ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5):169-178
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4:519.85:551.508.5 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_169

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ САПР АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА

С.И. Буянов[1], В.А. Румянцева[2]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия
[2] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: valar@bmstu.ru

Аннотация: Приведен обзор состояния рудничной анемометрии и сравнительный анализ методов измерения скоростей воздушного потока, а также обзор математических моделей датчика акустического анемометра типа АПА 1 (Анемометр Портативный Акустический). Этот датчик представляет собой цилиндрический волновод-воздуховод с вмонтированными в его стенки пьезоэлектрическими кольцевыми преобразователями (источником и приемником акустического сигнала). Проведен сравнительный анализ моделей анемометрического канала и его составляющих для выбора приближения наиболее подходящего для построения САПР акустического анемометра. В качестве базовой модели аэроакустического взаимодействия выбрана модель распространения акустического радиоимпульса в бесконечном цилиндрическом волноводе с жесткими стенками при наличии однородного потока. Приводится решение волнового уравнения в движущейся среде, полученное в виде комплексного ряда Фурье. Свойства пьезоэлектрических преобразователей учитываются в модели при помощи приближения идеального полосового фильтра с заданными резонансной частотой и шириной полосы пропускания. Описан интерфейс программы, разработанной для вычисления результатов моделирования и обработки экспериментальных данных, полученных при помощи действующих опытных образцов. Программа позволяет получить модель сигнала на приемном пьезопреобразователе для произвольных размеров датчика и параметров окружающей среды, а также оценить диапазон данных величин в котором возможно функционирование прибора.

Ключевые слова: моделирование, акустический анемометр, распространение акустического импульса в волноводе, автоматическое проектирование, контроль вентиляции.

Для цитирования: *Буянов С. И., Румянцева В. А.* Разработка моделей физических процессов первичного преобразователя для САПР акустического анемометра // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 169–178. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_169.

Model development for physical processes in sensing device for CAD system of sonic anemometer

S.I. Buyanov[1], V.A. Rumyantseva[2]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
[2] Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia e-mail: valar@bmstu.ru

Abstract: The current situation in mine anemometry is described, the present-day methods of air flow velocity measurement are compared and the mathematical models of a sensor for a

© С.И. Буянов, В.А. Румянцева. 2021.

sonic anemometer of APA-1 type (portable sonic anemometer) are reviewed. This sensor represents a cylindrical wave guide–air tube with piezoelectric ring transducers (sources and receivers of acoustic signals) embedded in the walls. The models of the anemometric channel and its components are analyzed for selecting the most appropriate approximation for CAD design for a sonic anemometer. The basic model of aero-acoustic interaction is selected to be the model of acoustic radio pulse propagation in an infinite cylindrical wave guide with rigid walls and with uniform flow. The solution of the wave equation of motion in fluid in motion is obtained in the form of the complex Fourier series. The properties of the piezoelectric transducers are included in the model using the approximation of an ideal band-pass filter with the present resonance frequency and pass bandwidth. The interface of the program developed for the model computation and test data processing is described. The test data are obtained using workable prototypes. The program provides the model of a signal on a receiving piezo transducer at arbitrary sizes of the sensor and ambient parameters, and allows evaluation of the ranges of the involved values for a transducer to be capable.

Key words: modeling, sonic anemometer, acoustic pulse propagation in wave guide, computer-aided design, ventilation control.

For citation: Buyanov S. I., Rumyantseva V. A. Model development for physical processes in sensing device for CAD system of sonic anemometer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):169-178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_169.

Введение

Контроль вентиляции имеет большое значение в работе подземных предприятий и, в частности, угольных шахт [1]. При недостаточном проветривании могут возникать взрывоопасные концентрации метана. Избыточное проветривание приводит к ухудшению условий труда и повышенному расходу электроэнергии, а следовательно, неоправданным затратам. Поэтому необходимо поддерживать расход воздуха в шахтных выработках на достаточном уровне. Контроль расхода обеспечивается анемометрами — приборами, требования к которым задаются правилами безопасности. Для осуществления данного контроля необходимы датчики расходов и скоростей газовоздушных потоков, к которым предъявляется ряд специфических требований, таких как точность, надежность, широкий динамический диапазон, безынерционность, возможность управления и передачи информации через компьютер. Зачастую приборы не могут удовлетворять всем требованиям вследствие ограниченности возможностей самого принципа действия, лежащего в основе измерений. Кроме того, в условиях стремительного развития информационно-измерительных систем и микропроцессорной техники возникает необходимость в современных датчиках скоростей воздушных потоков. Поэтому разработка и совершенствование новых методов измерения скоростей воздушных потоков, а также разработка новых точных и надежных приборов, является актуальной научно-технической проблемой и вызывает интерес многих исследователей.

Анемометры, приборы для определения скорости воздушного потока, известны давно. Согласно [2], первые упоминания о них относятся еще к XV в. Это были механические, то есть чашечные анемометры. Еще к механическим анемометрам относят анемометры, ис-

пользующие крыльчатку, или флюгер. В этих приборах скорость воздушного потока преобразуется в скорость вращения подвижной части датчика анемометра.

В настоящее время анемометры используются в метеорологии и в промышленности для контроля вентиляции зданий и подземных сооружений. Наиболее распространены сейчас именно механические анемометры, такие же, как и в XV в. Однако в самом принципе действия есть противоречия (крыльчатка должна быть легкой для повышения чувствительности, но прочной, чтобы выдерживать большие скорости воздуха, трение должно быть низким, но при этом проявляется эффект остаточного вращения при отсутствии потока). Поэтому, начиная с XX в. по настоящее время, активно разрабатываются и исследуются и другие методы измерения скорости потока.

Для измерения малых скоростей воздушного потока (до 5 м/с) используются термоанемометры, в которых фиксируется изменение сопротивления нагревательного элемента, помещенного в поток [3]. Обычно такие датчики нечувствительны к направлению потока. Однако есть исследования по разработке системы термодатчиков, позволяющей определить направление воздушного потока [4, 5]. Авторы [4] утверждают, что их система позволяет измерить даже колебательные акустические скорости.

Для измерения больших скоростей используются методы, работающие с измерением разности давлений, создаваемой потоком, как, например, трубка Пито. Это направление можно обобщенно обозначить как методы, использующие аэродинамику помехи, помещенной в поток. В настоящее время в связи с появлением тензодатчиков это направление анемометрии активно разрабатывается [6, 7].

В случаях, когда требуется широкий диапазон измеряемых скоростей, безынерционность и отсутствие препятствий для измеряемого потока, наиболее перспективным направлением методов анемометрии представляется использование ультразвука. Поэтому многие исследователи разрабатывают конструкцию ультразвуковых (акустических) анемометров: для метеорологии [8], для контроля воздушных потоков в помещениях [9] и т.д.

В НИТУ «МИСиС» под руководством проф. С.З. Шкундина работает научная школа акустической анемометрии. В ней разрабатываются приборы и установки, в которых измеряется скорость газовоздушного потока акустическим методом. Одно из направлений исследования — это шахтная анемометрия. Для шахтных информационно-измерительных систем разрабатывается интегральный акустический анемометр. Этот прибор прозвучивает поперечное сечение выработки и позволяет измерить усредненное значение скорости воздуха [10].

По мнению авторов, наиболее перспективным способом измерения скорости газовоздушного потока является фазовый акустический метод, предложенный проф. С.З. Шкундиным [11]. Данный метод был использован при создании портативного шахтного анемометра АПА-1 (анемометр портативный акустический), а также при создании эталонов в составе стендов для поверки анемометров.

Датчик анемометра представляет собой цилиндрический волновод-воздуховод с кольцевыми пьезопреобразователями, вмонтированными в его стенки (рис. 1). Каждый из преобразователей попеременно является то приемником, то источником акустической волны. Датчик помещается в воздушный поток и тогда разность фаз акустических сигналов, распространяющихся по потоку и

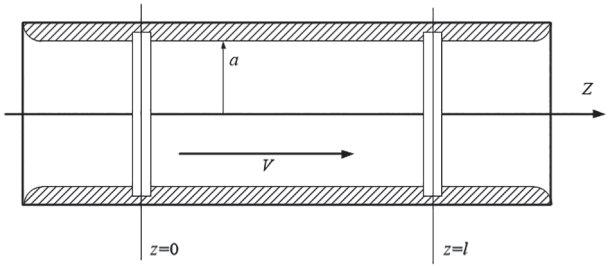

Рис. 1. Схема анемометрического канала
Fig. 1. Anemometric channel layout

против потока, будет пропорциональна скорости. По ней и определяется скорость потока.

Анемометр АПА-1 выпускается НПО «Волна» и успешно работает в ряде отечественных шахт. Однако в условиях развивающихся информационных технологий возникает необходимость в новых датчиках, использующих фазовый акустический метод, например, таких как датчик расхода метана [12], а также в модификации анемометрических датчиков для разработки стационарных приборов и улучшения характеристик портативных. Поэтому разработка системы автоматизированного проектирования акустического анемометра, позволяющей получить параметры датчиков с заданными характеристиками, является актуальной задачей.

Обзор существующих моделей датчика акустического анемометра

Для обоснования фазового акустического метода, а также для минимизации погрешности измерения скорости потока, был разработан ряд моделей с той или иной степенью точности описывающих работу прибора.

Описание модового характера распространения может быть получено как решение задачи о распространении акустической волны в цилиндрическом бесконечном волноводе в однородном потоке [13]. Это решение было использовано для акустического анемометра как первое приближение задачи моделирования [11], не учитывающее отражения от концов волновода. Следующее приближение, учитывающее конечность длины волновода, было сделано методами Винера-Хопфа [14, 15] и обобщенной матрицы рассеяния [15, 16]. Стенки волновода считались при этом бесконечно тонкими. Следующее приближение, учитывающее толщину стенок, рассматривается в [15, 17]. Форма фланцев при этом считается прямоугольной. Во всех вышеперечисленных моделях поток считается однородным и постоянным.

Хотя для всех этих моделей были получены приближенные аналитические решения, учет отражений волны от концов волновода не перестает быть весьма сложной и требующей больших вычислительных ресурсов проблемой. Поэтому получение акустического поля возможно лишь в режиме моделирования, а включить процесс моделирования в алгоритм работы прибора не представляется целесообразным.

В связи с этим был разработан импульсный метод работы анемометра, позволяющий разделить во времени прямой и отраженный сигналы, а также приход на приемник различных мод. Было проведено моделирование импульсного режима работы анемометра: без учета отражений [18], с учетом однократного отражения от концов волновода, с учетом двух отражений, с учетом поперемен-

ного переключения преобразователей, а также моделирование импульсного режима с учетом индивидуальных характеристик пьезоэлектрических преобразователей [17]. Поскольку моделирование показало, что в импульсном режиме отражения действительно не накладываются на прямой сигнал, в дальнейшем для разработки САПР использовалось приближение бесконечно длинного волновода.

Кроме моделей, построенных в приближении однородного потока, есть модели, учитывающие его неоднородность. Существует модель, описывающая поток внутри анемометрического канала с учетом его реальных размеров и формы, полученная численным методом [19], а также аналитическая модель распространения акустической волны в неоднородном (ламинарном) потоке в бесконечном цилиндре [20]. Однако неоднородность потока внутри анемометрического канала и отличие его средней скорости от внешней измеряемой скорости учитываются при помощи тарировочных характеристик, поэтому наша модель системы основана на приближении однородного постоянного потока.

Модель распространения акустического радиоимпульса в цилиндрическом волноводе-воздуховоде (методы)

Рассмотрим теоретическую модель, используемую при проектировании датчиков. Она является решением волнового уравнения в среде с однородным потоком (1) с граничными условиями, соответствующими бесконечному цилиндрическому волноводу (2). Источником волны является кольцо, излучающее акустические периодические радиоимпульсы.

$$-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}-\frac{2M}{c}\frac{\partial^2\varphi}{\partial z\partial t}-M^2\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}+\Delta\varphi=0 \qquad (1)$$

Здесь $\varphi(r, z, t)$ — акустический потенциал, такой что $\vec{v}=\nabla\varphi$, где

$$\vec{v}\left(r,z,t\right)=\left(v_r\left(r,z,t\right),v_z\left(r,z,t\right)\right) \text{ —}$$

вектор колебательной скорости; r — радиальная координата (расстояние от оси волновода); z — продольная координата (проекция на ось волновода); t — время. В нашем случае задача обладает осевой симметрией, поэтому в цилиндрической системе координат все векторы имеют только две компоненты и зависят только от двух координат. $M = V/c$ — число Маха; V — скорость потока; c — скорость звука в воздухе.

$$\left.\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right|_{r=a}=\begin{cases}V_0 f(t) & |z|\le h;\\ 0 & |z|>h.\end{cases} \qquad (2)$$

В импульсном режиме

$$f(t)=f_{имп}(t)=\begin{cases}\exp(i\omega t) & t\in\left[nT,\tau+nT\right]\\ 0 & t\notin\left[nT,\tau+nT\right]\end{cases},$$

$n = 0, 1, 2, \ldots \tau$ — длительность импульса; T — период повторения; V_0 — амплитуда колебательной скорости; ω — угловая частота колебательной скорости; a — радиус волновода; $2h$ — высота кольцевого источника колебаний; расположенного в начале координат; i — мнимая единица.

Разложение функции $f_{имп}(t)$ в комплексный ряд Фурье будет следующим (3)–(4):

$$f(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}C(n)\cdot\exp(in\omega_0 t)\,; \qquad (3)$$

$$C(n)=\begin{cases}\dfrac{1}{\mathrm{i}T(\omega-n\omega_0)}\left[\exp(\mathrm{i}(\omega-n\omega_0)\tau)-1\right], n\neq\dfrac{\omega}{\omega_0};\\ \dfrac{\tau}{T},\quad n=\dfrac{\omega}{\omega_0}.\end{cases}\tag{4}$$

где $\omega_0 = 2\pi/T$; n — номер гармоники ряда Фурье.

Используя разложение (3)–(4), запишем решение уравнения (1):

$$\varphi_{\pm}(r,z,t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}C(n)\sum_{m=0}^{\infty}2V_0\mathrm{i}\frac{\sin(s_{\pm m}^{n}h)\cdot J_0\left(\dfrac{\mu_m r}{a}\right)\cdot\exp(\mathrm{i}\omega_0 tn-\mathrm{i}s_{\pm m}^{n}z)}{a\cdot s_{\pm m}^{n}\cdot J_1'(\mu_m)\sigma_m^n\cdot\theta_m}\tag{5}$$

где

$$s_{\pm m}^{n}=\frac{-\dfrac{\omega_0 n}{c}M\pm\sigma_m^n}{\beta^2};\quad \sigma_m^n=\begin{cases}\sqrt{\left(\dfrac{\omega_0 n}{c}\right)^2-\beta^2\left(\dfrac{\mu_m}{a}\right)^2} & ,\left(\dfrac{\omega_0 n}{c}\right)>\beta\left(\dfrac{\mu_m}{a}\right)\\ -\mathrm{i}\cdot\sqrt{\beta^2\left(\dfrac{\mu_m}{a}\right)^2-\left(\dfrac{\omega_0 n}{c}\right)^2} & ,\left(\dfrac{\omega_0 n}{c}\right)<\beta\left(\dfrac{\mu_m}{a}\right)\end{cases}$$

$$\beta=\sqrt{1-M^2};\quad \theta_m=\begin{cases}2 & m=0;\\ 1 & m\neq 0.\end{cases}$$

μ_n — корни функции Бесселя первого порядка первого рода, n = 0, 1, 2…

Индекс m соответствует номеру нормальной моды, распространяющейся в волноводе. В каждом волноводе существует конечное число распространяющихся мод и бесконечное число быстро затухающих. Количество распространяющихся мод определяется соотношением длины волны и радиуса волновода. Мода с номером m является распространяющейся, пока выполняется неравенство (6):

$$k^2-\beta^2\left(\frac{\mu_m}{a}\right)^2>0\,.\tag{6}$$

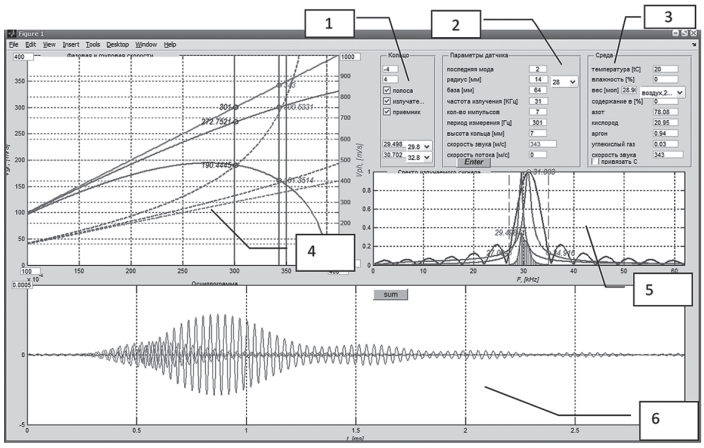

Рис. 2. Интерфейс программы расчета характеристик анемометрического канала
Fig. 2. Program interface for calculation of anemometric channel characteristics

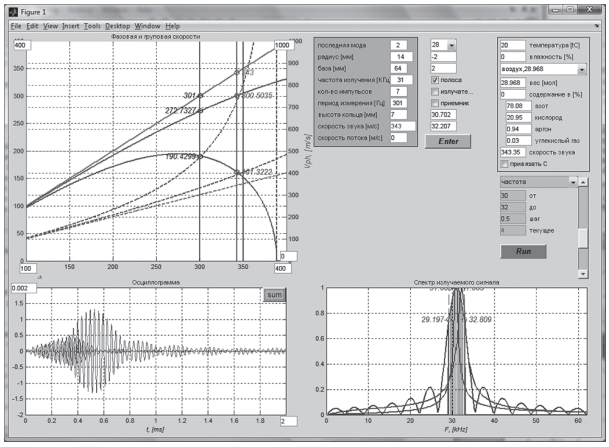

Рис. 3. Спектральные характеристики импульса, распространяющегося в анемометрическом канале с учетом полосы пропускания пьезопреобразователей

Fig. 3. Spectrum of pulse in anemometric channel with regard to pass band of piezo transducers

Программа для вывода результатов моделирования (результаты)

Для вывода результатов моделирования в системе MatLab была разработана программа. Ее интерфейс показан на рис. 2. В трех панелях в правом верхнем углу окна программы располагаются три формы входных данных. В форме *1* задаются параметры частотных характеристик кольцевых пьезопреобразователей; в форме *2* — параметры анемометрического канала; форма *3* предназначена для вычисления скорости звука в газовоздушной смеси.

Результаты моделирования выводятся в виде графиков. Для определения возможного диапазона скоростей звука, при которых возможна работа датчика с заданными характеристиками, строится график зависимости фазовых (пунктирные линии) и групповых (сплошные линии) скоростей различных мод от скорости звука (рис. 2 (4)). Количество мод, которые учитываются при моделировании, задается в форме 2.

Под панелями входных данных располагается график с амплитудными спектрами колец и излучаемого импульса. Свойства колец могут учитываться двумя способами: с использованием АФЧХ реальных колец (рис. 2 (5)) и заданием только полосы пропускания преобразователей (рис. 3).

Внизу окна программы находится график модели сигнала на приемном преобразователе для каждой моды в отдельности (рис. 2 (6)). Это позволяет определить временную задержку измерений, необходимую для того, чтобы прибор работал на какой-то одной из нормальных мод, что позволяет исключить зависимость показаний прибора от изменения скорости звука на каждом шаге измерений.

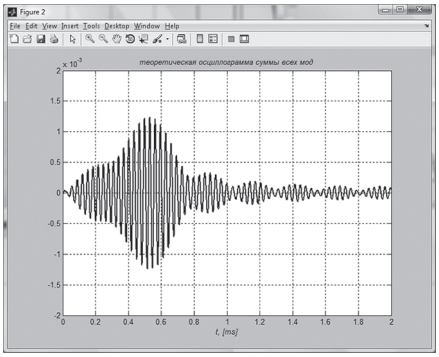

Рис. 4. Теоретическая модель осциллограммы сигнала на приемном преобразователе

Fig. 4. Theoretical model oscillogram of signal on receiving transducer

Модель осциллограммы сигнала на приемном преобразователе вычисляется как сумма нормальных мод. Она выводится на экран в отдельном окне (рис. 4) при нажатии на кнопку «sum». Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными осциллограммами. При этом к теоретическим осциллограммам нужно добавлять временную задержку порядка одного периода частоты заполнения на «раскачку» колец, поскольку при моделировании не учитываются ФЧХ преобразователей.

Оптимизация параметров прибора с целью повышения точности измерений (обсуждение результатов)

Разработанная модель распространения акустического радиоимпульса в волноводе-воздуховоде является частью САПР акустического анемометра. Она позволяет автоматизировать оптимизацию таких параметров прибора как: размеры анемометрического канала (длина волновода и длина базы), размеры пьезопреобразователей (высота и толщина), параметры импульса (период повторения пачек и количество импульсов в пачке). Остальные параметры определяются требованиями к прибору и внешними условиями.

Заключение

САПР датчика акустического анемометра построена на основании модели распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводе-воздуховоде при наличии потока.

При помощи разработанной системы были сконструированы опытные образцы акустических портативных и стационарных анемометров, акустического спирометра. Экспериментальные характеристики полученных приборов соответствуют теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шкундин С. З.*, *Петров А. Г.*, *Лупий М. Г.*, *Вановский В. В.*, *Танцов П. Н.* Программный комплекс динамического расчета воздухораспределения для угольных шахт // Уголь. — 2017. — № 12 (1101). — С. 32 — 34.

2. *Wikipedia* contributors. (2019, August 1). Anemometer. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 08:06, August 9, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anemometer&oldid=908819219

3. *Dhruv T., Nimit K., Rohan M.* Design and simulation of MEMS anemometer / Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune.

4. *Zhongliang Luo, Zhe Li, Chengchen Gao, Yilong Hao, Yufeng Jin* Anemometer with three-dimensional directionality for detection of very low speed air flow and acoustic particle velocity detecting capability / 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2017, pp. 1029 — 1032.

5. *Jedermann R., Hartgenbusch N., Borysov M., Lang W.* Design parameters for the housing of two-dimensional air flow sensors // IEEE Sensors Journal. 2018, vol. 18, no. 24, pp. 10154 — 10162.

6. *Bo Sun, Wei Zhou, En-Quan Fang, Min-Zheng Yuan, Ning Gan* A Cylindrical vehicle-mounted anemometer based on 12 pressure sensors — principle, prototype design, and validation // IEEE Sensors Journal. 2018, vol. 18, no. 17, pp. 6954 — 6961.

7. *Dian Milchev Iliev* Research and development of a strain gauge anemometer // IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET). 2018.

8. *Vipin Prakash Yadav, Alakh Sinha, Arun Khosla* Design and implementation of ultrasonic anemometer / 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES). 2017. DOI: 10.1109/ICPCES.2017.8117645.

9. *Arens E., Ghahramani A., Przybyla R., Andersen M., Min S., Peffera T., Raftery P., Zhu M., Luu V., Zhang H.* Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer // Energy and Buildings. 2020, vol. 211, no. 15, article 109805.

10. *Шкундин С. З.*, *Бахаров Л. Е.* Интегральная анемометрия — прорыв в управлении вентиляцией угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S1. — С. 440—453.

11. *Шкундин С. З.*, *Лашин В. Б.* Фазовый способ акустической анемометрии // Метрология. — 1990. — № 7. — С. 39—43.

12. *Шкундин С. З.*, *Буянов С. И.*, *Румянцева В. А.*, *Стучилин В. В.* Измеритель дебита метана в подземных дегазационных скважинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № S1. — С. 504—511.

13. *Лапин А. Д.* Об излучении и распространении звука в цилиндрической трубе при наличии потока / Акустико-аэродинамические исследования: сборник. — М.: Наука, 1975. — С. 57—60.

14. *Johnston G. W.*, *Ogimoto K.* Sound radiation from a finite length unflanged circular duct with uniform axial flow. I. Theoretical analysis // Journal of the Acoustical Society of America. 1980, vol. 68, no. 6, pp. 1858—1870.

15. *Шкундин С. З.*, *Кремлева О. А.*, *Румянцева В. А.* Теория акустической анемометрии. — М.: изд-во Академии горных наук, 2001.

16. *Кремлева О. А. Шкундин С. З.* Метод расчета акустического поля внутри конечного цилиндрического канала с потоком // Акустический журнал. — 1998. — т. 44. — № 1. — С. 84.

17. *Шкундин С. З.*, *Стучилин В. В.*, *Румянцева В. А.* Автоматизация проектирования акустического анемометра для угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2001. — № 10. — С. 175—180.

18. *Шкундин С. З.*, *Буянов С. И.*, *Румянцева В. А.* Исследование распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводе с движущимся воздушным потоком // Наукоемкие технологии. — 2002. — № 1.

19. *Воронцов А. В.*, *Румянцева В. А.* Моделирование калибровочной характеристики акустического анемометра // Горный информативно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 10. — С. 331—336.

20. *Румянцева В. А.* Исследование распространения акустической волны в неоднородном воздушном потоке в канале шахтного акустического анемометра // Научный вестник МГГУ. — 2013. — № 10 (43). — С. 81—89. ГИАБ

REFERENCES

1. Shkundin S. Z., Petrov A. G., Lupiy M. G., Vanovskiy V. V., Tantsov P. N. Software system for the dynamic calculation of air distribution in coal mines. *Ugol'*. 2017, no. 12 (1101), pp. 32—34. [In Russ].

2. *Wikipedia contributors*. (2019, August 1). Anemometer. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 08:06, August 9, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anemometer&oldid=908819219

3. Dhruv T., Nimit K., Rohan M. Design and simulation of MEMS anemometer. *Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune*.

4. Zhongliang Luo, Zhe Li, Chengchen Gao, Yilong Hao, Yufeng Jin Anemometer with three-dimensional directionality for detection of very low speed air flow and acoustic particle velocity detecting capability. *19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*. 2017, pp. 1029—1032.

5. Jedermann R., Hartgenbusch N., Borysov M., Lang W. Design parameters for the housing of two-dimensional air flow sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 24, pp. 10154—10162.

6. Bo Sun, Wei Zhou, En-Quan Fang, Min-Zheng Yuan, Ning Gan A Cylindrical vehicle-mounted anemometer based on 12 pressure sensors — principle, prototype design, and validation. *IEEE Sensors Journal*. 2018, vol. 18, no. 17, pp. 6954—6961.

7. Dian Milchev Iliev Research and development of a strain gauge anemometer. *IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET)*. 2018.

8. Vipin Prakash Yadav, Alakh Sinha, Arun Khosla Design and implementation of ultrasonic anemometer. 4*th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES)*. 2017. DOI: 10.1109/ICPCES.2017.8117645.

9. Arens E., Ghahramani A., Przybyla R., Andersen M., Min S., Peffera T., Raftery P., Zhu M., Luu V., Zhang H. Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer. *Energy and Buildings*. 2020, vol. 211, no. 15, article 109805.

10. Shkundin S. Z., Bakharov L. E. Integral anemometry — A breakthrough in ventilation control in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S1, pp. 440 — 453. [In Russ].

11. Shkundin S. Z., Lashin V. B. Acoustic phase anemometry. *Metrologia*. 1990, no. 7, pp. 39 — 43. [In Russ].

12. Shkundin S. Z., Buyanov S. I., Rumyantseva V. A., Stuchilin V. V. Methane flow rate meter in underground drainage boreholes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. S1, pp. 504 — 511. [In Russ].

13. Lapin A. D. Sound emission and propagation in cylindrical tube with flow. *Akustiko-aerodinamicheskie issledovaniya*: sbornik [Acoustic–Aerodynamic Research: Composite Book], Moscow, Nauka, 1975, pp. 57 — 60.

14. Johnston G. W., Ogimoto K. Sound radiation from a finite length unflanged circular duct with uniform axial flow. I. Theoretical analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1980, vol. 68, no. 6, pp. 1858 — 1870.

15. Shkundin S. Z., Kremleva O. A., Rumyantseva V. A. *Teoriya akusticheskoy anemometrii* [Theory of acoustic anemometry], Moscow, izd-vo Akademii gornykh nauk, 2001.

16. Kremleva O. A. Shkundin S. Z. Calculation method of acoustic field inside a finite cylindrical channel with flow. *Akusticheskiy zhurnal*. 1998, vol. 44, no. 1, pp. 84. [In Russ].

17. Shkundin S. Z., Stuchilin V. V., Rumyantseva V. A. Automation of sonic anemometer design for coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2001, no. 10, pp. 175 — 180. [In Russ].

18. Shkundin S. Z., Buyanov S. I., Rumyantseva V. A. Acoustic pulse propagation in cylindrical wave guide with air flow in motion. *Naukoemkie tekhnologii*. 2002, no. 1. [In Russ].

19. Vorontsov A. V., Rumyantseva V. A. Modeling of calibration curve for sonic anemometer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 10, pp. 331 — 336. [In Russ].

20. Rumyantseva V. A. Acoustic wave propagation in nonuniform air flow in in-mine sonic anemometer channel. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2013, no. 10 (43), pp. 81 — 89. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буянов Сергей Игоревич — старший преподаватель, НИТУ «МИСиС»,
Румянцева Валентина Анатольевна — канд. техн. наук, доцент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: valar@bmstu.ru.

Для контактов: Румянцева В.А., e-mail: valar@bmstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Buyanov, Senior Lecturer, National University
of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
V.A. Rumyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Bauman Moscow State Technical University,
105005, Moscow, Russia, e-mail: valar@bmstu.ru.
Corresponding author: V.A. Rumyantseva, e-mail: valar@bmstu.ru.

Получена редакцией 16.07.2020; получена после рецензии 29.01.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 16.07.2020; received after the review 29.01.2021; accepted for printing 10.04.2021.