

УДК 622.414.2.001.2

М.Н. Дудник, мл. научн. сотр.,
В.Н. Веретенник, мл. научн. сотр.,
А.И. Вишницкий, мл. научн. сотр
(ИГТМ НАН Украины)

**ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
КРЫЛЬЧАТКИ ПЕРЕНОСНОГО РУДНИЧНОГО АНЕМОМЕТРА АПР-2**

М.Н. Дуднік, мол. наук. співр.,
В.М. Веретеннік, мол. наук. співр.,
О.І. Вишницький, мол. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

**ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРИЛЬ-
ЧАТКИ ПЕРЕНОСНОГО РУДНИКОВОГО АНЕМОМЕТРА АПР-2**

M.N. Dudnik, M.S.(Tech.),
V.N. Veretennik, M.S. (Tech.),
A.I. Vishnitskiy, M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**CHOICE AND GROUND OF AERODYNAMIC PARAMETERS OF THE
KRYL'CHATKY PORTABLE MINE ANEMOMETER APR-2**

Аннотация. В статье дан анализ особенностей, достоинств и недостатков используемых в мировой практике приборов измерения скорости воздушного потока в горных выработках.

Отмечено, что мировые тенденции совершенствования тахометрических преобразователей расхода воздуха сводятся, в основном, к улучшению конструкции узлов вращения, для чего необходимо использовать современные износостойчивые материалы или сверхминиатюрные подшипники качения. Оптимальным, по существующим представлениям, для современных анемометров высокого класса, имеющих нижний предел диапазона измерений 0,2 – 0,25 м/с, является использование крыльчаток диаметрами 70 – 100 мм.; обосновано уменьшение геометрических параметров крыльчатки, что увеличивает точность измерений. Приведен метод выбора оптимальных аэродинамических параметров крыльчатки: количества и формы лопастей, угла их установки. Полученные результаты использованы при совершенствовании существующей модели АПР-2, а также при создании опытного образца прибора контроля расхода воздуха и депрессии горных выработок.

Ключевые слова: тахометрический преобразователь, воздушный поток, анемометр, крыльчатка, скорость, диапазон измерений, надежность

В настоящее время мировая приборостроительная промышленность производит очень широкий спектр средств измерений скорости воздушного потока – анемометров. Это приборы различного назначения, принципов действия, классов точности и ценовых категорий. Их номенклатура постоянно обновляется, а технические показатели и точность измерений растут.

Лучшие модели имеют диапазоны измерений от 0,2 до 40-50 м/с, а заявленные погрешности измерений не превышают 2 – 3 %, что соответствует требованиям [1] к измерению аэродинамических параметров в шахтных условиях.

В переносных анемометрах, предназначенных для технических измерений в различных отраслях производств, где параметры воздушной среды могут изменяться в широких пределах, и особенно в рудничной аэрологии, все ведущие фирмы мира «Testo GmbH&Co», «Höntsch»(Германия), «Kernco Instruments Co.Inc.», „MiniAir“; „Airflaw Co.“ (США), «Instytut mechaniki gorotworu» (Польша) и др. в подавляющем большинстве случаев применяют тахометрический преобразователь скорости воздушного потока, чувствительным элементом которого является вращающаяся крыльчатка. Это обусловлено рядом его достоинств: простой конструкцией, широким диапазоном измерений, высокой точностью и, главное, практически полным отсутствием зависимости результатов измерений от изменений параметров контролируемой воздушной среды – температуры, давления, влажности, запыленности, газового состава и наличия агрессивных примесей.

Однако тахометрический преобразователь обладает и рядом недостатков, наиболее существенными из которых являются значительные габаритные размеры, слабая защищенность от случайных механических повреждений и главное – наличие узлов вращения крыльчатки, от конструкции которых зависят выходные параметры анемометра, стабильность и ресурс работы, поскольку в процессе эксплуатации, например, в тяжелых рудничных условиях, они подвергаются интенсивному износу.

Мировые тенденции совершенствования тахометрического преобразователя сводятся, в основном, к улучшению конструкции узлов вращения, для чего в них используют современные износостойчивые материалы или сверхминиатюрные подшипники качения. Однако, повышая ресурс работы и стабильность узлов вращения, последнее решение приводит к необходимости для обеспечения надлежащей чувствительности преобразователя применять крыльчатку большего диаметра, снижая тем самым его эксплуатационную надежность. Крыльчатка большого диаметра имеет низкую механическую прочность. Поэтому для расширения верхней границы диапазона измерений в комплект анемометра вводят второй преобразователь с крыльчаткой среднего или малого размера (анемометры «Testo-400», «Testo-450» и др.). Это неудовлетворительное решение для анемометра, рассчитанного на эксплуатацию в экстремальных условиях, например, рудничного. Кроме того, отсутствуют работы, направленные на снижение нижней границы измерений менее 0,2 м/с, хотя в этом давно существует настоятельная потребность.

Основным узлов тахометрического преобразователя является крыльчатка из пластмассы, алюминиевого сплава или титана с плоскими или закрученными лопастями, установленными под определенным углом. Крыльчатка посажена на ось, вращающуюся в специальных опорах, и заключена в цилиндрическую обечайку из металла или пластмассы. Малые габаритные размеры и тяжелые усло-

вия эксплуатации при одновременном повышении требований к точности, надежности, чувствительности, ширине диапазона измерений и ресурсу работы первичного преобразователя современного анемометра выдвигают очень высокие требования к его конструкции и особенно – к конструкции крыльчатки и конструкции узлов ее вращения.

Чрезмерное облегчение конструкции крыльчатки для уменьшения массы и момента инерции снижает и ее прочность, а заодно и возможность измерений скоростей воздушных потоков выше 15-20 м/с. Например, вариант анемометра «MiniAir-масго», у которого верхняя граница диапазона поднята до 40,0 м/с за счет применения более прочной и, соответственно, более тяжелой крыльчатки, утратил свою первоначальную чувствительность, а заодно и способность измерений скоростей потока, меньших 0,3 м/с. Это крайне невыгодный вариант для преобразователя, у которого узлы вращения выполнены с использованием каменных опор со сферической цапфой. На крыльчатке большого диаметра набегающий воздушный поток развивает значительную аксиальную силу, которая совместно с силой тяжести крыльчатки воздействует на заднюю опору и приводит к ее ускоренному износу. Поэтому, если нормированное значение верхней границы диапазона измерений превышает 15-20 м/с, в комплект анемометра вводят второй преобразователь с крыльчаткой малого или среднего размера, т.е. диаметром 10-25 мм. Так построены высококлассные анемометры «Testo-400», «Testo-450», «DA30», «DA40V», «TAD» и др.

Общей тенденцией в разработке преобразователей современных анемометров высокого класса, имеющих нижний предел диапазона измерений 0,2-0,25 м/с, является использование крыльчаток диаметрами 70-100 мм.

Однако преобразователь с крыльчаткой большого диаметра нельзя считать пригодным для установки в современный отечественный анемометр, предназначенный для работы в жестких условиях эксплуатации, например, в горных выработках, из-за его громоздкости и незащищенности от случайных механических повреждений. Это доказано опытом длительной эксплуатации анемометра АСО-3, имеющего крыльчатку диаметром 100 мм.

Кроме того, использование анемометра, содержащего комплект первичных преобразователей для измерений в различных диапазонах скоростей, в жестких производственных условиях не только громоздко и крайне неудобно, но и ненадежно. Вполне обоснованно считать, что анемометр, предназначенный для работы в подобных условиях, должен быть предельно простым в обращении, иметь минимальное время подготовки к проведению измерений и хорошо защищенным от случайных механических повреждений и воздействия сильно загрязненной и агрессивной окружающей среды. В таких условиях даже попытка замены первичного преобразователя может стать причиной выхода анемометра из строя. Поэтому анемометр должен иметь только один первичный преобразователь, обеспечивающий измерения в требуемом диапазоне скоростей воздушного потока, с крыльчаткой диаметром не более 30-35 мм. Рациональная конструкция корпуса преобразователя может обеспечить надежную защиту не-

большой крыльчатки от случайных механических повреждений как при проведении измерений, так и в нерабочем положении, а его небольшие габаритные размеры расширят функциональные возможности анемометра. В пользу такого суждения свидетельствует положительный опыт длительной эксплуатации анемометра АПР-2 в рудничной аэрологии. При диаметре крыльчатки 35 мм анемометр обеспечивает стабильные измерения в диапазоне скоростей воздушного потока от 0,2 до 20,0 м/с.

При разработке преобразователя необходимо решить ряд технических проблем и, в первую очередь, добиться такой же высокой чувствительности, стабильной в процессе эксплуатации анемометра, какой обладают рассмотренные выше лучшие современные преобразователи с крыльчаткой диаметром 70 – 100 мм, т.е. не хуже 0,15 м/с. С другой стороны, верхний предел диапазона измерений должен быть не менее 40 – 50 м/с.

Основные направления исследований, которые необходимо выполнить для решения этих задач, следующие:

- выбор оптимальных аэродинамических параметров крыльчатки: количества и формы лопастей, угла их установки;
- создание математической модели нестационарного движения крыльчатки в воздушном потоке;
- разработка алгоритма определений значения скоростей, меньших порога чувствительности преобразователя.

При разработке малогабаритного широкодиапазонного тахометрического преобразователя самой сложной технической задачей является получение его надлежащей чувствительности, позволяющей обеспечить стабильные измерения скоростей воздушного потока с 0,15 м/с. Поэтому оптимизация аэродинамических характеристик крыльчатки и выбор параметров узлов вращения должны быть в первую очередь направлены на решение этой задачи. Однако следует учитывать, что механическая прочность крыльчатки, а также надежность и износостойкость узлов ее вращения должны обеспечивать высокую работоспособность преобразователя при скоростях воздушного потока до 40 м/с. Поскольку эти вопросы взаимно противоречивы, успех разработки полностью определяется возможностью нахождения удачного компромисса между ними.

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

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

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

Тогда момент вращения, создаваемый набегающим воздушным потоком на оси неподвижной крыльчатки (до начала ее вращения) будет

$$M = F_n R_g n, \quad (2)$$

где n - число лопастей крыльчатки; R_g - радиус приложения равнодействующей аэродинамической силы.

Моменту вращения по (2) противодействует момент трения на оси вращения крыльчатки, который равен

$$M_{mp} = PfR_{mp}, \quad (3)$$

где P – вес крыльчатки; f - коэффициент трения цапфы оси о подпятник; R_{mp} - радиус цапфы оси в точке контакта с подпятником.

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

Рассмотрим каждую из составляющих (1)-(3) в отдельности.

1. Суммарная площадь всех лопастей крыльчатки F_n определяется ее диаметром, который в нашем случае равен 35 мм за вычетом необходимой минимальной площади на просечки между ними и центральной звездочки, в которой закреплена втулка оси. У крыльчаток анемометров мировых производителей, количество лопастей варьируется от четырех до 8-10 в зависимости от их диаметра. Будем считать, что количество лопастей, равное шести, у крыльчаток диаметром 35 мм анемометра АПР-2 оптимально по следующим соображениям. Из [2] следует, что коэффициент подъемной силы C_y максимален у крыльев с относительным удлинением меньшим единицы. При этом примем, что аэродинамическая добротность лопасти, которая, например, является одним из важнейших параметров при расчете крыла летательного аппарата, нас не интересует. У шестилопастной крыльчатки, использующей практически всю площадь диска, например, у анемометра АПР-2, относительное удлинение лопасти составляет 0,9, в то время как у 8-10-лопастной оно существенно больше, что, естественно, приводит к уменьшению C_y . Использование таких крыльчаток можно объяснить только стремлением повысить жесткость предельно облегченной крыльчатки большого диаметра. При доводке конструкции крыльчатки диаметром 35 мм на ротационном стенде было отмечено падение чувствительности крыльчаток с увеличенным до 8-10 количеством лопастей на 20-30 %. Выбранное количество лопастей, равное шести, является оптимальным также по конструктивным соображениям, поскольку крыльчатка с четырьмя лопастями требует значительного удлинения оси и обечайки, что увеличивает массу крыльчатки и лобовое гидравлическое сопротивление преобразователя.

2. Угол установки лопастей относительно плоскости диска крыльчатки определяет угол атаки набегающего воздушного потока, который при неподвижной крыльчатке является дополнительным к нему до 90^0 . В [2,3] показано, что максимум коэффициента подъемной силы C_y наблюдается при угле атаки 45^0 , хотя коэффициент лобового сопротивления C_x при этом далеко не оптимален. Однако его влияние будет иметь существенное значение только при больших скоростях набегающего потока, а на чувствительность крыльчатки вблизи порога ее трогания он не оказывает никакого влияния.

Поэтому угол установки лопастей крыльчатки, равный 45^0 , следует считать оптимальным из условия обеспечения ее наивысшей чувствительности. При этом, как следует из [2], несмотря на плохую аэродинамическую форму тонкой плоской лопасти, срыва потока с падением давления на ее задней плоскости в широком диапазоне чисел Re не наблюдается.

Следует отметить, что, судя по фотографиям, у некоторых зарубежных анемометров с крыльчатками диаметрами 70-100 мм, а также у отечественного АСО-3 угол установки лопастей близок к 30^0 . Исходя из приведенного выше, это нельзя объяснить при явном стремлении увеличить чувствительность преобразователя использованием крыльчаток столь больших и неудобных во всех отношениях размеров.

3. В преобразователях лучших современных моделей анемометров используются крыльчатки как с плоскими лопастями, так и закрученными до образования постоянного шага по всей длине лопасти.

Из предыдущего анализа видно, что для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя гораздо выгоднее применять плоские лопасти, поскольку оптимальный угол установки остается неизменным по всей ее длине, создавая максимальный вращательный момент на оси крыльчатки в момент начала ее вращения. Закрученная лопасть лишена этого качества, хотя она имеет значительно меньший коэффициент лобового сопротивления, что при большой площади крыльчаток диаметрами 70-100 мм и высоких скоростях набегающего воздушного потока в ряде случаев может иметь решающее значение.

Крыльчатка с плоскими лопастями имеет еще одно немаловажное преимущество: высокую технологичность изготовления и окончательной юстировки.

Таким образом, на основании выполненных исследований может быть сделан вывод о том, что при использовании в сложных условиях измерения аэродинамических параметров, характерных для большинства горных предприятий Украины, необходимо усовершенствовать конструкцию, геометрические параметры крыльчатки анемометра АПР-2 и состав используемых для ее изготовления материалов, обеспечивающих сохранение ее формы и прочности при воздействии максимального скоростного напора набегающего воздушного потока.

Последний фактор является основой для проведения дальнейших научных исследований.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62. – Київ: 2010 – 2154 (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
2. Горлин, С.М. Экспериментальная аэромеханика / С.М. Горлин. – М.: Высшая школа, 1970. – 365 с.
3. Прикладная аэродинамика / Под редакцией Н.Ф. Краснова. – М: Высшая школа, 1974. – 402 с.

REFERENCES

1. State committee of Ukraine on industrial safety, labour protection and mining supervision (2010), *NPAOP 10.0-1.01-10: Pravila bezpeki u vugilnirh shakhtakh* [NPAOP 10.0-1.01-10 Rules of safety in coal mines], Kiev, Ukraine
2. Gorlin, S.M. (1970), *Eksperymental'naya aeromekhanika* [Experimental air-mechanic], High school, Moscjw, USSR
3. *Prikladnaya aerodinamika* [Applied air-dynamic] (1974), Edited N.F. Krasnov, High school, Moscjw, USSR.

Об авторах

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,

Веретенник Виктор 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,

Вишницкий Александр Иванович, инженер в отделе горной термоаэродинамики и автоматизированных систем Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровськ, Украина,

About the authors

Dudnik Michail Nikolayevich, ingeneer 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,

Veretennik Victor Nikolayevich, ingeneer 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,

Vishnitskiy Aleksandr Ivanovich, ingeneer 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,

Аноація. В статті даний аналіз особливостей, достоїнств і недоліків приладів вимірювання швидкості повітряного потоку в гірських виробках, що використовуються в світовій практиці.

Відзначено, що світові тенденції вдосконалення тахометричних перетворювачів витрати повітря зводяться, в основному, до поліпшення конструкції вузлів обертання, для чого необхідно використовувати сучасні зносостійкі матеріали або надмініатюрні підшипники качення. Оптимальним, за існуючими уявленнями, для сучасних анемометрів високого класу, що мають нижню межу діапазону вимірювань 0,2 – 0,25 м/з, є використання крильчаток діаметрами 70 – 100 мм.; обґрунтовано зменшення геометричних параметрів крильчатки, що збільшує точність вимірювань. Приведений метод вибору оптимальних аеродинамічних па-

раметрів крильчатки: кількості і форми лопатей, кута їх установки. Одержані результати використані при вдосконаленні існуючої моделі АІР-2, а також при створенні дослідного зразка приладу контролю витрати повітря і депресії гірських виробок.

Ключові слова: тахометричний перетворювач, повітряний потік, анемометр, крильчатка, швидкість, діапазон вимірювань, надійність

Abstract. The analysis of features, dignities and lacks of the devices of measuring of speed of current of air used in world practice in the rock making is given in the article.

It is **marked** that the world tendencies of perfection of tachometrical transformers of expense of air are taken, mainly, to the improvement of construction of rotation knots, for what it is necessary to use modern wear-resistant materials or subminiaturizational ball bearings. It is shown, that optimum for the modern anemometers of high class, having the lower limit of range of measurings 0,2 – 0,25 м/s, there is the use by kryl'chatky diameters 70 – 100 mm.; diminishment of geometrical parameters of kryl'chatky, that multiplies exactness of measurings, is grounded. The method of choice of optimum aerodynamic parameters of kryl'chatky is resulted: amounts and forms of blades, corner of their setting. It is drawn on got result at perfection of the existent model APR-2, and also at creation of pre-production model of device of control of expense of air and depression of the mountain making.

Keywords: tachometrical transformer, current of air, anemometer, kryl'chatka, speed, range of measurings, reliability

Стаття поступила в редакцію 20.02.2013

Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук Т.В.Бунько