

**ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР  
В ПРЕЦИЗИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ  
НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Л. В. СТРОК\*, В. А. КОДНЯНКО, В. С. СЕКАЦКИЙ

*Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия,  
\*klw111@mail.ru*

**Аннотация.** Показана актуальность использования газостатических опор в подвижных узлах современного измерительного оборудования. Разработана математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием. Модель позволяет анализировать влияние отклонений размеров опоры на ее эксплуатационные характеристики. Даны рекомендации по нормированию точности наружного диаметра опоры, диаметра расположения дросселирующих отверстий и диаметров самих дросселирующих отверстий. Данные рекомендации можно использовать при проектировании подвижных узлов прецизионного измерительного оборудования.

**Ключевые слова:** газостатические опоры, прецизионное измерительное оборудование, отклонения размеров, эксплуатационные характеристики

**Ссылка для цитирования:** Строк Л. В., Коднянко В. А., Секацкий В. С. Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 443—450. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-443-450.

**INFLUENCE OF SIZE DEVIATIONS OF GAS-STATIC SUPPORTS  
IN PRECISION MEASURING EQUIPMENT  
ON THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS**

L. V. Strok\*, V. A. Kodnyanko, V. S. Sekatsky

*Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,  
\*klw111@mail.ru*

**Abstract.** The relevance of using gas-static bearings in moving parts of modern measuring equipment is shown. A mathematical model of a gas-static support with double throttling has been developed, which makes it possible to analyze the effect of deviations in the dimensions of the bearing and its operational characteristics. Recommendations are given for standardizing the accuracy of the outer diameter of the support, the diameter of the location of the throttling holes and the diameters of the throttling holes themselves. These recommendations can be used in the design of moving parts of precision measuring equipment.

**Keywords:** gas-static bearings, precision measuring equipment, dimensional deviations, performance characteristics

**For citation:** Strok L. V., Kodnyanko V. A., Sekatsky V. S. Influence of size deviations of gas-static supports in precision measuring equipment on their operational characteristics. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 443—450 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-443-450.

**Введение.** Современные требования к эксплуатационным свойствам продукции и их контролю обязывают производителей повышать точностные характеристики выпускаемого измерительного оборудования. Высокая точность измерительного оборудования актуальна и при выполнении научно-исследовательских работ. Важность этого подтверждается постановлением правительства РФ от 27.12.2019 № 1875 (Об утверждении Правил предоставления грантов в форме субсидий из федерального бюджета на реализацию мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки, в рамках федерального проекта „Развитие инфраструктуры для научных

исследований и подготовки кадров“ национального проекта „Наука и университеты“)\*, которое направлено на обновления не менее 50 % приборной базы до 2024 г. в ведущих организациях, выполняющих научные исследования и разработки.

Точность измерения геометрических параметров продукции можно повысить за счет снижения погрешности самих средств измерения, что подтверждается отдельными результатами исследований, проведенных в этом направлении [1—3].

Для измерения размеров, отклонений формы и расположения поверхностей деталей сложной формы (например, корпусных деталей) с повышенными требованиями к точности измерения все чаще применяют координатно-измерительные машины (КИМ). Литературно-патентный анализ, проведенный авторами ранее [4], показал, что практически во всех КИМ перемещение подвижных узлов осуществляется по направляющим с газостатическими опорами. В КИМ используют различные конструкции газостатических опор, однако рекомендации по их выбору и проектированию не выявлены.

В Политехническом институте СФУ накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению и исследованию газостатических опор, который позволяет рекомендовать для направляющих КИМ использование газостатических опор с двойным дросселированием расхода воздуха [4]. Способ двойного дросселирования, разработанный в Красноярском политехническом институте [5], является одним из наиболее удобных и эффективных для повышения устойчивости. При двойном дросселировании (рис. 1) в магистрали нагнетания последовательно располагаются основное дросселирующее сопротивление (простая диафрагма,  $d_p$ ), обеспечивающее компенсацию расхода воздуха, и дополнительные дросселирующие сопротивления (кольцевая диафрагма,  $d_k$ ), предназначенные для распределения воздуха по площади несущего слоя  $h$  и выполнения функции динамических демпферов.

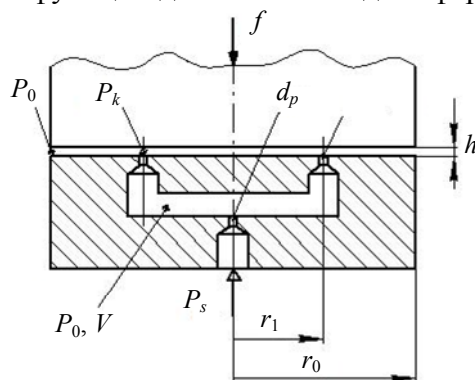


Рис. 1

В большом количестве исследований газостатических опор с двойным дросселированием [6—12] показано, что данный способ повышает устойчивость опоры, улучшает динамические характеристики и технологичность конструкции.

При проектировании газостатической опоры проводят расчеты параметров и характеристик по номинальным значениям. К геометрическим параметрам опоры с двойным дросселированием можно отнести наружный радиус  $r_0$  (см. рис. 1), радиус расположения питателей  $r_1$ , диаметры самих питателей  $d_p$ . При заданных внешней нагрузке  $f$  и параметре настройки опоры  $\zeta$  рассчитывают зазор в опоре  $h$ , который обеспечивает позиционирование подвижной части опоры.

Коэффициент настройки демпфирующих дросселей определяется выражением

$$\zeta = \frac{P_{p0}^2 - P_{k0}^2}{P_s^2 - P_{k0}^2} \in [0, 1]. \quad (1)$$

\* Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2019 г. № 1875 // Собрание законодательства. 2020. № 2. Ст. 166, № 33, Ст. 5383.

где  $P_{k0}$  — безразмерное давление на выходе кольцевых диафрагм  $P_k$  при расчетном безразмерном зазоре  $H = 1$ ,  $P_{p0}$  — безразмерное давление на выходе простых диафрагм  $P_p$ ,  $P_s$  — безразмерное давление наддува.

Если  $\zeta = 0$ , то  $P_{k0} = P_{p0}$ , что равносильно отсутствию кольцевых диафрагм и одинарному дросселированию через простую диафрагму диаметра  $d_p$ . Если  $\zeta = 1$ , то  $P_s = P_{p0}$ , и это соответствует режиму одинарного дросселирования через кольцевые диафрагмы диаметра  $d_k$ . Следовательно, двойное дросселирование будет иметь место при  $0 < \zeta < 1$ . При малых  $\zeta$  большее сопротивление приходится на простую диафрагму, при  $\zeta$ , близких к 1, главную роль будут играть кольцевые диафрагмы. Исследования показывают, что наилучшими по качеству как статики, так и динамики, являются значения  $\zeta \in [0, 2; 0, 3]$  [6].

Действительные размеры изготовленных элементов газостатической опоры отличаются от номинальных значений. Рассмотрим влияние отклонений основных размеров опоры на точность позиционирования ее подвижной части.

**Влияние отклонения размеров наружного диаметра на положение подвижной части опоры.** Вследствие погрешностей изготовления опоры величина наружного радиуса  $r_0$  отличается от расчетной. При этом, очевидно, будут отличаться от расчетных значений безразмерные величины внутреннего радиуса  $R_1$ , давления  $P_k$  на выходе питателей и зазора  $H$ . С учетом этого радиус расположения питателей теперь будет определяться формулой  $R_{1R} = r_1/r_{0R}$ , где  $r_{0R}$  — реальный радиус подпятника. Будем считать, что нагрузка  $f$  на подпятник остается неизменной и ее величина определяется расчетом при  $r_{0R} = r_0$ .

Запишем размерное уравнение баланса сил в следующем виде:

$$2r_{0N}^2 p_a \int_0^1 R(P-1) dR = f. \quad (2)$$

В этом уравнении неизвестно лишь безразмерное давление  $P_k$ . Найдем его методом половинного деления [13]. Границы интервала неопределенности определим из условия  $P_k \in [1, P_s]$ .

Вычислив давление  $P_k$ , найдем далее измененный зазор  $H$ . Поскольку параметр настройки  $\zeta$  мал, можно считать, что на выходе питателей  $P_p \approx P_k$ . В этом случае уравнение баланса расходов можно записать в виде

$$Q_h = Q_p, \quad (3)$$

где

$$Q_p = A_p \Pi(P_s, P_k), \quad (4)$$

$$Q_h = A_h H^3 (P_k^2 - 1). \quad (5)$$

Здесь  $Q_h$ ,  $Q_p$  — безразмерные массовые расходы смазки через несущий слой и дроссель;  $A_h$ ,  $A_p$  — безразмерные критерии подобия гидравлического сопротивления несущего слоя и дросселя.

Из уравнения баланса расходов (3) можно получить зависимость безразмерного  $H$  и размерного  $h$  зазоров от давления  $P_k$ :

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_p \Pi(P_s, P_k)}{A_h (P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \quad (6)$$

Расчеты были проведены для трех типоразмеров опор с номинальными значениями наружного радиуса: 25 (рис. 2, а), 50 (б) и 75 мм (в). Для каждой опоры расчеты выполнены для трех номинальных значений зазоров 10, 20 и 30 мкм.

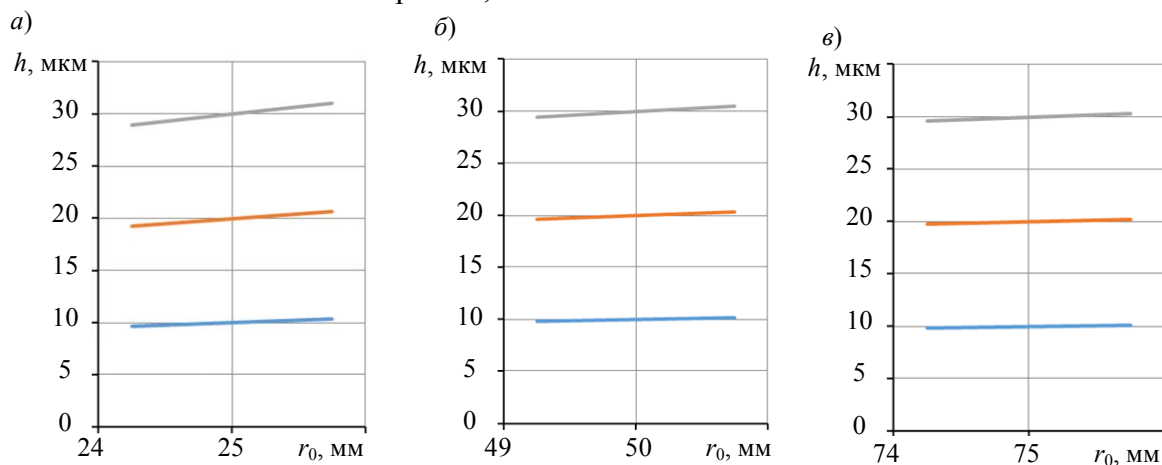


Рис. 2

При теоретическом исследовании использован радиус наружной поверхности. На рабочих чертежах указываются номинальный диаметр и его предельные отклонения. Наружный диаметр опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам, которые изготавливаются по квалитетам точности 12—16. Исследования показали, что изменение наружного диаметра в пределах допуска по 12-му квалитету повлечет за собой изменение зазора в пределах 1 % от номинального значения, а нормирование наружного диаметра по 16-му квалитету — от 6 до 8 %. При номинальной величине зазора в 20 мкм 8 % в отклонении наружного диаметра изменит точность позиционирования подвижной части, например координатно-измерительной машины, на 1,6 мкм, что недопустимо для прецизионного измерительного оборудования.

По результатам исследования рекомендуем для нормирования точности наружного диаметра газостатических опор использовать 14-й квалитет точности, который относится к среднему условному классу точности и широко используется в машиностроении и приборостроении для нормирования точности свободных размеров. В сравнении с 16-м квалитетом точности 14-й квалитет позволит в два раза и более повысить точность позиционирования подвижной части опоры без существенного увеличения стоимости изготовления в связи с отсутствием необходимости использования при изготовлении опоры технологического оборудования повышенной точности.

**Влияние погрешности радиуса расположения осей отверстий питателей газостатической опоры на величину расчетного зазора.** На несущей поверхности газостатической опоры с двойным дросселированием (как и для других типов газостатических опор) выполняются отверстия питателей (дросселей), которые расположены по заданному радиусу опоры через определенный угловой размер. Допуски на расположение осей отверстий регламентирует ГОСТ 14140-81\*, который предназначен для обеспечения взаимозаменяемости двух соединяемых поверхностей и для данного случая не подходит. Рекомендации этого стандарта распространяются только для крепежных деталей и не предполагают использования для нормирования точности расположения осей отверстий питателей газостатической опоры.

Точность положения угловых координат отверстий питателей практически не влияет на результаты исследования, согласно допущениям, которые приняты в математической модели опоры. Были проведены дополнительные исследования влияния радиальной составляющей. Для этого наружный радиус принимался в качестве постоянной величины, а радиус располо-

\* ГОСТ 14140-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. 31 с.

жения осей отверстий питателей газостатической опоры варьировали в пределах 11—14 мм (для опоры с наружным диаметром 25 мм, рис. 3).

При математическом моделировании и расчетах изменяли значение радиуса расположения питательных отверстий  $r_1$ . Это повлекло за собой отличие от расчетных значений безразмерных величин давления  $P_k$  и зазора  $H$ . С учетом этого радиус расположения осей отверстий питателей определяется по формуле  $R_{1R} = r_{1R} / r_0$ , где  $r_{1R}$  — реальный внутренний радиус. Уравнение баланса сил примет вид

$$2r_0^2 p_a \int_0^1 R(P-1) dR = f. \quad (7)$$

После вычисления по описанной методике неизвестного давления  $P_k$  находили зазоры по формуле (1). Результаты расчетов зависимости изменения толщины несущего слоя  $h$  в газостатической опоре от изменения радиуса расположения питательных отверстий  $r_1$  при различных значениях номинального зазора  $h_0$  представлены на рис. 3

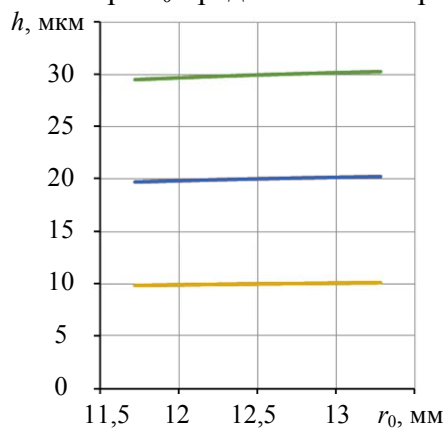


Рис. 3

Анализ показал, что при проектировании газостатической опоры допуски на диаметр расположения осей питательных отверстий необходимо назначать по 14-му качеству, как и для наружного диаметра опоры.

**Влияние погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора.** Одним из сложных элементов технологической цепочки изготовления элементов газостатической опоры является обеспечение необходимого диаметра дросселирующего отверстия по рабочим чертежам опоры. Сложность заключается не только в технологической, но и в конструкторской подготовке технической документации. На сегодняшний день отсутствуют какие-либо рекомендации по проектированию данного типа опор. Экспериментально, и в какой-то мере теоретически, установлено, что диаметр дросселирующих отверстий составляет десятые доли миллиметра. Инструментальные возможности для изготовления отверстий малых диаметров ограничены. Кроме того, на точность изготовления отверстий малого диаметра существенно влияют технологические факторы. Для выявления влияния погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора проведены теоретические исследования. Переменным параметром в данном случае является  $d_p$  и, следовательно, зависящий от него параметр  $A_p$ . Поскольку данная зависимость является квадратичной, то формула для вычисления измененного параметра  $A_p$  примет вид

$$A_{pR} = A_p \left( \frac{d_{pR}}{d_p} \right)^2, \quad (8)$$

где  $d_{pR}$  — реальный диаметр отверстия.

С учетом этого формулы (6) для определения зазоров примут вид

$$H = 3 \sqrt{\frac{A_{pR} \Pi(P_s, P_k)}{A_h (P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \quad (9)$$

Исследования проведены для газостатической опоры с номинальными геометрическими параметрами  $r_0 = 25$  и  $r_1 = 12,5$  мм. Показано, что на характеристики опоры влияют отклонения размеров диаметра дросселирующих отверстий, которые составляют десятые и тысячные доли миллиметра (рис. 4).

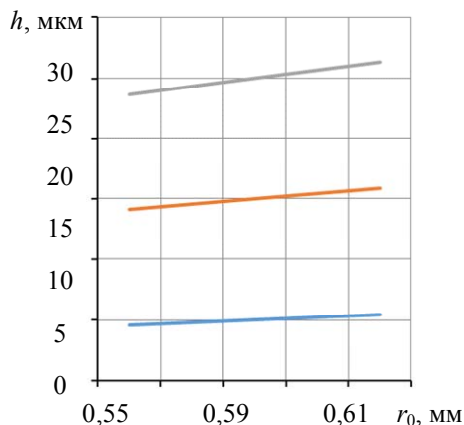


Рис. 4

Расчеты проведены для номинальных расчетных зазоров в опоре  $h_0 = 10, 20, 30$  мкм. Диаметр дросселирующих отверстий меняли от номинального значения 0,6 мм до  $\pm 0,04$  мм.

Расчеты показывают, что при зазоре в опоре 20 мкм изменение диаметра дросселирующих отверстий от номинального значения 0,6 мм в пределах 7-го качества (допуск 10 мкм) приведет к изменению зазора в опоре в пределах 2 %. Погрешность дросселирующих отверстий в пределах допуска в 40 мкм, что соответствует 10-му качеству, приведет к изменению зазора в пределах 5 %. Дальнейшее увеличение допуска нецелесообразно, поскольку приведет к изменению номинального размера диаметра дросселирующего отверстия.

**Заключение.** Разработана математическая модель азростатической опоры с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания, позволяющая определить изменения основных характеристик опоры в зависимости от отклонений размеров опорных поверхностей и дросселирующих устройств.

Исследования показали, что изменение наружного диаметра опоры и диаметра расположения дросселирующих отверстий в пределах квалитетов 12—16 повлечет за собой изменение зазора, а следовательно и положение подвижной части опоры, в пределах от 1 до 8 %. При проектировании азростатических опор нормирование точности наружного диаметра и диаметра расположения дросселирующих отверстий рекомендуется осуществлять по 14-му квалитету точности.

Наиболее чувствительны характеристики опоры к изменению размеров самих дросселирующих отверстий, точность которых при изготовлении должна соответствовать квалитетам 8—10. Повышение точности менее 8-го квалитета связано с технологическими и экономическими проблемами, а снижение точности грубее 10-го квалитета приведет к изменению расходных характеристик опоры более чем на 5 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чигрик Н. Н. Исследование влияния погрешности средства измерений на параметры разбраковки и точность технологического процесса при измерительном контроле высоты поршневых колец автомобильного двигателя // Омский научный вестник. 2014. № 2(130). С. 86—92.

2. Сиденко О. Е. Влияние погрешности измерения на результаты измерительного контроля // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 5-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. 2018. Т. 2. С. 236—238.
3. Шулепов А. В., Пьей Сони Вин. Исследование погрешности измерения геометрических параметров деталей в зависимости от цвета покрытия поверхности в лазерных сканирующих оптоэлектронных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1(27). С. 55—62. DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-8.
4. Секацкий В. С., Пикалов Ю. А., Строк Л. В. Аэростатические опоры в координатно-измерительных машинах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 5. С. 26—36. DOI: 10.25791/pribor.05.2020.1176.
5. А.с. 636427 СССР, F 16 C31/06. Газостатический подшипник / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, С. Н. Шатохин. Заявл. 11.03.1977; опубл. 1978. Бюл. № 45.
6. Kodnyanko V. A., Shatokhin S. N. Theoretical Study on Dynamics Quality of Aerostatic Thrust Bearing with External Combined Throttling // FME Transactions. 2020. Vol. 46, N 4. P. 342—350. DOI: 10.5937/fme2002342K.
7. Коднянко В. А., Пикалов Ю. А., Тюриков А. С., Шатохин С. Н. Исследование газостатических опор с двойным дросселированием газа // Опоры скольжения с внешним источником давления. Красноярск, 1977. Вып. 2. С. 115—118.
8. Коднянко В. А., Шатохин С. Н. Исследование динамики газостатической опоры с двойным дросселированием газа в магистрали нагнетания // Машиноведение. 1978. № 6. С. 21—23.
9. Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y., Strok L., Pikalov I., Grigorieva O., Brungardt M. Theoretical Efficiency Study of Output Lubricant Flow Rate Regulating Principle on the Example of a Two-Row Aerostatic Journal Bearing with Longitudinal Microgrooves and a System of External Combined Throttling // Mathematics. 2021. N 9. P. 1698. DOI: 10.3390/math9141698.
10. Шатохин С. Н., Коднянко В. А. О возможностях внешнего двойного дросселирования при проектировании газостатических опор // Тез. докл. Всесоюз. координационного совещания „Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой“. Винница, 1983. С. 134—135.
11. Коднянко В. А. Исследование газостатических опор с двойным дросселированием и активной компенсацией расхода газа: Дис. ... канд. техн. наук. М.: ИМАШ, 1983. 201 с.
12. Коднянко В. А., Григорьева О. А., Строк Л. В. Исследование осевой газостатической опоры с регулятором расхода типа сопло-заслонка // Журн. передовых исследований в области естествознания. 2021. № 13. С. 18—23. DOI: 10.26160/2572-4347-2021-13-18-23.
13. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука, 1987. 248 с.

**Сведения об авторах**

- Лилия Владимировна Строк** — аспирант; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: klw111@mail.ru
- Владимир Александрович Коднянко** — д-р техн. наук, профессор; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: kowlad@rambler.ru
- Виктор Степанович Секацкий** — канд. техн. наук, доцент; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: sekackiy@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.03.22; одобрена после рецензирования 07.04.22; принята к публикации 25.04.22.

**REFERENCES**

1. Chigrik N.N. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2014, no. 2(130), pp. 86–92. (in Russ.)
2. Sidenko O.E. *Kachestvo produktsii: kontrol', upravleniye, povysheniye, planirovaniye* (Product Quality: Control, Management, Improvement, Planning), Collection of Scientific Papers of the 5th International Youth Scientific and Practical Conference, 2018, vol. 2, pp. 236–238. (in Russ.)
3. Shulepov A.V., P'yey Soni Vin, *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2019, no. 1(27), pp. 55–62, DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-8. (in Russ.)

4. Strok L.V., Sekatsky V.S., Pikalov Yu.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 5, pp. 26–36, DOI: 10.25791/pribor.05.2020.1176. (in Russ.)
5. Certificate of authorship 636427 USSR, F 16 C31/06, *Gazostaticheskiy podshipnik* (Gasostatic Bearing), V.A. Kodnyanko, Yu.A. Pikalov, A.S. Tyurikov, S.N. Shatokhin, Priority 11.03.1977, Published 1978, Bulletin 45. (in Russ.)
6. Kodnyanko V.A., Shatokhin S.N. *FME Transactions*, 2020, no. 4(46), pp. 342–50, DOI: 10.5937/fme2002342K.
7. Kodnyanko V.A., Pikalov Yu.A., Tyurikov A.S., Shatokhin S.N. *Collection "Sliding bearings with an external pressure source"*, Krasnoyarsk, 1977, no. 2, pp. 115–118. (in Russ.)
8. Kodnyanko V.A., Shatokhin S.N. *Issledovaniye dinamiki gazostaticheskoy opory s dvoynym drosselirovaniyem gaza v magistrali nagnetaniya* (Investigation of the Dynamics of a Gas-Static Support with Double Gas Throttling in the Injection Line), Moscow, 1978, no. 6, pp. 21–23. (in Russ.)
9. Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y., Strok L., Pikalov I., Grigorieva O., Brungardt M. *Mathematics*, 2021, no. 9, pp. 1698, DOI: 10.3390/math9141698.
10. Shatokhin S.N., Kodnyanko V.A. *Tezisy doklada Vsesoyuznogo koordinatsionnogo soveshchaniya "Issledovaniye i primeneniye opor skol'zheniya s gazovoy smazkoj"* (Abstracts of the report of the All-Union Coordination Conference "Research and Application of Sliding Bearings with Gas Lubrication"), Vinnitsa, 1983, pp. 134–135. (in Russ.)
11. Kodnyanko V.A. *Issledovaniye gazostaticheskikh opor s dvoynym drosselirovaniyem i aktivnoy kompensatsiyey raskhoda gaza* (Study of Gas Static Supports with Double Throttling and Active Gas Flow Compensation), Candidate's thesis, Moscow, 1983, 201 p. (in Russ.)
12. Kodnyanko V.A., Grigoryeva O.A., Strok L.V. *Journal of Advanced Research in Natural Science*, 2021, no. 13, pp. 18–23, DOI: 10.26160/2572-4347-2021-13-18-23 (in Russ.)
13. Volkov E.A. *Chislennyye metody* (Numerical Methods), Moscow, 1987, 248 p. (in Russ.)

#### **Data on authors**

- Lilia V. Strok** — Post-Graduate Student; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: klw111@mail.ru
- Vladimir A. Kodnyanko** — Dr. Sci., Professor; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: kowlad@rambler.ru
- Viktor S. Sekatsky** — PhD, Associate Professor; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: sekackiy@rambler.ru

Received 18.03.22; approved after reviewing 07.04.22; accepted for publication 25.04.22.