



УДК 697.92

Бройда Владимир Аронович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: broida@mail.ru

Сафиуллин Фанис Фагимуллович

аспирант

E-mail: fanfagsaf@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик стабилизатора расхода вентиляционного воздуха

Аннотация

Постановка задачи. Поддержание расчетного расхода воздуха и уменьшение потерь тепловой энергии в холодный период года в естественных вытяжных вентиляционных системах может осуществляться при помощи стабилизаторов расхода вентиляционного воздуха. Целью исследования является экспериментальное определение местной потери давления при различных положениях подвижного элемента стабилизирующего устройства, а также усилий, возникающих от действия воздушного потока на подвижный элемент стабилизирующего устройства.

Результаты. Разработан экспериментальный стенд для изучения свойств стабилизирующего устройства, проведены оценка точности и выполнена серия опытов. Из обработанных результатов опытов получены данные, с помощью которых определены безразмерные характеристики: коэффициент местного сопротивления устройств ζ и коэффициент k , описывающий влияние аэродинамической силы на подвижный элемент устройства.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в применимости полученных экспериментальных результатов для разработки конструкций стабилизаторов расхода вентиляционного воздуха рассматриваемого типа, значительно уменьшающих расход тепловой энергии в холодный период года.

Ключевые слова: стабилизатор расхода, подвижный элемент, давление, усилие, погрешность.

Введение

При понижении температуры наружного воздуха увеличивается гравитационное давление, что ведет к увеличению расхода естественной вытяжки по сравнению с расчетным. Вследствие этого увеличиваются затраты тепловой энергии в холодный период года. Снизить бесполезные затраты тепла можно используя стабилизаторы расхода вентиляционного воздуха, которые поддерживают расчетный расход. Оценка экономии тепловой энергии за счет стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции приведена в [1].

Без использования автоматических стабилизирующих устройств, при ручном регулировании, в действительности, при недостаточном отоплении в холодный период года нарушаются санитарные нормы воздушной среды в помещениях, либо происходит перерасход тепловой энергии.

Стабилизированный расчетный расход воздуха позволяет проще и надежней поддерживать благоприятные внутренние условия воздушной среды в помещениях [2].

В настоящее время известно много конструкций стабилизирующих устройств [3, 4 и др.]. Большая часть имеющихся на рынке устройств для стабилизации расхода имеют значительное начальное сопротивление и предназначены, в основном, для систем механической вентиляции.

Способы стабилизации работы естественных вытяжных систем вентиляции жилых зданий, не приводящие к существенному повышению расходов при их устройстве и требующие меньшие затраты при эксплуатации, описаны в [5].

Стабилизатор расхода вентиляционного воздуха, предложенный в патенте [6] представляет собой устройство прямого действия, в котором энергия потока воздуха, воздействуя на подвижный регулирующий элемент, перемещает его, тем самым уменьшает площадь сечения для прохода воздуха, за счет чего и поддерживается расчетный расход. Необходимое перемещение подвижного регулирующего элемента ограничивается использованием упругого элемента.

Цель исследования

Целью данного исследования является экспериментальное определение аэродинамических характеристик стабилизирующего устройства, которые соответствуют различным положениям подвижного регулирующего органа, реагирующего на изменение гравитационного давления. Такие характеристики необходимы для разработки и проектирования стабилизирующего устройства рассматриваемого типа [6].

Метод исследования

Был разработан экспериментальный стенд для проведения исследований (рис. 1), на котором можно производить изучение свойств стабилизирующего устройства. Кроме того, на этом же стенде можно проверять работоспособность стабилизатора по поддержанию постоянства расхода при моделировании изменения гравитационного давления. Для решения такой задачи предусмотрены: дополнительный дроссель-клапан 13, дополнительный микроманометр 9, с помощью которых можно имитировать и контролировать изменение гравитационного давления, возникающее при изменении температуры наружного воздуха.

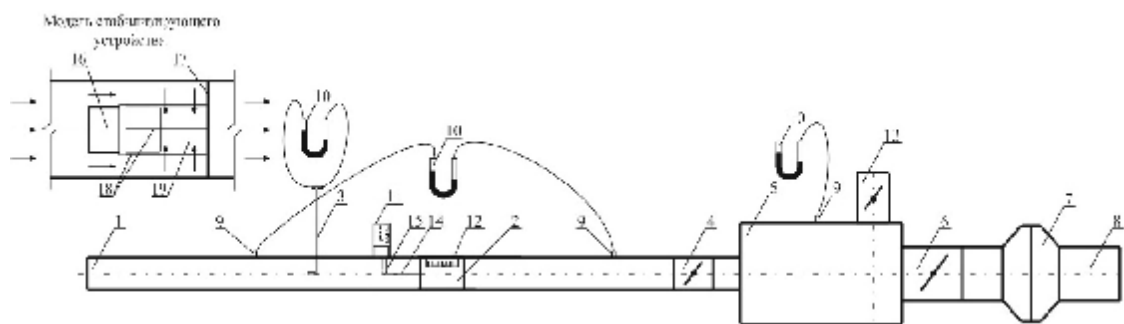


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – воздуховод $d=160$ мм; 2 – модель стабилизирующего устройства;
- 3 – двухканальная пневмометрическая трубка; 4 – дроссель-клапан $d=160$ мм;
- 5 – камера статического давления; 6 – дроссель-клапан $d=315$ мм; 7 – вентилятор;
- 8 – воздуховод $d=315$ мм; 9 – штуцер; 10 – дифференциальный манометр TESTO 510;
- 11 – динамометр; 12 – смотровое окно; 13 – дроссель-клапан $d=160$ мм; 14 – нить; 15 – блок;
- 16 – подвижный элемент; 17 – диафрагма; 18 – направляющие; 19 – сечение для прохода воздуха

Измерение динамических давлений в воздуховоде 1, регистрируемых дифференциальным манометром 10, проводилось на выровненном участке достаточной длины (15 калибров) при помощи двухканальной пневмометрической трубки 3, установленной по оси воздуховода 1. Скорость и расход воздуха в проводимых экспериментах рассчитывались по найденным динамическим давлениям. Положение подвижного элемента 16 стабилизирующего устройства 2 определялось визуально по установленной на направляющей 18 линейной шкале через застекленное смотровое окно 12 в стенке воздуховода. В зависимости от положения подвижного элемента замерялся перепад статических давлений, отбираемых от штуцеров 9 на границах участка замеров длиной $l_{зм}$. На основании измеренных перепадов статических давлений, с учетом удельных линейных потерь давления R на участке между штуцерами, определяемых по справочным таблицам [7], вычислялись коэффициенты местного сопротивления ζ , соответствующие положению подвижного элемента.

Усилия от воздействия воздушного потока на подвижный элемент стабилизирующего устройства, измерялись при помощи пружинного динамометра 11, соединенного с подвижным элементом при помощи нити 14, перекинутой через блок 15.

Все опытные величины в экспериментах снимались, когда подвижный элемент стабилизирующего устройства устанавливался под действием воздушного потока и уравновешивался усилием динамометра.

Была произведена оценка погрешности при выполнении экспериментальных исследований на установке для изучения свойств стабилизирующего устройства.

Общая среднеквадратичная ошибка измерений на экспериментальном стенде определяется по формуле [8]:

$$Ds_m = \sqrt{Ds_1^2 + Ds_2^2 + Ds_3^2 + Ds_4^2 + Ds_5^2 + Ds_6^2 + Ds_7^2 + Ds_8^2 + Ds_9^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_1$ – ошибка пневмометрической трубки (по данным [9] составляет $\pm 2\%$);

$\Delta\sigma_2$ – ошибка дифференциального манометра TESTO 510 (по данным [10] составляет $\pm 2,5\%$);

$\Delta\sigma_3$ – ошибка визуального снятия отсчета по линейной шкале (для невооруженного глаза составляет $\Delta h_3 = \pm 0,5$ мм ($\sim 1\%$), и не зависит от величины отсчета);

$\Delta\sigma_4$ – ошибка метода проведения измерений по показаниям пневмометрической трубки, установленной по оси воздуховода, (по данным [9] принимается равной 2%);

$\Delta\sigma_5$ – ошибка измерений динамометром, (принимается в 1%);

$\Delta\sigma_6$ – ошибка за счет возможной неплотности аэродинамического стенда (установка была уплотнена при помощи алюминиевого скотча, оценивается в 3%);

$\Delta\sigma_7$ – ошибка, учитывающая неточность геометрических размеров сечения канала (для канала $d=160$ мм оценивается равной $0,5$ мм/ 160 мм= $0,3\%$);

$\Delta\sigma_8$ – ошибка снятия статических давлений с помощью штуцеров (оценивается в 1%);

$\Delta\sigma_9$ – ошибка, учитывающая зазор между подвижным элементом и направляющими, по которым он перемещается (оценивается в $0,5\%$).

$$Ds_m = \sqrt{2^2 + 2,5^2 + 1^2 + 2^2 + 1^2 + 3^2 + 0,3^2 + 1^2 + 0,5^2} = 5,2\% = 0,052.$$

Определяется доверительная вероятность измерений α . Доверительный интервал измерений на экспериментальном стенде должен быть соизмерим со среднеквадратичной ошибкой установки, и принимается с запасом $\Delta x=0,07$. В ходе опытов для снижения погрешности предполагается выполнять по $n=3-4$ однотипных измерений. Значения коэффициента Стьюдента вычисляются по формуле [11]:

$$t_{\alpha n} = \frac{Dx \times \sqrt{n}}{Ds_m}, \quad (2)$$

$$\text{– для 4 измерений: } t_{\alpha n} = \frac{0,07 \times \sqrt{4}}{0,052} = 2,7;$$

$$\text{– для 3 измерений: } t_{\alpha n} = \frac{0,07 \times \sqrt{3}}{0,052} = 2,3.$$

Интерполируя данные таблицы С.2 [11] находим при $n=4$ $\alpha=0,92$, при $n=3$ $\alpha=0,84$. Такие доверительные вероятности соответствуют ожидаемой точности выполняемых экспериментальных исследований. Соответственно, при проведении экспериментов принимается выполнение 3-4 однотипных измерений.

Определение коэффициента местного сопротивления ζ и коэффициента k , характеризующего усилие на подвижном элементе стабилизирующего устройства, проводилось по нескольким однотипным замерам для каждого положения подвижного элемента. Полученные результаты затем усреднялись. Для уменьшения погрешностей, связанных с вибрацией подвижного элемента стабилизирующего устройства, рассматривалось две зоны его перемещения.

Для первой зоны с длиной сечения для прохода воздуха в диапазоне от 55 до 15 мм, длина такого сечения изменялась с шагом 5 мм. Чтобы получить несколько экспериментальных значений при помощи дроссель-клапана 4 изменялся расход, и проводилось по 4 однотипных замера. Для второй зоны с длиной сечения для прохода воздуха от 15 до 9 мм, шаг уменьшался до 2 мм. В выполненных опытах минимальная длина сечения для прохода воздуха составляла 9 мм. Для каждого положения подвижного элемента второй зоны проводилось по 3 однотипных замера при разных расходах воздуха.

Обработка результатов экспериментов проводилась по следующим формулам:

– осевая скорость воздуха в канале V_{oc} , м/с:

$$V_{oc} = 1,29 \times \sqrt{P_{mp}}, \quad (3)$$

где P_{mp} – показания дифференциального манометра, соответствующие перепаду полного и статического давления, измеряемых двухканальной пневмометрической трубкой;

– средняя скорость в канале V_{cp} , м/с:

$$V_{cp} = 0,81 \times V_{oc}, \quad (4)$$

– расход воздуха в канале L , м³/с:

$$L = V_{cp} \times F, \quad (5)$$

где F – площадь сечения канала, при $d=0,16$ м, $F=\pi \cdot d^2/4=0,0201$ м².

– рассчитанное по величине V_{cp} , динамическое давление в канале, P_0 , Па:

$$P_0 = \frac{\rho \times V_{cp}^2}{2}, \quad (6)$$

– коэффициент местного сопротивления стабилизирующего устройства ζ :

$$\zeta = \frac{P_{um} - R \times l_{зм}}{P_0}, \quad (7)$$

где P_{um} – измеренный перепад давления между штуцерами, Па;

R – удельное сопротивление, которое определялось по справочным таблицам [7], в зависимости от диаметра и скорости, Па/м;

$R \cdot l_{зм}$ – расчетная потеря давления на участке между штуцерами, Па, где $l_{зм}=1,5$ м.

Безразмерной характеристикой усилия от воздействия потока на подвижный элемент является коэффициент k , который находится по формуле:

$$k = \frac{us / 102}{f_n \times P_0}. \quad (8)$$

где us – усилие измеряемое динамометром, г; 102 – коэффициент пересчета усилий, измеренных в граммах в Н (ньютоны); f_n – площадь поперечного сечения круглого подвижного элемента при радиусе $r=0,055$ м, $f_n=\pi \cdot r^2=0,0094$ м².

По обработанным результатам экспериментального исследования построен график зависимости коэффициента местного сопротивления ζ от отношения длины сечения для прохода воздуха l к диаметру воздуховода d , то есть l/d . Аналогичным образом построена зависимость коэффициента k , характеризующего воздействие потока на подвижный элемент устройства от величин l/d . Графики зависимостей $\zeta(l/d)$ и $k(l/d)$ представлены на рис. 2-3. На этих же графиках показаны результаты численного исследования по определению коэффициента местного сопротивления ζ и коэффициента усилий k , полученные ранее методом CFD в работе [12].

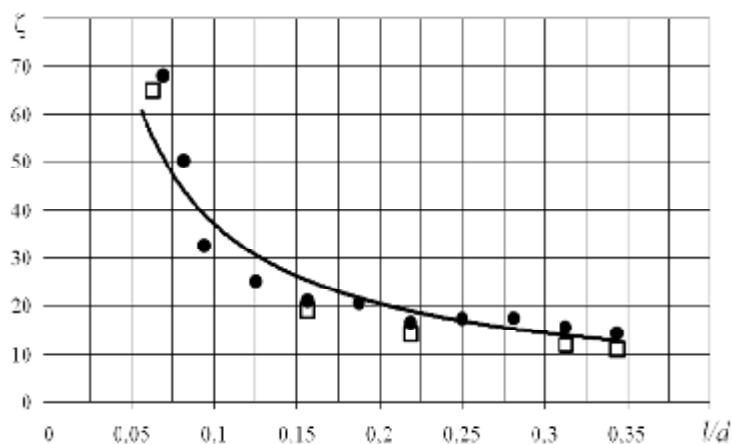


Рис. 2. График зависимости коэффициента ζ от l/d :

● – осредненные опытные значения экспериментального исследования;
□ – результаты численного исследования; сплошная линия – кривая, построенная по формуле (9)

Экспериментальная зависимость $\zeta(l/d)$ в исследованном диапазоне приближенно описывается степенной функцией:

$$\zeta = 5,22 \times (l/d)^{-0,85}. \tag{9}$$

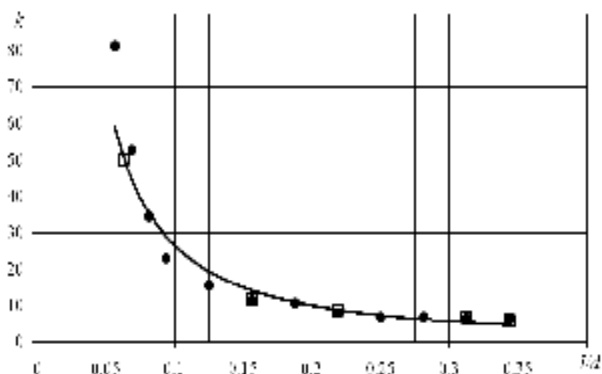


Рис. 3. График зависимости коэффициента k от l/d :

● – осредненные опытные значения экспериментального исследования;
 □ – результаты численного исследования; сплошная линия – кривая, построенная по формуле (10)

Экспериментальная зависимость $k(l/d)$ неплохо аппроксимируется формулой:

$$k = 1,05 \times (l/d)^{-1,4}. \tag{10}$$

В качестве подтверждения того, что выбранная методика определения количества однотипных измерений является верной, представлен разброс экспериментальных точек коэффициента местного сопротивления ζ (рис. 4а, б) и коэффициента усилий k (рис. 4в, г) при различных расходах воздуха для значений $l/d=0,125$ и $l/d=0,281$.

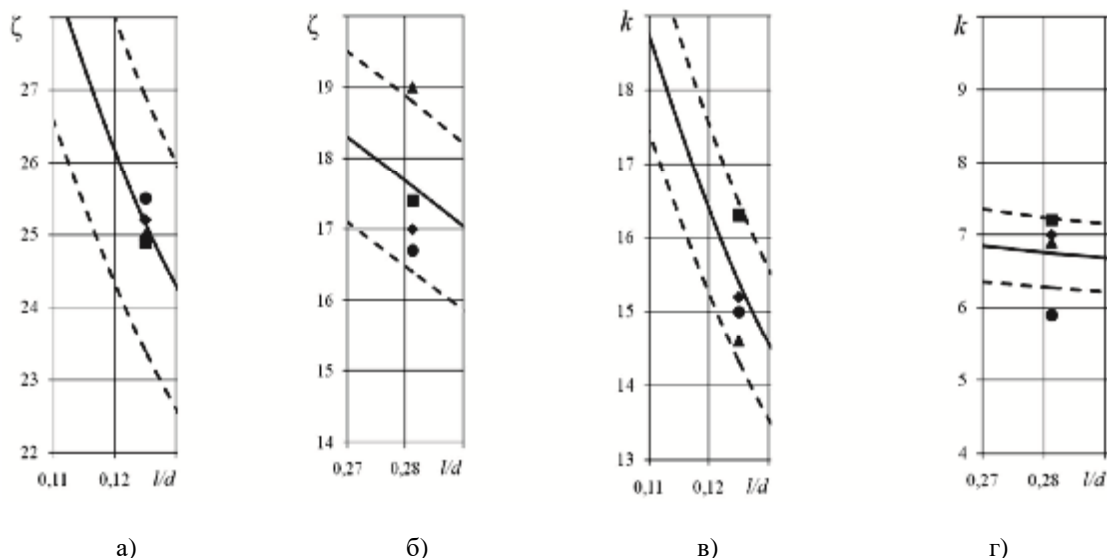


Рис. 4. Разброс экспериментальных точек.

Сплошная линия – ожидание получаемого результата;
 штрихпунктирные линии – границы доверительного интервала;
 ▲●■◆ – отдельные опытные значения величин ζ и k
 при разных расходах воздуха и заданных значениях l/d

Большинство отдельных опытных точек размещается в границах доверительного интервала. Так на рис. 4 а-г из 16 опытных точек 14 располагаются внутри доверительного интервала, то есть для этих опытных точек доверительная вероятность составляет $14/16=0,875$ и практически совпадает с предварительно выполненной оценкой доверительной вероятности $\alpha=0,84-0,92$.

Заключение

Результаты экспериментального исследования аэродинамических характеристик стабилизатора расхода вентиляционного воздуха, представленные в виде безразмерных коэффициентов $\zeta(l/d)$ и $k(l/d)$, показали их удовлетворительное соответствие результатам выполненного ранее численного исследования [12]. Большинство экспериментальных точек лежат в пределах доверительного интервала, что подтверждает предварительную оценку точности исследования. Таким образом, экспериментально получены основные характеристики, которые составляют базу для расчета и конструирования стабилизатора расхода вентиляционного воздуха для конкретных условий применения.

Список библиографических ссылок

1. Бройда В. А. Экономия тепловой энергии за счет стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции // Известия вузов. Строительство. 2012. № 10. С. 54–58.
2. Шилкин Н. В., Шонина Н. А., Миллер Ю. В. Возможности энергосбережения в системах с регулируемой естественной вентиляцией // Специализированный журнал Энергосбережение : АВОК. 2018. № 2. С. 16–24.
3. Воздушный клапан для регулирования расхода воздуха в воздуховоде : пат. 2451244 Рос. Федерация. № 2009109703/12 ; заявл. 14.08.07 ; опубл. 20.05.12, Бюл. № 14. 20 с.
4. Энергосберегающий регулятор расхода воздуха систем естественной вентиляции : пат. 2527725 Рос. Федерация. № 2013115179/12 ; заявл. 04.04.13 ; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25. 6 с.
5. Шонина Н. А. Вентиляция для многоэтажных жилых зданий // Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК. 2013. № 6. С. 22–30.
6. Устройство стабилизации расхода воздуха : пат. 2547602 Рос. Федерация. № 2013151943/12 ; заявл. 21.11.13 ; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10. 4 с.
7. Богословский В. Н. Справочник проектировщика. Ч3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. М. : Стройиздат, 1992. 416 с.
8. Kondlo L. Estimation in the Presence of Measurement errors : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 96 p.
9. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : Стройиздат, 1954. 288 с.
10. Карманный дифференциальный манометр testo 510. Техническое описание // ГК «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». URL: <http://testo.nt-rt.ru/images/manuals/510.pdf> (дата обращения: 15.03.2018).
11. Vijma F., Jonkers M., Van der Vaart A. An Introduction to Mathematical Statistics : Amsterdam University Press, 2016. 384 p.
12. Бройда В. А., Сафиуллин Ф. Ф. Численное исследование аэродинамики цилиндрического тела в канале с диафрагмой // Известия КГАСУ. 2015. № 3 (33). С. 93–97.

Broyda Vladimir Aronovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: broida@mail.ru

Safiullin Fanis Fahimullovich

post-graduate student

E-mail: fanfagsaf@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Experimental study of aerodynamic characteristics of ventilation air flow stabilizer

Abstract

Problem statement. Maintenance of the estimated air consumption and reduction of heat losses during the cold period of the year in natural exhaust ventilation systems can be carried out

with the help of airflow stabilizers. The aim of the study is to determine experimentally the local pressure loss at various positions of the movable member of the stabilizing device, as well as the forces arising from the action of the air flow on the movable member of the stabilizing device.

Results. An experimental installation was developed to study the properties of a stabilizing device, an accuracy evaluation was performed, and a series of experiments was performed. From the processed results of the experiments, data were obtained with the help of which the dimensionless characteristics were determined: the coefficient of local resistance of the devices ζ and the coefficient k , which describes the effect of aerodynamic force on the moving element of the device.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry consists in the applicability of the obtained experimental results for the development of designs of airflow stabilizers of the type considered, which significantly reduces the consumption of thermal power in the cold season.

Keywords: flow stabilizer, moving element, pressure, effort, error.

References

1. Broyda V. A. Thermal energy saving by stabilizing the consumption of natural exhaust ventilation // *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2012. № 10. P. 54–58.
2. Shilkin N. V., Shonina N. A., Miller Y. V. Energy-saving options in systems with adjustable natural ventilation // *Specializirovannyi zhurnal Energoberezhenie : AVOK*. 2018. № 2. P. 16–24.
3. Air valve for regulating airflow in the duct : patent 2451244 of the Rus. Federation. № 2009109703/12 ; decl. 14.08.07 ; publ. 20.05.12. Bull. № 14. 20 p.
4. Energy-saving air flow controller for natural ventilation system : patent 2527725 of the Rus. Federation. № 2013115179/12 ; decl. 04.04.13; publ. 10.09.14. Bull. № 25. 6 p.
5. Shonina N. A., Ventilation for multi-storied residential buildings // *Ventilyaciya. Otoplenie. Kondicionirovanie : AVOK*. 2013. № 6. P. 22–30.
6. Air flow stabilization device : patent 2547602 of the Rus. Federation. № 2013151943/12 ; decl. 21.11.13 ; publ. 10.04.15. Bull. in № 10. 4 p.
7. Bogoslovskiy V. N. Handbook of the designer. P3. Ventilation and air conditioning. Book. 2. M. : Stroyizdat, 1992. 416 p.
8. Kondlo L. Estimation in the Presence of Measurement errors : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 96 p.
9. Taliev V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : Stroyizdat, 1954. 288 p.
10. Pocket differential pressure gauge testo 510. Technical description // GC «NOVYE TEKHNologii». URL: <http://testo.nt-rt.ru/images/manuals/510.pdf> (reference date: 15.03.2018).
11. Bijma F., Jonkers M., Van der Vaart A. An Introduction to Mathematical Statistics: Amsterdam University Press, 2016. 384 p.
12. Broyda V. A., Safiullin F. F. Numerical study of the cylindrical body aerodynamics in a duct with a diaphragm // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 3 (33). P. 93–97.