

м.н.с. М.Н. Дудник, м.н.с. А.И. Вишницкий,
м.н.с. В.Н. Веретенник (ИГТМ НАН Украины)

ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Розглянуто вимоги до сучасного переносного рудничного анемометра та способи розширення його діапазону вимірювань, викладено підходи до розробки широкодіапазонного малогабаритного тахометричного перетворювача, а також запропоновано ідею вимірювань за його допомогою швидкостей повітряного потоку, менших порогу чутливості.

PROBLEMS OF PERFECTION OF MEANS OF THE CONTROL SPEEDS OF MOVEMENT OF AIR IN MOUNTAIN MANUFACTURES

The requirements to modern portable miner anemometer and ways of expansion of its range of measurements are considered, the approaches to development small-sized rotating vane of the converter are stated, and also the idea of measurements with its help of speeds of an air flow, smaller threshold of sensitivity is offered.

С увеличением глубины горных работ и интенсификацией нагрузки на забои газообильность угольных шахт постоянно растет. Основным средством проветривания опасных скоплений метана и поддержания его концентрации на допустимом уровне является вентиляция. Поэтому требования к средствам контроля ее эффективности, в частности к приборам для измерений скорости движения воздуха в горных выработках и вентиляционных каналах, также непрерывно повышаются.

Мировая приборостроительная промышленность, в основном Германии, США, Великобритании производит широкий спектр приборов для контроля скорости воздушного потока – анемометров, номенклатура которых постоянно обновляется, а технические показатели растут. Это приборы различных принципов действия, назначения, классов точности и ценовых категорий. И все же, даже среди лучших образцов, широко разрекламированных ведущими фирмами мира, невозможно выделить прибор, удовлетворяющий требованиям к современному отечественному переносному рудничному анемометру.

Анемометр, предназначенный для проведения измерений в горных выработках и вентиляционных каналах шахт, должен быть рассчитан на особо тяжелые условия эксплуатации в атмосфере с влажностью до 100 % (с выпадением осадков), содержанием угольной и породной пыли до одного грамма на кубометр воздуха, ненормированным содержанием агрессивных примесей. Он должен быть надежным, предельно простым в обращении, всегда готовым к проведению измерений и хорошо защищенным от случайных механических повреждений и воздействия окружающей среды.

«Правила безопасности в угольных шахтах» предусматривают измерения скорости движения воздуха в горных выработках начиная с 0,15 м/с. Однако в современной рудничной аэрологии все острее возникает необходимость в измерениях еще меньших скоростей, в ряде случаев – с 0,05 м/с (тупиковые выработки, застойные зоны, утечки и т. д.). При этом анемометр должен определять

и направление воздушного потока, поскольку такие скорости движения воздуха человеком не ощущаются. Верхнее значение диапазона измерений должно составлять 40 – 50 м/с, что необходимо для проведения измерений в каналах вентиляторов.

Из представленного на мировом рынке многообразия средств измерений скорости воздушного потока столь широким диапазоном измерений обладают только приборы термоанемометрического типа. Однако, неоднократные попытки создания термоанемометра, предназначенного для контроля рудничной вентиляции (работы ИГД им. А. А. Скочинского, ВостНИИ и др.), оказались безуспешными вследствие очень сильной зависимости его показаний от изменений параметров воздушной среды, ее газового состава, запыленности и агрессивных примесей. Этому недостатка лишены анемометры тахометрического типа, что определило их исключительное использование в отечественной и зарубежной практике рудничных аэромеханических измерений.

В настоящее время в странах СНГ, в том числе в Украине, основным сертифицированным средством контроля вентиляционных систем шахт является переносной рудничный анемометр АПР-2, разработанный и выпускаемый ИГТМ им. Н. С. Полякова НАН Украины. Конструкция и ряд основных технических показателей АПР-2 вполне удовлетворяют приведенным выше требованиям к современному шахтному прибору, что подтверждено его длительной эксплуатацией в шахтах различных регионов СНГ. Прибор имеет прочную конструкцию, хорошо защищающую его от пыли и длительного воздействия дождя в рабочем состоянии. Крыльчатка тахометрического преобразователя, укрепленного на выдвигной штанге, имеет диаметр 35 мм и надежно защищена ударопрочным пластмассовым корпусом с металлической обечайкой от случайных механических воздействий. Такая конструкция устранила один из основных недостатков тахометрических приборов – громоздкость и уязвимость первичного преобразователя, что в полной мере проявлялось, например, в процессе эксплуатации анемометра АСО-3 с крыльчаткой диаметром 100 мм. Анемометр выполнен на современной микропроцессорной основе и обеспечивает одиночные и многократные измерения скорости воздушного потока за произвольный интервал времени с выдачей среднего значения или средневзвешенного значения результатов измерений на цифровой индикатор.

Использование анемометра АПР-2 позволило значительно, по сравнению с приборами АСО-3 и МС-13, повысить культуру, надежность и производительность рудничных аэромеханических измерений. Однако, его диапазон измерений от 0,2 до 20,0 м/с уже не удовлетворяет требованиям к современному рудничному анемометру. Поэтому, начиная с 1999 года, в ИГТМ им. Н. С. Полякова НАН Украины проводятся работы по совершенствованию характеристик тахометрического преобразователя, в частности, по расширению диапазона измерений как в область низких, так и верхних его значений без ухудшения других эксплуатационных показателей.

В лучших образцах анемометров ведущих фирм мира снижение нижней границы измерений до 0,15 – 0,3 м/с достигается применением крыльчаток

диаметром 80 – 100 мм предельно облегченной конструкции. При этом ее прочность оказывается недостаточной для измерений скоростей выше 15 – 20 м/с. Чтобы расширить диапазон измерений до 40 – 60 м/с, в рабочий комплект анемометра вводят второй сменный преобразователь с прочной крыльчаткой диаметром 15 – 25 мм. И все же проблема измерений особо малых скоростей, начиная с 0,05 – 0,1 м/с, остается нерешенной, поскольку нижняя граница диапазона измерений 0,15 – 0,2 м/с является конструктивным пределом современных тахометрических преобразователей.

Опыт депрессионных съемок шахт показал, что использование анемометра, содержащего комплект сменных преобразователей на разные пределы диапазона измерений, в экстремальных рудничных условиях не только громоздко и крайне неудобно, но и ненадежно, поскольку легко может стать причиной его отказа. О существенных недостатках преобразователей с большими крыльчатками упоминалось выше.

Поэтому основным направлением исследований стал поиск возможностей обеспечения измерений в диапазоне от 0,05 – 0,1 м/с до 40 – 50 м/с с помощью только одного тахометрического преобразователя с крыльчаткой диаметром 35 мм.

При разработке малогабаритного тахометрического преобразователя самой сложной задачей является получение его надлежащей чувствительности. Поэтому оптимизация аэродинамических характеристик крыльчатки и выбор параметров узлов вращения ее оси должны быть в первую очередь направлены на решение этой задачи. Однако следует при этом учитывать, что механическая прочность облегченной крыльчатки, а также надежность и износостойкость узлов ее вращения должны обеспечивать работоспособность преобразователя при скоростях воздушного потока до 50 м/с. Эти требования взаимнопротиворечивы, поэтому успех разработки определяется возможностью нахождения удачного компромисса между ними.

С точки зрения прикладной аэродинамики каждая лопасть крыльчатки представляет собой крыло с малым относительным удлинением, на котором набегающий воздушный поток скоростью V создает подъемную силу

$$F = S \cdot C_y \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

где S – площадь лопасти; C_y – коэффициент подъемной силы лопасти; ρ – массовая плотность воздуха.

Тогда момент вращения, создаваемый воздушным потоком на оси неподвижной крыльчатки, будет

$$M = F \cdot R_g \cdot n, \quad (2)$$

где n – число лопастей крыльчатки; R_g – радиус приложения равнодействующей

подъемной силы.

Моменту вращением противодействует момент трения на оси вращения крыльчатки, который равен [1]

$$M_{тр} = P \cdot g \cdot f \cdot R_{ц}, \quad (3)$$

где P – масса крыльчатки; f – коэффициент трения цапфы оси о подпятник; $R_{ц}$ – радиус сферической цапфы оси вращения.

Таким образом, для начала вращения крыльчатки под воздействием набегающего воздушного потока необходимо, чтобы момент вращения, вычисленный по (2) был больше момента трения на ее оси по (3).

Рассмотрим каждую из составляющих в выражениях (1) – (3) в отдельности.

Будем считать, что количество лопастей, равное шести, у крыльчатки диаметром 35 мм оптимально по следующим соображениям. Из [2] следует, что коэффициент подъемной силы C_y максимален у крыла с относительным удлинением меньшим единицы. При этом примем, что аэродинамическое качество, которое является важнейшим параметром крыла летательного аппарата, нас не интересует. У шестилопастной крыльчатки, использующей всю площадь диска, относительное удлинение лопасти составляет 0,9, в то время как у 8 – 10 лопастной оно существенно больше, что, естественно, приводит к уменьшению C_y . Это было подтверждено результатами аэродинамических испытаний на ротационном стенде при доводке конструкции преобразователя с крыльчаткой диаметром 35 мм.

Крыльчатка с четырьмя лопастями требует существенного удлинения оси и обечайки, что увеличивает ее массу и лобовое гидравлическое сопротивление преобразователя.

Угол установки лопастей относительно плоскости диска крыльчатки определяет угол атаки воздушного потока. В [2] показано, что максимум коэффициента C_y наблюдается при угле атаки 45° , хотя при этом коэффициент лобового сопротивления C_x далеко не оптимален. Однако он не оказывает влияния на подъемную силу лопасти вблизи порога трогания крыльчатки.

Поэтому угол установки лопастей 45° следует считать оптимальным из условия ее наивысшей чувствительности. К тому же, как следует из [2], несмотря на плохую аэродинамическую форму тонкой плоской лопасти с малым относительным удлинением, срыва потока на ее задней плоскости в широком диапазоне значений числа Re не наблюдается.

В преобразователях лучших современных анемометров используются крыльчатки как с плоскими лопастями, так и закрученными до образования постоянного шага по длине лопасти. Из предыдущего анализа видно, что для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя выгоднее применять плоские лопасти, поскольку оптимальный угол атаки остается постоянным по всей длине.

Момент трения в опорах оси крыльчатки является основным фактором, про-

тивом действующим началу ее вращения при малых скоростях воздушного потока. Как видно из (3), одним из путей уменьшения момента трения является снижение массы крыльчатки. Исходя из этого, ее лопасти были изготовлены из листа алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 0,3 мм, отличающегося высокой прочностью и коррозионной стойкостью, что весьма существенно для прибора, работающего в агрессивной шахтной атмосфере. Однако масса такой крыльчатки в сборе с осью составила 850 мг, что не позволило получить чувствительность преобразователя лучше 0,18 – 0,2 м/с.

Выше отмечалось, что чрезмерное облегчение крыльчатки из-за уменьшения ее прочности приводит к снижению верхней границы диапазона измерений. Это исключало возможность уменьшить массу крыльчатки изготовлением ее из листа толщиной порядка 0,15 мм. Задачу удалось решить разработкой оригинальной технологии химического фрезерования лопастей крыльчатки, изготовленной из листа сплава Д16АТ толщиной 0,3 мм, в результате чего убирается лишняя масса металла из периферийной зоны лопастей таким образом, что обеспечивается их равнопрочность в опасных сечениях без снижения прочности конструкции. В процессе фрезерования центральная часть диаметром 9 мм остается равной 0,3 мм, а остальная часть площади лопастей уменьшается до толщины 0,15 мм. При этом также сохраняется толщина консолей лопастей, по которым производится их разворот до требуемого угла установки. Эта операция позволила уменьшить массу крыльчатки в сборе с 0,85 г до $0,5 \pm 0,05$ г, т.е. в 1,66 раза, вследствие чего при прочих равных условиях ее чувствительность выросла почти вдвое и составила около 0,1 м/с.

Расчет механической прочности крыльчатки, изготовленной с применением описанного метода, показал, что величина изгибных напряжений в опасных сечениях лопасти заторможенной крыльчатки, на которую воздействует воздушный поток скоростью 50 м/с, не превышает 29 Н/мм^2 . Это на порядок меньше условного предела текучести сплава Д16АТ $\sigma_{0,2}$, который равен $275 - 294 \text{ Н/мм}^2$. Еще меньшими оказались напряжения, вызванные центробежной отрывающей силой в опасных сечениях лопасти свободно вращающейся крыльчатки в потоке скоростью 50 м/с.

Приведенные выше данные по чувствительности тахометрического преобразователя получены при использовании оси вращения крыльчатки, изготовленной из сверхтвердого металлокерамического сплава ВК60М, вращающейся в камневых опорах из агата. При этом радиус сферической цапфы R_u , присутствующий в выражении (3), принят равным 0,03 мм. Удельные давления в камневой опоре, рассчитанные по методике [3], составили при скорости воздушного потока 20 м/с – 1714 Н/мм^2 и при скорости 40 м/с – 2690 Н/мм^2 , что значительно меньше верхнего предела, принятого в точном приборостроении, равного 4000 Н/мм^2 [3].

Полученные мероприятия позволили создать тахометрический преобразователь с порогом чувствительности 0,1 м/с и диапазоном измерений от 0,15 до 40 м/с при диаметре крыльчатки 35 мм. Аналогов такому преобразователю в зарубежном приборостроении пока не существует.

Опыт использования преобразователей, а также испытания большой партии анемометров, проведенные в ЦАГИ (г. Москва), показали, что дальнейшее повышение чувствительности крыльчатки уменьшением радиуса цапфы R_c нецелесообразно вследствие ускорения износа камневой опоры при скоростях набегающего воздушного потока до 50 м/с.

Для дальнейшего снижения нижней границы диапазона измерений до 0,05 – 0,1 м/с предложена идея использования тахометрического преобразователя на скоростях воздушного потока, меньших порога его чувствительности. В этом случае невозможно устойчивое стационарное вращение крыльчатки, необходимое для работы в обычном режиме. Однако, легко заметить, что на движение крыльчатки по инерции сильно влияет встречный или попутный поток. Если проанализировать такое нестационарное движение крыльчатки, можно судить о скорости воздействующего на нее потока, имеющего даже запороговую величину. Наличие микроконтроллера в современных приборах делает эту идею технически осуществимой. Задача облегчается тем, что абсолютные погрешности измерений порядка 0,02 – 0,03 м/с в этом диапазоне представляются вполне приемлемыми. При этом относительная погрешность составит 20 – 30 %. Отсюда следует, что даже достаточно грубые математические модели процесса нестационарного движения крыльчатки и простые алгоритмы обработки результатов измерений оказываются работоспособными, поскольку вносимые ими погрешности носят преимущественно относительный характер.

Проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждена реальная возможность расширения диапазона измерений тахометрического преобразователя в область сверхмалых скоростей воздушного потока в соответствии с предложенной идеей.

Результаты работы будут использованы при создании переносного рудничного анемометра нового технического уровня с расширенным диапазоном измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Хандельсман Ю. М. Камневые опоры. – М.: Машиностроение, 1973.
- 2 Горлин С. М. Экспериментальная аэродинамика. – М.: Высшая школа, 1970.
- 3 Ицкович Г. М. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1986.