

УДК 621.928.93:621.3.088:628.511  
DOI 10.23947/2541-9129-2017-4-120-136

## НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

*Ю. И. Булыгин, Н. Н. Азимова, И. С. Купцова*

Донской государственный технический университет,  
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)

[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)

[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)

Проведена проверка достоверности и оценка точности измерения аэродинамических параметров в центробежных пылеуловителях. Проанализированы требования нормативно-технической документации к схемам и методам проведения аэродинамических испытаний и выбран наиболее оптимальный. Выполнены расчёты погрешностей измерения давлений, скорости и расхода воздуха комбинированным приёмником давления в сочетании с дифференциальным манометром, а также проверена достоверность экспериментального определения искомых параметров на примере полного давления. Для повышения точности измерений рекомендовано использовать различные зонды давления с учётом диапазонов измеряемых величин.

**Ключевые слова:** аэродинамика, эффективность, циклон, экспериментальная установка, конструктивные параметры.

**Введение.** В предыдущих исследованиях авторов экспериментальные исследования проводились на малоразмерных макетах циклонных аппаратов [1]. Первый вариант лабораторной установки для исследования центробежных пылеуловителей с точки зрения производства сравнительных испытаний и достоверности измерений оказался неприемлемым [2]. Малые размеры центробежных аппаратов, с одной стороны, частично приводили к некорректности измерений, к невыполнению требований нормативно-технической документации к измерениям, а с

UDC 621.928.93:621.3.088:628.511  
DOI 10.23947/2541-9129-2017-4-120-136

## SCIENTIFICALLY-GROUNDED REQUIREMENTS FOR COMPARATIVE PARALLEL TESTS OF CENTRIFUGAL DUSTER COLLECTORS

*Y. I. Bulygin, N. N. Azimova, I. S. Kuptsova*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)

[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)

[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)

The article provides the consistency check and accuracy evaluation of measurement of aerodynamic parameters of centrifugal dust collectors. It analyzes the requirements of normative-technical documentation to schemes and methods for conducting aerodynamic tests and then selects the most optimal one. The paper presents errors calculations of pressure, velocity and air-flow measurements by the combined pressure inlet in combination with a differential manometer. It also verifies the accuracy of the experimental determination of the unknown parameters on the example of the total pressure. To improve the accuracy of measurement it is recommended to use different pressure probes, taking into account the measurement ranges.

**Keywords:** aerodynamics, efficiency, cyclone, experimental facilities, design parameters.

**Introduction.** Previously the authors have conducted experimental studies on small-size models of cyclone devices [1]. The first version of the laboratory facility for studying centrifugal dust collectors was unacceptable from the point of view of comparative testing, and the reliability of measurements [2]. The small size of the centrifugal apparatus, on the one hand, partially led to the incorrectness of measurements, to failing to comply with the requirements of normative-technical documentation to measurements, and on the other

другой стороны, работа на установке требовала большой трудоёмкости монтажных работ, так как сборно-разъёмные соединения при переустановке циклонов приводили к проблеме обеспечения требуемой герметичности конструкции.

**Целью работы** является проверка достоверности и оценка точности измеряемых величин расхода газового потока, скорости и давлений в центробежных пылеуловителях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1. Провести анализ требований нормативно-технической документации к схемам и методам проведения аэродинамических испытаний и выбрать наиболее оптимальную с точки зрения минимизации величин погрешностей измерения параметров;
2. Описать метрологические характеристики измерительных приборов, используемых при аэродинамических испытаниях;
3. Представить результаты экспериментальных исследований с целью определения реальных диапазонов измеряемых величин;
4. Выполнить расчёты погрешностей измерения давлений, скорости и расхода воздуха комбинированным приёмником давления в сочетании с дифференциальным манометром;
5. Выполнить проверку достоверности экспериментального определения искомых параметров на примере полного давления;
6. Сформулировать требования к точности применяемых методов определения аэродинамических параметров и средствам измерения.

**Анализ требований нормативно-технической документации к схемам и методам проведения аэродинамических испытаний. Требования к схемам проведения аэродинамических испытаний**

Для измерения статического, динамического, полного давлений, а также скорости движения воздуха в воздуховодах экспериментальной установки должны быть выбраны участки, в которых мерные сечения для проведения измерений находятся на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров  $D_h$  за местом возму-

hand, the work on the facility required a great complexity of construction works, as relocatable connections led to the problem of ensuring the required tightness of the design at cyclones resetting.

**The aim of this work** is the reliability and accuracy assessment of the measured values of the flow rate of gas flow, speed and pressure in centrifugal dust collectors.

To achieve this goal it is necessary to solve a number of problems:

1. To analyze the requirements of normative-technical documentation, schemes and methods of conducting aerodynamic tests and to choose the most optimal from the point of view of minimizing the values of errors of parameters measurement;
2. To describe the metrological characteristics of measuring instruments used in aerodynamic tests;
3. To present the results of experimental studies to determine the actual ranges of the measured values;
4. To perform calculations of errors in measurement of pressure, speed and air flow by a combined pressure receiver together with differential pressure manometer;
5. To validate the reliability of the experimental determination of the desired parameters on the example of full pressure;
6. To formulate the requirements for the accuracy of the applied methods for determination of aerodynamic parameters and means of measurement.

**The analysis of the requirements of normative-technical documentation to procedures and methods for conducting aerodynamic tests. The requirements for aerodynamic tests procedures**

To measure static, dynamic, full pressure and air velocity in the air-duct of the experimental facility one must choose the parts, in which measuring sections for measurements are located at distances of no less than six hydraulic diameters  $D_h$  from the point of flow disturbance (bends, dampers, diaphragms, etc.) and at least

щения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее трёх гидравлических диаметров перед ним [4, 5] (рис. 1). На действующей установке «Циклон» участок перед местом возмущения потока выбран в соответствии с [4, 5] и составляет  $6,5D_h$ , что больше  $3D_h$ .

В зависимости от формы и размера мерного сечения для проведения эксперимента необходимо определить координаты точек измерений давлений и скоростей (рис. 2), а также количество точек в соответствии с [4, 5]. Выбрано 7 точек измерения, что влияет на последующие расчёты погрешностей. Для научных исследований можно выбрать значительно большее число измерительных точек, чем при испытаниях, что влияет на точность измерений [6].

three hydraulic diameters in front of it [4, 5] (Fig. 1). On a working facility "Cyclone" a part before the point of flow disturbance is selected in accordance with [4, 5] and is  $D_h 6.5$ , which is more than  $3D_h$ .

Depending on the shape and size of the measuring section for the experiment it is necessary to determine the coordinates of measurement points of pressures and velocities (Fig. 2) and the number of points in accordance with [4, 5]. 7 measurement points were selected, which affects the subsequent calculations of the errors. For research, one can choose a much larger number of measurement points than in the test, which affects the accuracy of measurements [6].

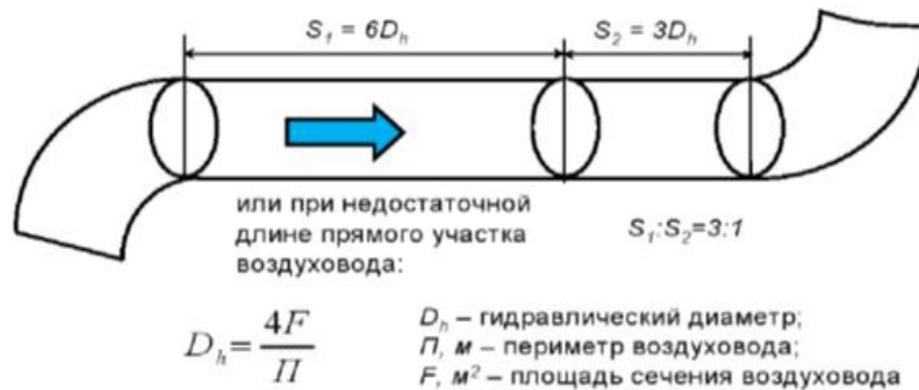
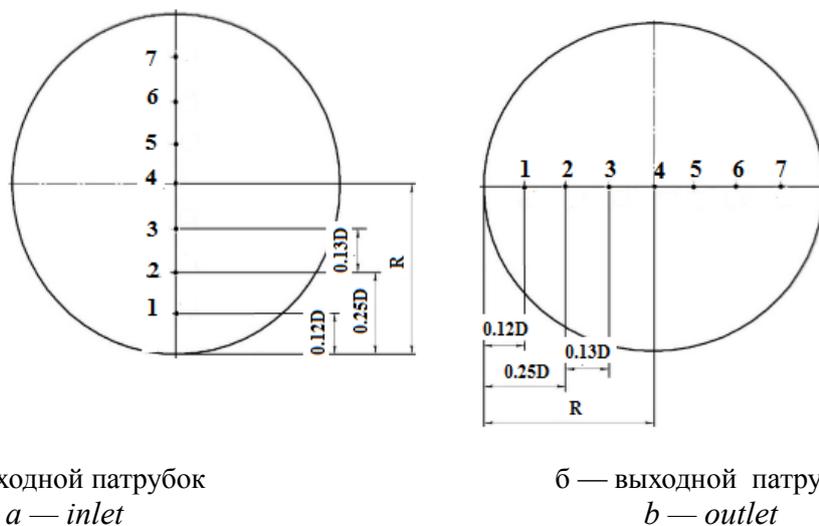


Рис. 1. Метод выбора точек измерений

Fig. 1. The method for selecting measuring points



а — входной патрубок  
a — inlet

б — выходной патрубок  
b — outlet

Рис. 2. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей в мерных сечениях циклонов

Fig. 2. The scheme of location of measurement points of pressures and velocities in measuring cross-sections of cyclones

Для выбора средств измерений необходимо знать метрологические свойства приборов, а также внешние условия, влияющие на результат измерений. Эти свойства описываются путем указания номинальных значений тех или иных параметров — характеристик и допускаемых отклонений от них. Специфической метрологической характеристикой средств измерений является их погрешность. Для оценки погрешностей результатов проводимых измерений необходимы сведения о погрешностях средств измерений, установленных паспортными данными используемого оборудования.

#### **Краткие метрологические характеристики измерительных приборов, используемых при аэродинамических испытаниях. Пневмометрическая трубка «ПИТО»**

Для измерения полного, статического и динамического давлений потока используется трубка «ПИТО» (рис. 3). Трубка Пито позволяет измерять скорость газового (воздушного) потока в диапазоне от 4–21 м/с. Средний коэффициент преобразования динамического (скоростного) давления во всем диапазоне скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито составляет 0,95–1,05. Предел допускаемой относительной погрешности определения коэффициента преобразования для всего диапазона скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито не превышает  $\pm 3\%$  [7]. Проверка соотношения диаметра трубки Пито и диаметра мерного сечения ( $\frac{8}{200} \cdot 100\% = 4\%$ ), показала, что требования [4, 5] выполняются.

Однако, при измерении скоростей от 1,5 до 4 м/с, которые наблюдаются у нас при исследованиях циклонов на минимальных расходах воздуха (516 м<sup>3</sup>/ч, рис. 4), погрешность не соответствует заданной и может возрастать.

#### **Дифференциальный манометр Testo 521-1**

Основные аэродинамические параметры центробежных пылеуловителей определялись при использовании дифференциального манометра Testo 521-1 со встроенными сенсорами давления

To select the measuring instruments one needs to know the metrological properties of the instrument, as well as external conditions affecting the measurement result. These properties are described by specifying the nominal values of certain parameters — characteristics and permissible deviations from them. Specific metrological characteristic of measuring instruments is their accuracy. For error evaluation of the results of measurements one needs to know the information about the errors of measuring instruments specified in the used equipment specifications.

#### **Brief metrological characteristics of measuring instruments used in aerodynamic tests. Pneumometric tube "PITOT"**

For measuring total static and dynamic pressures of the flow, the tube "PITOT" is used (Fig. 3). Pitot tube allows measuring the velocity of gas (air) flow in the range of 4-21 m/s. The average conversion factor of the dynamic (velocity) pressure in the entire speed range for the pressure differential Pitot tube is 0.95 - 1.05. The limit of permissible relative error of determining the rate of conversion for the entire velocity range for pressure differential Pitot tube does not exceed  $\pm 3\%$  [7]. Ratio examination of the diameter of the Pitot tube and the diameter of the measuring section ( $8/200 \cdot 100\% = 4\%$ ), showed that the requirements [4, 5] are met.

However, when measuring velocities from 1.5 to 4 m/s, which we have observed in studies of cyclones on the minimum air flow (516 m<sup>3</sup>/h, Fig. 4), the error does not correspond to the specified one and can increase.

#### **Differential pressure gauge Testo 521-1**

The main aerodynamic parameters of centrifugal dust collectors were determined using differential pressure gauge Testo 521-1 with integrated pressure sensors (Fig. 3). The range of pres-

(рис. 3). Диапазон измерения давления в потоке составляет от 0 до 100 гПа с погрешностью 0,2 % от полной шкалы. Для измерения скорости потока в диапазоне от 5 до 100 м/с применяются трубки Пито. Абсолютная погрешность при 5 м/с составляет 0,32 м/с, при 20 м/с — 0,09 м/с, при 50 м/с — 0,05 м/с. Для проведения точных измерений скорости потока в диапазоне от 1 до 12 м/с необходимо проводить измерения с использованием внешнего зонда давления 100 Па. Зависимость от расположения полностью устранена благодаря двойной мембране. Изменение месторасположения зонда не влияет на результаты измерений: погрешность при 1 м/с — 0,09 м/с; при 5–8 м/с — 0,03 м/с [8].

sure measurement flow ranges from 0 to 100 hPa with the accuracy 0.2% of full scale. To measure the flow rate in the range from 5 to 100 m/s Pitot tubes are used. The absolute error at 5 m/s is 0.32 m/s, at 20 m/s - 0.09 m/s at 50 m/s — 0.05 m/s. For accurate measurements of the flow rate in the range from 1 to 12 m/s it is necessary to conduct measurements using external pressure probe 100 Pa. The dependence on location is completely eliminated by a double membrane. The change of location of the probe does not affect the measurement results: accuracy at 1 m/s — 0.09 m/s; at 5-8 m/s - 0.03 m/s [8].



Рис. 3. Используемые средства измерений аэродинамических параметров пылеуловителей

*Fig. 3. The used means of measurement of aerodynamic parameters of dust collector*

Для удобства и экономии времени проведения экспериментов в прибор заносятся следующие данные: время, промежуток времени на один замер, количество измерений, температура, относительная влажность, абсолютное давление, поперечное сечение воздуховода, коэффициент компенсации, коэффициент трубки Пито и запускается автоматическое сохранение данных при проведении замеров. Память прибора позволяет одновременно сохранить 25 000 измерений. При необходимости полученные результаты могут быть переданы сразу в электронную вычислительную систему или на принтер.

#### **Дифференциальный манометр ДМЦ-01М**

Для измерения давления, разрежения и разности давлений газов, для определения скорости и расхода газопылевых и воздушных потоков с применением трубок напорных модификаций НИИОГАЗ и Пито использовался дифференциальный манометр ДМЦ-01М (по ГОСТ 17.2.4.06–90 и ГОСТ 8.361–79) (рис. 3). Прибор применяется для технологического и экологического контроля выбросов в различных производствах, а также при контроле вентиляции производственных помещений, аэродинамических исследованиях. Микропроцессор, который встроен в прибор, обеспечивает установку нуля, измерение и накопление данных по сечению газотока (профиль скоростей в количестве равном не менее 256 точкам). А также позволяет провести расчет локальных и средних скоростей, расхода газа с коррекцией на температуру потока и по измеренным точкам [9].

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Полученные при экспериментах результаты были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 4, 5).

На рис. 4 и 5 показаны результаты измерений скоростей воздушного потока во входном патрубке аппарата «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора и полные давления, измеренные дифференциальными манометрами ДМЦ-01М и Testo-521-1.

For convenience and time-saving of the experiments the following data is entered in the device: time, time interval for one measurement, number of measurements, temperature, relative humidity, absolute pressure, cross section of the duct, compensation coefficient, the coefficient of Pitot tube and automatic saving of data when conducting measurements starts. The memory of the device allows you to simultaneously save 25 000 measurements. If necessary, the results can be transferred immediately into an electronic computer system or printer.

#### **Differential pressure gauge DMTS-01M**

To measure pressure, vacuum and differential pressure of gases, to determine the velocity and flow of gas and dust and air streams with the use of pressure tubes of NIIOGAZ and Pitot modifications differential pressure gauge DMTS-01M was used (GOST 17.2.4.06–90 and GOST 8.361–79) (Fig. 3). The instrument is used for processing and environmental control over emissions in different industries, and control over the production area ventilation, aerodynamic research. A microprocessor, which is integrated into the device, provides a zero setting, measurement and gathering of data on the cross section of the duct (velocity profiles for a quantity of at least 256 points). It also allows calculating local and average velocities, gas flow with corrections for temperature and flow at the measured points [9].

#### **The results of experimental studies**

The obtained experimental results have been processed and presented in graphs (Fig. 4, 5).

Fig. 4 and 5 show the measurements results of air flow velocity in the inlet pipe of the device "TSOK-200-300" in different modes of operation of the fan and the total pressure measured by differential pressure gauges DMTS-01M and Testo-521-1.

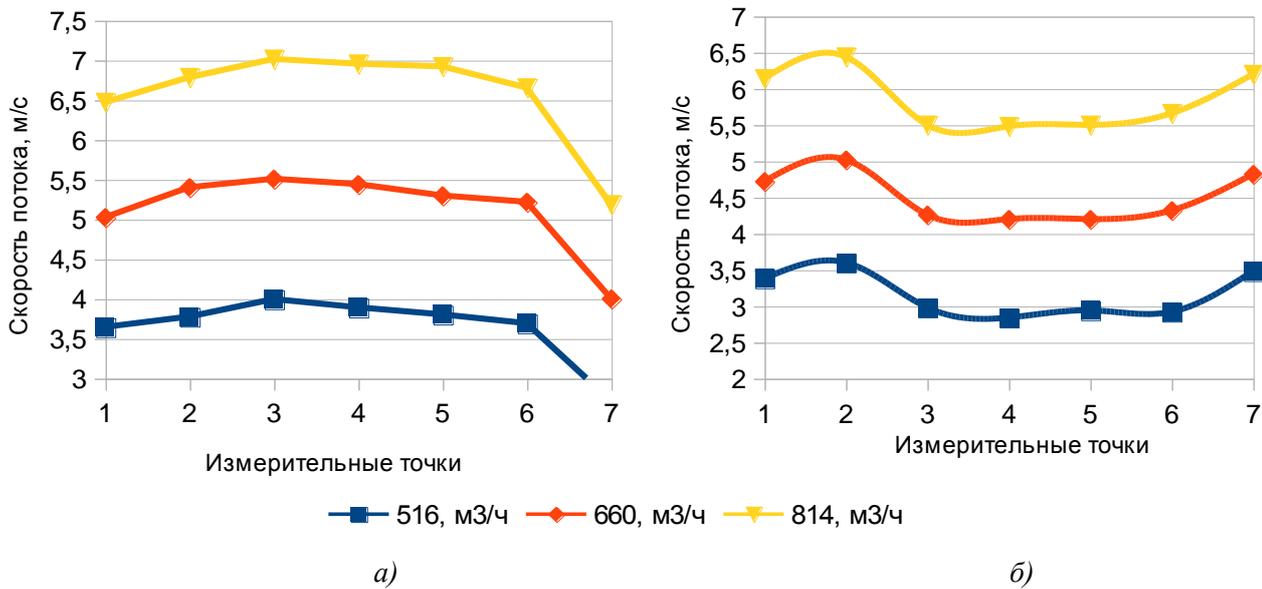


Рис. 4. Скорость воздушного потока «ЦОК-200-300»:  
а — Testo-521-1; б — ДМЦ-01М

Fig. 4. Air flow rate TSOK-200-300"  
a — Testo-521-1; b — DMTS-01M

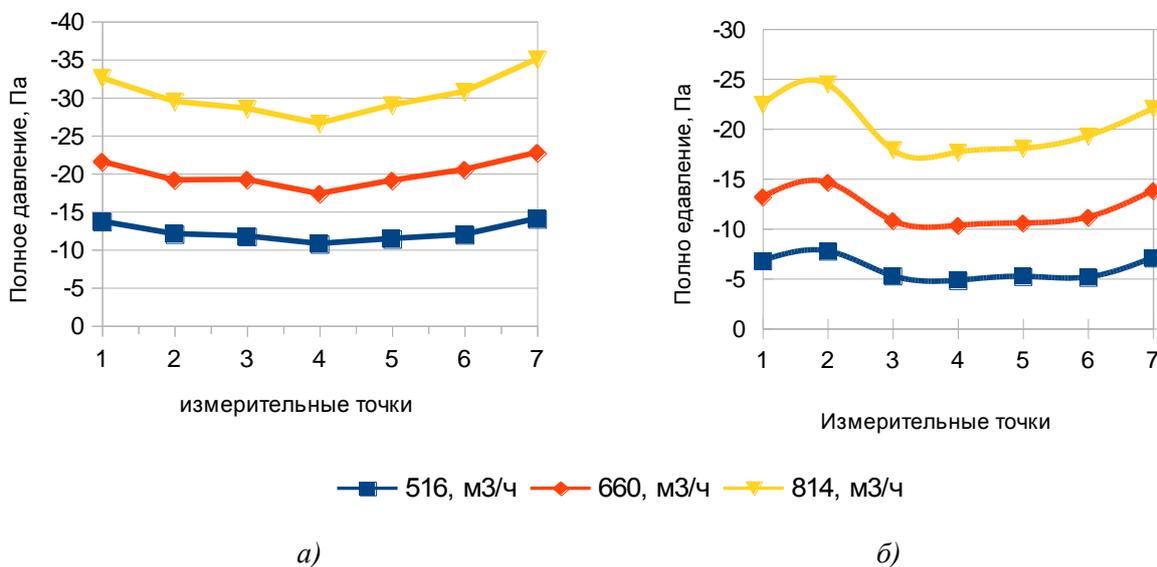


Рис. 5. Полное давление воздушного потока «ЦОК-200-300»:  
а — Testo-521-1; б — ДМЦ-01М

Fig. 5. Full pressure of air flow TSOK-200-300"  
a — Testo-521-1; b — DMTS-01M

Как следует из результатов измерений, данные, полученные различными дифференциальными манометрами ДМЦ-01М и Testo-521, отличаются незначительно, что позволяет их использовать при проведении аэродинамических испытаний.

На погрешность определения параметров измеряемых величин сильно влияет класс точности используемых приборов, а также важное значение имеет диапазон измеряемых величин по отношению к длине шкалы прибора, что иллюстрируется таблицей 1 [4, 5].

As follows from the results of the measurements, the data obtained by different differential pressure gauges DMTS-01M and Testo 521, differ insignificantly, which allows them to be used during aerodynamic tests.

The accuracy of determining of the parameters of the measured values is strongly influenced by the accuracy class of the instrument used, as well as the range of the measured values in relation to the length scale of the instrument, as table 1 illustrates [4, 5].

Таблица 1  
Table 1

Среднеквадратичные отклонения результатов измерения  
*The mean-square deviation of the measurement results*

Показания приборов, доли длины шкалы <i>Instrument readings, fractions of the scale length</i>	$\sigma_B, \sigma_t, \sigma_{P_a}$ для приборов класса точности $\sigma_B, \sigma_t, \sigma_{P_a}$ for instruments of accuracy class			
	1	0,5	0,2	0,1
1	±0.5	±0.25	±0.1	±0.05
0.75	±0.7	±0.35	±0.14	±0.07
0.5	±1.0	±0.50	±0.20	±0.10
0.25	±2.0	±1.00	±0.40	±0.20
0.1	±5.0	±2.50	±1.0	±0.5
0.05	±10.0	±5.00	±2.00	±1.00
0.01	±50.0	±25.00	±10.00	±5.00

Так, в работе [10] авторами экспериментально установлено, что полные давления на выходных патрубках циклонов достигают — 1000 Па, а на входных патрубках не превышают — 35 Па в зависимости от режима работы установки. Динамические давления на входе и выходе не превышают — 40 Па, а скорость воздушного потока во входных патрубках изменяется от 2,5 до 7,5 м/с. Вместе с тем прибор Testo-521-1, которым проводились измерения, снабжён зондом на 10000 Па, что является источником погрешности измерений на малых долях длины измерительной шкалы [10]. Оценим это влияние в последующих расчётах погрешностей.

**Расчёт погрешностей измерения давлений, скорости и расхода воздуха комбинированным приёмником давления в сочета-**

So, in the work [10], the authors experimentally established that the total pressure at the outlet of the cyclones reach 1000 PA, and the inlet does not exceed — 35 PA depending on the operation mode. The dynamic pressure at the inlet and outlet do not exceed — 40 PA, and air velocity in the inlet changes from 2.5 to 7.5 m/s. However, the instrument Testo 521-1, which was used for measurements, is provided with a probe at 10,000 PA, which is a source of measurement error at small distances of the measuring scale [10]. Let us assess this influence in subsequent calculations of the errors.

**The calculation of measurement errors of pressure, speed and air flow by a combined pressure receiver with differential pressure**

**нии с дифференциальным манометром**

**Расход воздуха.** Для определения относительной погрешности определения расхода воздуха в процентах используется следующая формула (1):

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\varphi) \quad (1)$$

где  $\sigma_L$  — среднеквадратичная относительная погрешность, обусловленная неточностью измерений в процессе испытаний;  $\delta_\varphi$  — предельная относительная погрешность определения расхода воздуха, связанная с неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении; величины  $\delta_\varphi$  даны в табл. 1 [4].

Величина  $\sigma_L$  представляется в виде (2):

$$\sigma_L = \sqrt{4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2} \quad (2)$$

где  $\sigma_D$  — среднеквадратичная погрешность определения размеров мерного сечения, зависящая от диаметра воздухопровода  $D_h$ ; гидравлический диаметр определяется по формуле [11]:

$$D_h = \frac{4F}{\Pi}, \quad F = \pi R^2 = 3,14 \cdot (0,1)^2 = 0,0314, \\ \Pi = 2\pi R = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 0,628 \cdot D_h \\ = \frac{4 \cdot 0,0314}{0,628} = 0,2 \text{ м}$$

где  $F$ , м<sup>2</sup> и  $\Pi$ , м, соответственно, площадь и периметр сечения. При  $100 \text{ мм} \leq D_h \leq 300 \text{ мм}$  величина  $\sigma_D = \pm 3 \%$  (при  $D_h > 300 \text{ мм}$   $\sigma_D = \pm 2 \%$ ).

В зависимости от показаний микроманометра, барометра и термометра в долях длины их шкал, среднеквадратические отклонения результатов измерения динамического давления и ( $\sigma_p$ ), атмосферного давления ( $\sigma_B$ ) и температуры газов ( $\sigma_t$ ) составят:  $\sigma_p = \pm 1,0 \%$ ,  $\sigma_B = \pm 0,1\%$  и  $\sigma_t = \pm 0,2\%$ . При этом предельная относительная погрешность измерения расхода воздуха будет:

$$\sigma_L = \sqrt{4 \cdot \sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2} = \sqrt{4 \cdot 3^2 + \frac{1}{4} \cdot (0,1)^2 + \frac{1}{4} \cdot (0,2)^2 + \frac{1}{4} \cdot 1^2} = 6,02\%$$

Предельная относительная погрешность измерения расхода воздуха составит:

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\varphi) = 26,02\% + 2\% = 14,04\%$$

Уменьшить или увеличить предельную от-

**gauge**

**Airflow rate.** To determine the relative error of determination of air flow rates in percent the following formula (1) is used:

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\varphi) \quad (1)$$

where  $\sigma_L$  is the mean square relative error caused by measurement uncertainty in the testing process;  $\delta_\varphi$  — the maximum relative error in determining air flow, which is connected with the uneven distribution of velocity in a measuring cross section; the values of  $\delta_\varphi$  are given in table. 1 [4].

The value of  $\sigma_L$  is represented in the form (2):

$$\sigma_L = \sqrt{4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2} \quad (2)$$

where  $\sigma_D$  is the mean square error of determination of the measuring section size, depending on the diameter of the duct  $D_h$ ; the hydraulic diameter is determined by the formula [11]:

$$D_h = \frac{4F}{\Pi}, \quad F = \pi R^2 = 3,14 \cdot (0,1)^2 = 0,0314, \\ \Pi = 2\pi R = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 0,628 \cdot D_h \\ = \frac{4 \cdot 0,0314}{0,628} = 0,2 \text{ м}$$

where  $F$ , m<sup>2</sup> and  $\Pi$ , m are, respectively, the area and the perimeter of the cross section. When  $100 \text{ мм} \leq D_h \leq 300 \text{ мм}$ , the value of  $\sigma_D = \pm 3 \%$  (at  $D_h > 300 \text{ мм}$   $\sigma_D = \pm 2 \%$ ).

Depending on the readings of the manometer, barometer and thermometer in fractions of the length of their scales, the standard deviation of the measurement results of dynamic pressure and ( $\sigma_p$ ), atmospheric pressure ( $\sigma_B$ ) and gas temperature ( $\sigma_t$ ) will be:  $\sigma_p = \pm 1.0 \%$ ,  $\sigma_B = \pm 0.1\%$  и  $\sigma_t = \pm 0.2\%$ . The maximum relative error of flow measurement is:

The maximum relative measurement error of the air flow will be:

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\varphi) = 26,02\% + 2\% = 14,04\%$$

To increase or decrease the maximum relative

носительную погрешность измерений можно в зависимости от класса точности приборов. Например, используя прибор Testo 521-1 с зондами от 100 Па до 10 000 Па, можно получить  $\sigma_p$  от 2% до 20%. Тогда погрешность измерения расхода может измениться до:

$$\delta_L = 2 \sqrt{4 \cdot \sigma_B^2 + \frac{1}{4} \sigma_t^2 + \frac{1}{4} \sigma_p^2} = 2 \sqrt{4 \cdot 3^2 + \frac{1}{4} \cdot (0,1)^2 + \frac{1}{4} \cdot (0,2)^2 + \frac{1}{4} \cdot 10^2 + 2} = 17,63\%.$$

Для расчета относительного среднеквадратичного отклонения скорости в  $i$ -й точке измерений используется следующая формула (3):

$$\frac{\sigma_{vi}}{v_i} = \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_{PД}}{PД} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_{P\alpha}}{P\alpha} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_t}{t} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_{KT}}{K_T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\varphi}{v_i} \right)^2} \quad (3)$$

Погрешность градуировки напорной трубки, определенная в результате ее аттестации, составляет  $\pm 2\%$  в соответствии с разделом 5 [3]  $\frac{\sigma_{KT}}{K_T} = 0,01$ .

Относительные среднеквадратичные отклонения показаний манометра, термометра и барометра класса  $\pm 0,2$  в соответствующих частях диапазона измерений составляют:

$$\frac{\sigma_{P_0}}{P_0} = \frac{\pm 1}{100} = \pm 0,001, \quad \frac{\sigma_{P_a}}{P_a} = \frac{\pm 0,1}{100} = \pm 0,001, \quad \frac{\sigma_t}{t} = \frac{\pm 0,2}{50} = \pm 0,004.$$

От площади измерительного сечения и площади сечения наконечника напорной трубки ( $S_{TP}$ ), зависит погрешность загрузки измерительного сечения напорными трубками. Т.к.  $\frac{S_{CT}}{S} \cdot 100\% < 1\%$ , то  $\frac{\sigma_b}{v_i} = 0,05$ .

Для того чтобы уменьшить погрешность от угла наклона оси рабочей напорной трубки к оси потока, необходимо повернуть и зафиксировать трубку так, чтобы показания микроманометра были максимальны.

В общем случае  $\varphi \leq 5^\circ$ , тогда  $\frac{\sigma_{vi}}{v_i} = 0,02$ .

Относительное среднеквадратическое отклонение скорости составит:

$$\frac{\sigma_{vi}}{v_i} = \sqrt{\frac{1}{4} (0,001)^2 + \frac{1}{4} (0,001)^2 + \frac{1}{4} (0,004)^2 + \frac{1}{4} (0,01)^2 + (0,02)^2 + (0,005)^2} = 0,011\%.$$

### **Проверка достоверности экспериментального определения полного давления**

Аэродинамические параметры (скорости, давления) непрерывно меняются за счет формирования в циклонных аппаратах сложных

error of the measurements is possible depending on the accuracy class of the instrument. For example, using an instrument Testo 521-1 with probes from 100 PA to 10,000 PA, it is possible to get  $\sigma_p$  from 2% to 20%. Then the measurement error of the flow rate can change up to:

To calculate the relative standard deviation of the velocity in the  $i$ -th point of the measurements we use the following formula (3):

The error in the calibration of the pressure tube is determined as a result of its certification, it is  $\pm 2\%$  in accordance with section 5 [3]  $\frac{\sigma_{KT}}{K_T} = 0,01$ .

The relative mean-square deviations of the readings of pressure gauge, thermometer and barometer of class  $\pm 0,2$  in the relevant parts of the measuring range are:

The accuracy of the measuring section load by pressure tubes depends on the area of the measuring section and the sectional area of the tip of the pressure tube ( $S_{TP}$ ), as Т.к.  $\frac{S_{CT}}{S} \cdot 100\% < 1\%$ , то  $\frac{\sigma_b}{v_i} = 0,05$ .

In order to reduce the error from the angle of the axis of the working pressure pipe to the flow axis, it is necessary to rotate and fix the tube so that the indications of the manometer are at a maximum.

In the general case of  $\varphi \leq 5^\circ$ , then  $\frac{\sigma_{vi}}{v_i} = 0,02$ .

The relative mean-square deviation of the velocity will be:

### **Validation of the experimental determination of the total pressure**

Aerodynamic parameters (velocity, pressure) are constantly changing due to the formation of

потоков. Для расчета объема воздушного потока используется формула (4):

$$Q = V \cdot 0,785 \cdot 3600 \cdot D^2 \quad (4)$$

где  $V$  — скорость воздушного потока в (м/с);  $Q$  — объем воздушного потока, проходящего через циклон в зависимости от режима работы вентилятора (м<sup>3</sup>/ч);

Задача измерения состоит не только в нахождении самой величины, но и в определении погрешности измерения, т.е. интервала, в котором вероятнее всего находится истинное значение измеряемой величины.

1. Для измерения заданного физического параметра эксперимент проводится  $n$  раз в одинаковых условиях, результаты заносятся в таблицу.

2. Если в результате измерений появляются значения, которые резко отличаются от остальных измерений, то такие значения как промахи отбрасываются (если после проверки не подтверждаются).

3. При проведении одинаковых измерений вычисляется среднее арифметическое  $\bar{x}$ .

4. Вычисляются квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений  $(\Delta x_i)^2$ .

5. Определяется средняя квадратичная ошибка среднего арифметического.

6. Необходимо задать значение доверительной вероятности  $\alpha$ . В лабораториях практикума  $\alpha=0,95$ .

7. Находится коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n}$  для заданной доверительной вероятности  $\alpha$  и числа произведенных измерений.

8. Записывается доверительный интервал.

Построим дискретный вариационный ряд.

-37	-36	-34	-34	-34	-34	-34
-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33
-33	-32	-32	-32	-32	-32	-32
-32	-32	-32	-31	-31	-31	-31
-31	-31	-30	-30	-29		

Проранжируем ряд. Для этого сортируем его значения по возрастанию.

complex flows in cyclonic devices. To calculate the air flow volume formula (4) is used:

$$Q = V \cdot 0,785 \cdot 3600 \cdot D^2, \quad (4)$$

where  $V$  — air velocity in (m/s);  $Q$  is the amount of air flow passing through the cyclone depending on the operating mode of the fan (m<sup>3</sup>/h);

The measurement task consists not only in finding the value, but also in determining the measurement uncertainty, i.e. the interval in which the true value of the measurand is most likely.

1. For measuring a predetermined physical parameter, the experiment is performed  $n$  times under the same conditions and the results are recorded in the table.

2. If as a result of the measurement appear values, which are very different from other measurements, these values are discarded as failures (if they are not confirmed).

3. When conducting the same measurements, the arithmetic mean is calculated  $\bar{x}$ .

4. The squares of the absolute errors of the individual measurements  $(\Delta x_i)^2$  are calculated.

5. The average quadratic error of the arithmetic mean is calculated.

6. It is important to specify a value for confidence probability  $\alpha$ . In the laboratories of the workshop,  $\alpha=0.95$ .

7. Student coefficient  $t_{\alpha,n}$  for a given confidence probability  $\alpha$  and the number of the measurements is calculated.

8. Confidence interval is written.

Let us build a discrete variational series.

-37	-36	-34	-34	-34	-34	-34
-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33
-33	-32	-32	-32	-32	-32	-32
-32	-32	-32	-31	-31	-31	-31
-31	-31	-30	-30	-29		

Let us range the series row. To do this, we sort its values in an ascending order.

Таблица 2  
Table 2

Расчет показателей  
*The calculation of the indicators*

x	$ x - x_{cp} $	$(x - x_{cp})^2$
-37	4,47	19,95
-36	3,47	12,02
-34	1,47	2,15
-34	1,47	2,15
-34	1,47	2,15
....	.....	.....
-976	41,07	87,47

Для того чтобы оценить ряд распределения найдем следующие показатели:

Показатели центра распределения.

*Простая средняя арифметическая*

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{-976}{30} = -32,53. \quad (5)$$

Значение ряда -32,00 встречается больше всех — 8 раз. Следовательно, мода равна  $x = 32$ .

*Абсолютные показатели вариации*

Разность между максимальным и минимальным значениями признака первичного ряда называется размахом вариации и определяется по следующей формуле:

$$R = x_{\max} - x_{\min} = -29,00 - (-37,00) = 8.$$

Для того, чтобы учесть различия всех единиц исследуемой совокупности, необходимо вычислить — Среднее линейное отклонение:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{41,067}{30} = 1,37. \quad (6)$$

Расчет показал, что каждое значение ряда отличается от другого в среднем на 1,37.

Мера разброса около ее среднего значения (мера рассеивания, т.е. отклонения от среднего) характеризуется такой величиной как дисперсия, которая вычисляется по следующей формуле:

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} = \frac{87,467}{30} = 2,92 \quad (7)$$

In order to evaluate distribution series we find the following figures:

Indicators of the distribution center.

*A simple arithmetic average*

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{-976}{30} = -32,53. \quad (5)$$

The value of the number -32.00 occurs more than 8 times. Therefore, the mode is equal  $x = 32$ .

*Absolute measure of variation*

The difference between the maximum and the minimum characteristic values of the primary range is called the range of variation and is defined by the following formula:

$$R = x_{\max} - x_{\min} = -29,00 - (-37,00) = 8.$$

In order to account for differences of all studied units together, it is necessary to calculate the average linear deviation:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{41,067}{30} = 1,37. \quad (6)$$

The calculation showed that each value of the series differs from another in average of 1.37.

The measure of the spread around its mean value (measure of dispersion, i.e. the deviation from the mean) is characterized by such a magnitude as dispersion, which is calculated by the following formula:

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} = \frac{87,467}{30} = 2,92 \quad (7)$$

Вычислим исправленную дисперсию:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{87,467}{29} = 3,02 \quad (8)$$

Среднее квадратичное отклонение.

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{2,92} = 1,71. \quad (9)$$

Из полученных вычислений видно, что каждое значение ряда отличается от среднего значения  $-32,53$  в среднем на  $1,71$ .

Оценка среднеквадратичного отклонения.

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{3,02} = 1,74. \quad (10)$$

Относительные показатели вариации — это коэффициент осцилляции, линейный коэффициент вариации, относительное линейное отклонение.

Мера относительного разброса значений совокупности показывающая, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс, называется коэффициентом вариации. Данный коэффициент вычисляется по следующей формуле:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1,71}{-32,53} 100\% = 5,25\%. \quad (11)$$

Так как полученное значение коэффициента  $v \leq 30\%$ , то совокупность однородна, а вариация слабая. Полученным результатам можно доверять. Доля усредненного значения признака абсолютных отклонений от средней величины характеризуется линейным коэффициентом вариации или относительным линейным отклонением:

$$K_d = \frac{d}{\bar{x}} = \frac{1,37}{-32,53} 100\% = -4,21\%. \quad (12)$$

Относительная колеблемость крайних значений признака вокруг средней выражается коэффициентом осцилляции:

$$K_r = \frac{R}{\bar{x}} = \frac{8}{-32,53} 100\% = -24,59\%. \quad (13)$$

Интервальное оценивание центра генеральной совокупности.

Определение доверительного интервал для генерального среднего осуществляется по следующей формуле:

$$\left( \bar{x} - t_{kp} \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{kp} \frac{s}{\sqrt{n}} \right), \quad (14)$$

где  $t_{kp}$  значение по таблице распределения Стьюдента.

По таблице Стьюдента находим:

Let us calculate the corrected variance:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{87,467}{29} = 3,02 \quad (8)$$

Mean-square deviation.

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{2,92} = 1,71. \quad (9)$$

The resulting calculation shows that each series value differs from the average  $-32,53$ ,  $1,71$  in average.

Evaluation of the standard deviation.

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{3,02} = 1,74. \quad (10)$$

Relative indices of variation is the coefficient of oscillation, the linear variation coefficient, relative linear deviation.

A measure of the relative dispersion of the values together showing what proportion of the average value of this quantity is its average dispersion and is called coefficient of variation. This ratio is calculated by the following formula:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1,71}{-32,53} 100\% = 5,25\%. \quad (11)$$

Since the obtained value of the coefficient  $v \leq 30\%$ , then the set is homogeneous, and the variation is slight. The obtained results can be trusted. The share of the average characteristic value of the absolute deviations from the mean is characterized by the linear coefficient of variation or relative linear deviation:

$$K_d = \frac{d}{\bar{x}} = \frac{1,37}{-32,53} 100\% = -4,21\%. \quad (12)$$

The relative variability of extreme values around the mean is expressed as a coefficient of oscillations:

$$K_r = \frac{R}{\bar{x}} = \frac{8}{-32,53} 100\% = -24,59\%. \quad (13)$$

Interval estimation of the center of the main entity.

Determination of confidence interval for the average is carried out according to the following formula:

$$\left( \bar{x} - t_{kp} \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{kp} \frac{s}{\sqrt{n}} \right), \quad (14)$$

where  $t_{kp}$  is the value from table of Student's distribution.

With the use of Student table we find:

$$T_{\text{табл}}(n-1; \alpha/2) = T_{\text{табл}}(29; 0,025) = 2,045.$$

Для определения стандартной ошибки выборки для среднего используется следующая формула:

$$s_c = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{d}{100}} = \frac{1,74}{\sqrt{30}} \sqrt{1 - \frac{30}{100}} = 0,2653. \quad (15)$$

Полученное значение указывает, на сколько среднее выборки  $-32,533$  отличается от среднего генеральной совокупности.

Для определения предельной ошибки выборки используется следующая формула:

$$\varepsilon = t_{\text{кр}} s_c = 2,045 \times 0,27 = 0,54.$$

Доверительный интервал:

$$(-32,53 - 0,54; -32,53 + 0,54) = (-33,08; -31,99).$$

Проанализировав полученные значения с вероятностью 0,95 можно утверждать, что среднее значение при выборке большего объема не выйдет за пределы найденного интервала.

#### Выводы

1. Идея данной работы состояла в поиске по измерительным каналам источников погрешности. Их оказалось много, они различного характера — методические, статистические, измерительные и зависят от диапазона измеряемых величин по отношению к длине шкалы выбранного измерительного средства, а также от его класса точности.

2. Расчёт погрешностей измерения расхода воздуха комбинированным приёмником давления в сочетании с дифференциальным манометром показывает, что при правильно подобранном зонде давления к прибору Testo 521 (Германия) можно снизить погрешность и она не превысит 14,04%.

3. Учитывая, что измеряемые полные давления на установке при работе циклона на разряжении на входе и выходе отличаются на порядок — 100 Па и — 1000 Па, а прибор имеет встроенный зонд давлений на 10 000 Па, для недопущения возрастания погрешности с 0,2% до 20% необходимо рекомендовать правильный подбор зондов давления для выходных и входных патрубков циклонов.

4. Динамические давления рекомендуется

$$T_{\text{табл}}(n-1; \alpha/2) = T_{\text{табл}}(29; 0,025) = 2,045.$$

To define a standard sampling error for the average we use the following formula:

The resulting value indicates how sample average  $-32,533$  differs from the main entity.

To determine the limit of sampling error we use the following formula:

$$\varepsilon = t_{\text{кр}} s_c = 2,045 \times 0,27 = 0,54.$$

Confidence interval:

$$(-32,53 - 0,54; -32,53 + 0,54) = (-33,08; -31,99).$$

After analyzing the values obtained with a probability of 0.95 it can be argued that the average value in the sample of a larger volume will not go beyond the found interval.

#### Conclusion

1. The idea of this work was to search for the measuring channels of the sources of error. They turned out to be numerous, they are of different nature — methodological, statistical, measurement and depend on the range of measured values relative to the length scale of the selected measuring tools, as well as its accuracy class.

2. Calculation of errors in measurement of air flow by a combined pressure receiver together with differential pressure gauge shows that with correctly selected pressure probe to the instrument Testo 521 (Germany) it is possible to reduce the error and it will not exceed to 14.04%.

3. Given that the measured total pressure on the facility during the operation of cyclone into the vacuum on the inlet and outlet are different on  $f - 100$  PA and  $1000$  PA, and the device has a built-in probe pressure of  $10\ 000$  PA, to prevent the increase of error from 0.2% to 20% it is needed to recommend the correct selection of pressure sensors for outlet and inlet pipes of the cyclones.

4. Dynamic pressure is recommended to be measured by the probe  $100$  PA or  $250$  PA, and

измерять зондами на 100 Па или 250 Па, а полные давления на выходе установки зондом на 100гПа. Приборная линейка фирмы Testo (Германия) вполне позволяет это сделать.

### Библиографический список

1. B.Ch. Meskhi et al., Cyclone with Controlled Parameters and Self-Emptying Bin for Air Dedusting in Machine Building Plants 2014, Applied Mechanics and Materials, 682, 46–52.

2. Пылеулавливатель: патент 2506880 А47Л 9/16/ Б. Ч. Месхи, А. Н. Михайлов, Ю. И. Булыгин, Л. Н. Алексеенко, О. В. Денисов, О. С. Панченко. — № 2012155164/12; заявл. 18.12.12; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5. — 7с.

3. Установка для пылеулавливания: патент 2557741 А47Л 9/16/ Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин, А. Н. Легконогих, Л. Н. Алексеенко, Д. А. Корончик, О. В. Денисов, А. А. Абузаров. — № 2014136881/12; заявл. 11.09.14; опубл. 27.07.15, Бюл. № 21. — 4с.

4. ГОСТ 12.3.018–79. Система стандартов безопасности труда, системы вентиляционные, методы аэродинамических испытаний. / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва: Издательство стандартов, 1979 — 9с.

5. ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва: Издательство стандартов, 1991 — 9с.

6. Булыгин, Ю. И. Экспериментальные установки для исследования влияния формы и

total pressure at the outlet – by the probe 100гПа. The instrument range of the company Testo (Germany) allows it to be done.

### References

1. Meskhi, B.Ch. et al. Cyclone with Controlled Parameters and Self-Emptying Bin for Air Dedusting in Machine Building Plants, 2014, Applied Mechanics and Materials, 682, pp.46-52.

2. Meskhi, B.Ch., Mikhailov, A.N., Bulygin, Y.I., Alekseenko, L.N., Denisov, O.V., Panchenko, O.S. Pyleulavitel', patent: 2506880 А47Л 9/16/ No 2012155164/12. [Dust collector, patent RF 2506880 А47Л 9/16/ No 2012155164/12.] 7 p. (in Russian)

3. Meskhi, B.Ch., Bulygin, I.Y., Legkonogikh, A.N., Alekseenko, L.N., Koronchik, D.A., Denisov, O.V., Abuzyarov, A.A. Ustanovka dlya pyleulavlevaniya [Installation for dust collection: patent 2557741 А47Л 9/16/ No 2014136881/12.] 4p. (in Russian).

4. GOST 12.3.018–79. Sistema standartov bezopasnosti truda, sistemy ventilyatsionnye, metody aerodinamicheskikh ispytaniy. Gosudarstvenny komitet SSSR po standartam. [GOST 12.3.018–79. The system of occupational safety standards, ventilation, methods of aerodynamic testing. State Committee of USSR on standards.] Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1979, 9p. (in Russian).

5. GOST 17.2.4.06–90. Okhrana prirody (SSOP). Atmosfera. Metody opredeleniya skorosti i raskhoda gazopylevykh potokov, otkhodyashchikh ot statsionarnykh istochnikov zagryazneniya. Gosudarstvenny komitet SSSR po standartam. [GOST 17.2.4.06–90. Nature conservation. Atmosphere. Methods for determining the speed and flow of gas and dust flows going away from stationary pollution sources. State Committee of USSR on standards.] Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1991, 9p. (in Russian).

6. Bulygin, Y.I., Vardayan, M.V., Kuptsova, I.S., Azimova N.N. Eksperimental'nye ustanovki dlya issledovaniya vliyaniya formy i geometrii konstruksii tsentrobezhnykh pyleuloviteley nanikh aerodinamicheskie kharakteristiki i effektivnost' pyleulavlivaniya. [Experimental facility to study

геометрии конструкции центробежных пылеуловителей на их аэродинамические характеристики и эффективность пылеулавливания/ Ю. И. Булыгин, М. В. Варданян, И. С. Купцова, Н. Н. Азимова // Новые направления модернизации педагогического образования в формировании здорового образа жизни и безопасности жизнедеятельности: сб. тр. V Регион. науч.-практ. конф. — Краснодар, 2017. — 200 с.

7. Трубки напорные модификации НИОГАЗ и ПИТО: Руководство по эксплуатации/ Российский центр испытаний и сертификации. Москва — 2001. — 11с.

8. Инструкция по эксплуатации Testo 521/526. Москва. — Российское отделение Testo-AG — ООО — Тесто Рус, 2016. — 8с.

9. Руководство по эксплуатации ДМЦ-01М 5.910.000 РЭ. Москва. — 2006, ООО НПО «ЭКО-ИНТЕХ». — 17 с.

10. Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 3. — С. 156–165.

11. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов: Учебное пособие. / А. Г. Ветошкин. — Москва : Инфра-Инженерия, 2016. — 416с.

the effect of shape and geometry of the structure of the centrifugal dust collectors on their aerodynamic characteristics and the efficiency of dust collection.] *Novye napravleniya modernizatsii pedagogicheskogo obrazovaniya v formirovanii zdorovogo obraza zhizni i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: sb. tr. V region. nauch.-prakt. konf.* [New direction of modernization of pedagogical education in the formation of healthy lifestyle and safety: coll. of works. of 5-th region. scientific.-pract. conf.] Krasnodar, 2017, 200 p. (in Russian).

7. *Trubki napornye modifikatsii NIOGAZ i PITO: Rukovodstvo po ekspluatatsii.* Rossiyskiy tsentr ispytaniy i sertifikatsii. [Pressure tubes modification NIOGAS and PITO: Manual. Russian centre of tests and certification.] Moscow, 2001. 11p. (in Russian).

8. *Instruktsiya po ekpluatatsii Testo 521/526.* Moskva. Rossiyskoe otdelenie Testo-AG, Testo Rus. [Instruction manual Testo 521/526. Moscow. Russian subsidiary of Testo AG , Testo Rus.] 2016, 8p. (in Russian).

9. *Rukovodstvo po ekpluatatsii DMTS-01M 5.910.000 RE.* [User manual for DMTS-01M 5.910.000 RE.] Moscow, 2006, NPO "ECO-INTECH", 17 p. (in Russian)

10. Asimova, N.N., Bulygin, Y.I., Kuptsova, I.S. *Sravnitel'ny analiz aerodinamicheskikh kharakteristik pyleuloviteley pri provedenii parallel'nykh sravnitel'nykh ispytaniy.* [Comparative analysis of aerodynamic characteristics of centrifugal dust collectors at parallel comparative tests.] *Vestnik of DSTU*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 156-165 (in Russian).

11. *Vetoshkin, A.G. Inzhenernaya zashchita okruzhayushchey sredy ot vrednykh vybrosov: uchebnoe posobie.* [Engineering protection of environment from harmful emissions: study guide.] Moscow, Infra-Inzheneriya, 2016, 416p. (in Russian).

Поступила в редакцию 15.09.2017

Сдана в редакцию 16.09.2017

Запланирована в номер 29.09.2017

Received 15.09.2017

Submitted 16.09.2017

Scheduled in the issue 29.09.2017

**Булыгин Юрий Игоревич,**  
профессор кафедры «Безопасность  
жизнедеятельности и защита окружающей  
среды» Донского государственного техниче-  
ского университета (РФ, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Гагарина, 1), доктор технических наук,  
профессор  
[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)

**Азимова Наталья Николаевна,**  
старший преподаватель кафедры «Приклад-  
ная математика» Донского государственного  
технического университета,  
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)

**Купцова Ирина Сергеевна,**  
аспирантка кафедры «Безопасность  
жизнедеятельности и защита окружающей  
среды» Донского государственного техниче-  
ского университета,  
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)

**Bulygin Yuriy Igorevich,**  
Professor of Department of life Safety  
and environmental protection of Don State Tech-  
nical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don,  
Russian Federation)  
Doctor of tekhn. Sciences, Professor.  
[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)

**Azimova Natalya Nikolaevna,**  
Senior lecturer of Department "Applied mathe-  
matics" Don State Technical University,  
(Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian  
Federation)  
[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)

**Kuptsova Irina Sergeevna,**  
Graduate student of Department of life Safety and  
environmental protection of Don State Technical  
University, (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Rus-  
sian Federation)  
[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)