в очистных выработках // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Д., 2007. – Вып. 69. – С. 121-128.
10. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, В.П. Колосюк и др. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Ч. I. – 548 с.
11. НПАОП 10.0-1.01-05 Правила безпеки у вугільних шахтах. – К.: Відлуння, 2005. – 398 с.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа – М.: Наука, 1970. – 904 с.
13. Краснов Н.Ф. Аэродинамика – М.: Высшая школа, 1980. – 495 с.
14. Бобров А.И. Борьба с местными скоплениями метана в угольных шахтах. – М.: Недра, 1988. – 148 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.Є. Колесником 21.12.09