

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР РОТАЦИОННОГО ВИСКОЗИМЕТРА

М. Г. Евсин^{1,2}, М. А. Скотникова¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: skotnikova@mail.ru

² Научно-производственная фирма ООО „К-М“ группы компаний „Константа“, 198097, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена погрешность измерений ротационным вискозиметром, возникающая в результате трения в опорах измерительной части. Приведены результаты определения погрешности, возникающей из-за моментов трения в опорах, использующих шарикоподшипники. Представлены способы математического расчета погрешности для некоторых конструкций опор. Предложена конструкция опор измерительной части ротационного вискозиметра, позволяющая добиться снижения погрешности от трения. Результаты эксперимента подтвердили эффективность использования предложенной конструкции.

Ключевые слова: ротационный вискозиметр, опора часовой конструкции, керновая опора, точность прибора, трение, корунд, лейкосапфир

Ротационный вискозиметр — это прибор для контроля вязкостных свойств жидкостей, в котором исследуемая жидкость помещается между двумя коаксиально расположенными вращающимися телами. Вязкость оценивают по моменту, противодействующему вращению. Его значение пересчитывается в динамическую вязкость при помощи констант измерительной системы.

Одной из основных проблем при работе прибора является влияние момента трения в опорах измерительной части на вращающий момент вискозиметра.

Целью настоящей статьи является совершенствование конструкции опор ротационного вискозиметра для повышения точности прибора.

Определение погрешности, возникающей из-за момента трения в опорах исходного прибора. Исходная конструкция прибора схематично представлена на рис. 1.

На валу сервопривода 1 установлен барабан 2 плоской спиральной пружины (упругий элемент) 4, соединенной с ним одним концом. Второй конец пружины закреплен на валу 6, установленном в шарикоподшипниках 3, служащих для него опорами. На конце вала установлены внешний 7 и внутренний 8 цилиндры, расположенные коаксиально один в другом. Пространство между ними заполнено исследуемой жидкостью 9. При вращении сервопривода барабан пружины движется совместно с валом мотора, части 6 и 8 отстают от него на угол деформации φ упругого элемента, фиксируемый с помощью энкодеров 5.

Погрешность прибора складывается в основном из: погрешности, обусловленной отклонениями размеров и формы деталей при изготовлении измерительной части вискозиметра (измерительной геометрии) [1]; погрешности электронной системы фиксации угла φ энкодером; погрешности, обусловленной трением в опорах измерительной части прибора.

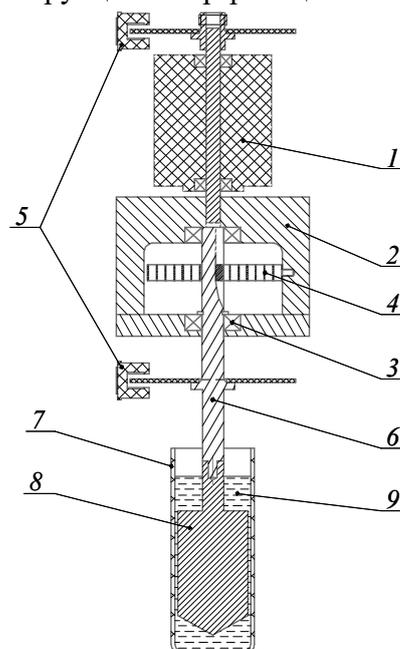


Рис. 1

Как правило, в качестве опор вала ротационного вискозиметра выступают два шарико-подшипника, хотя бы один из которых является радиально-упорным [2—5]. При этом сопротивление в подшипниках качения зависит от многих факторов [6—11].

Погрешность прибора γ , обусловленная трением в опорах [12, 13], описывается формулой:

$$\gamma = \frac{M_T}{M_{вр}}, \quad (1)$$

где M_T — момент трения; $M_{вр}$ — вращающий момент прибора.

Параметр M_T определялся экспериментально. Вал сервопривода был надежно зафиксирован, к валу измерительной системы прикладывался заданный вращающий момент $M_{вр}$ и определялись крайние равновесные положения углов деформации упругого элемента φ_1 (рис. 2, пунктир) и φ_2 (сплошная кривая).

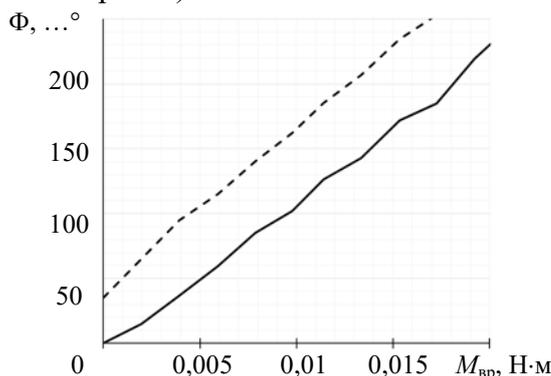


Рис. 2

Результаты расчета погрешности прибора от трения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментального определения погрешности от трения опор исходной конструкции

$M_{вр}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_T, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\gamma, \%$
0	0,00030188	—
0,001965	0,00043125	21,95104
0,003933	0,00050025	12,71906
0,005923	0,00047869	8,082032
0,007855	0,00047696	6,072456
0,00978	0,00051664	5,28239
0,011404	0,00050801	4,454696
0,013361	0,00055114	4,125025
0,015337	0,00053906	3,514773
0,017269	0,00058823	3,406304
0,019233	0,00039503	2,053858
0,021198	0,00053389	2,518585
0,023152	0,00058219	2,514612
0,02511	0,00048041	1,913242
0,027068	0,00053993	1,994732
0,030983	0,00060548	1,954223
0,034898	0,00054165	1,552083
0,03886	0,0006969	1,793364
0,042729	0,00063049	1,47555
0,046667	0,00053906	1,155113
0,050587	0,00065205	1,288955
0,054507	0,0006003	1,101317
0,058427	0,0006624	1,133713
0,062347	0,00064515	1,034765
0,066343	0,00100999	1,522372

Таким образом, в случае низкого вращающего момента прибора, свойственного маловязким жидкостям, момент трения может оказывать существенное влияние на точность измерения.

Разработка конструкции опор, позволяющей снизить момент трения. Для уменьшения погрешности, вызванной трением в опорах, было решено использовать конструкцию опор [8, 14], применяемую в часовых механизмах (рис. 3, б — опоры часовой конструкции, 1 — подпятник корундовый плоский, 2 — палец, 3 — камень сквозной типа СЦ) и аналоговых электроизмерительных приборах (рис. 3, в — керновые опоры, 1 — подпятник корундовый конический типа ПКК, 2 — палец). Предложенная конструкция ротационного вискозиметра представлена на рис. 3, а (1 — сервопривод, 2а — опорная скоба, 2б — скоба измерительной части с балансиром, 3 — опоры, 4 — плоская спиральная пружина (упругий элемент), 5 — энкодеры, 6 — вал измерительной части, 7 — внешний цилиндр, 8 — внутренний цилиндр, 9 — исследуемая жидкость).

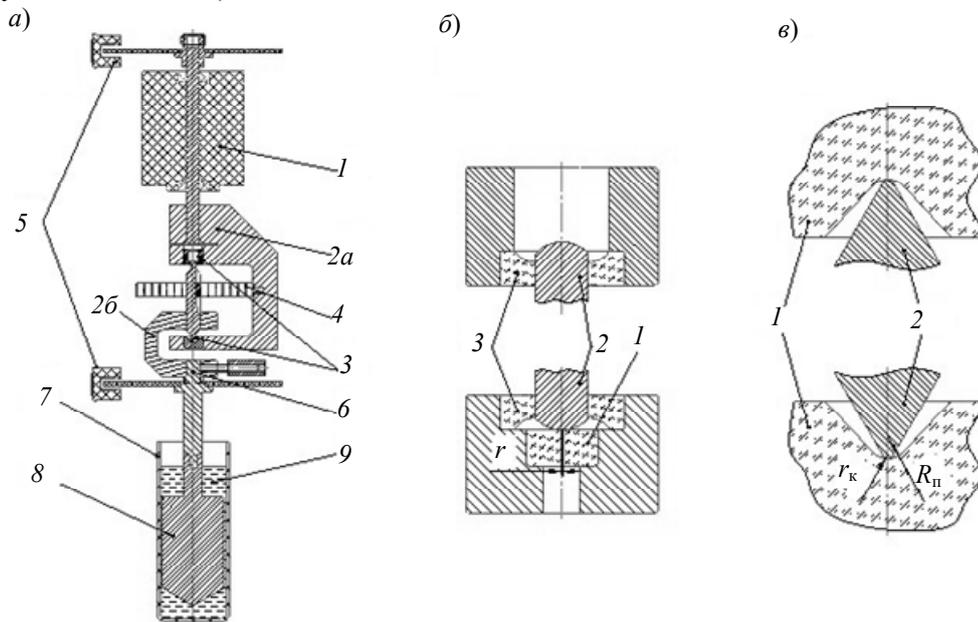


Рис. 3

Вариант 1. Опоры часовой конструкции. Момент трения M_T в опоре часовой конструкции (см. рис. 3, б) складывается из осевого момента трения $M_{Т0}$ пальца о плоский камень, обусловленного силой веса P , и радиального момента трения $M_{Трад}$, обусловленного радиальной силой, создаваемой спиральной пружиной.

Осевой момент трения рассчитывается по формуле [15]:

$$M_{Т0} = P\mu \frac{R}{2}, \quad (2)$$

где $\mu=0,16$ — коэффициент трения в паре „сталь—корунд“; R — радиус опорной площадки:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3)$$

площадью

$$S = \frac{P}{\sigma}, \quad (4)$$

$\sigma=4 \cdot 10^9$ Н/м² — предельное напряжение для стали [12].

Согласно 3D-модели, масса измерительной части ~ 14 г, тогда из формул (3)—(5) $M_{Т0} = 1,15 \cdot 10^{-6}$ Н·м:

$$M = fRF_{пр}, \quad (5)$$

где $F_{\text{пр}}$ — максимальное радиальное усилие, создаваемое спиральной пружиной.

Для использованной пружины экспериментально определено значение $F_{\text{пр}}=1 \cdot 10^4$ Н, тогда $M_{\text{град}} = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Н·м, $M_{\text{T}} = 1,17 \cdot 10^{-6}$ Н·м. Для прибора этой конструкции с данной пружиной максимальное значение $M_{\text{вр}} = 0,018$ Н·м. Тогда, согласно (1), $\gamma = 0,0065$ %, что существенно ниже значений, определенных для исходной конструкции (см. табл. 1).

Вариант 2. Керновые опоры. Момент трения M_{T} для керновых опор (см. рис. 3, в) можно рассчитать по формуле [12]:

$$M_{\text{T}} = M_{\text{в}} + M_{\text{тр.с}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{в}}$ — момент выкатывания, $M_{\text{тр.с}}$ — момент трения скольжения, в свою очередь [12, 16]:

$$M_{\text{в}} = P \frac{\delta_1 \sin \Psi}{K - 1}, \quad (7)$$

$$M_{\text{тр.с}} = 0,521 P f_{\text{тр.с}} \frac{\cos \Psi}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt[3]{\frac{P r_{\text{п}}^2 (E_{\text{к}} + E_{\text{п}}) \cos \Psi}{K \delta_1 E_{\text{к}} E_{\text{п}}}}; \quad (8)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{K}{r_{\text{п}} (K - 1)} \delta, \quad \Psi = \operatorname{arctg} \frac{f_{\text{тр.с}}}{\sin \alpha}, \quad (9)$$

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\delta_0}{2} \left[2 r_{\text{п}} \frac{(K - 1)}{K} - \frac{\delta_0}{2} \right]}, \quad (10)$$

$$K = \frac{r_{\text{п}}}{r_{\text{к}}}, \quad (11)$$

где $r_{\text{п}}$, $r_{\text{к}}$ — радиус подпятника и керна; δ_0 — осевой зазор в опорах; $f_{\text{тр.с}}$ — коэффициент трения скольжения в опорах; P — вес подвижной части; $E_{\text{п}}$, $E_{\text{к}}$ — модули Юнга материалов подпятника и керна; Ψ — угол вскатывания керна; α — угол наклона оси от вертикали.

Для $r_{\text{к}} = 0,175$, $r_{\text{п}} = 0,35$ мм после подстановки в (7)—(11) других необходимых параметров получено $M_{\text{T}}=6,68 \cdot 10^{-5}$. Расчет на прочность для данного случая был произведен с помощью зависимостей [14]:

$$a = \sqrt[3]{0,68 \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{r_{\text{к}}} - \frac{1}{r_{\text{п}}}}}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2}. \quad (13)$$

В результате расчета получено $\sigma_{\text{max}}=22866792,67$ г/см², тогда как, согласно [12], $\sigma=40788648,52$ г/см². Следовательно, коэффициент запаса составил $n = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{max}}} \approx 1,78$, что указывает на теоретическую возможность реализации данной конструкции. При этом из формулы (1) для данной конструкции опор $\gamma = 0,37$ %.

Таким образом, первый вариант — опоры часовой конструкции (см. рис. 3, б) — более предпочтителен для реализации.

Определение момента трения в опорах прибора предложенной новой конструкции. Момент трения M_{T} прибора с опорой часовой конструкции определен экспериментально по методике, описанной ранее (рис. 4, φ_1 — сплошная кривая, φ_2 — пунктир).

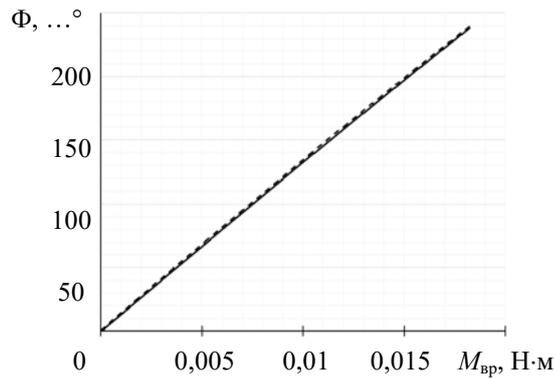


Рис. 4

Результаты расчета погрешности прибора, вызванной трением с опорой часовой конструкции, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментального определения погрешности от трения
в опорах предлагаемой конструкции**

φ_1, \dots°	φ_2, \dots°	$M_{вр}, Н·м$	$M_T, Н·м$	$\gamma, \%$
0	0,5	0	0,000076245	—
4	5,5	0,000361989	0,0000228735	6,318838418
24	25,5	0,001851713	0,0000228735	1,235261646
44	46,5	0,003341437	0,0000381225	1,140901381
64	65,5	0,004831161	0,0000228735	0,473457634
84	86	0,006320885	0,000030498	0,482495738
106	108,5	0,007810609	0,0000381225	0,488086152
123,5	125,5	0,009300333	0,000030498	0,32792375
142,5	145	0,010790057	0,0000381225	0,353311395
160,5	161,5	0,012279781	0,000015249	0,124179742
181,5	183	0,013769505	0,0000228735	0,166117087
199	201	0,015259229	0,000030498	0,199865935
220	222	0,016748953	0,000030498	0,182088998
238,5	240	0,018238677	0,0000228735	0,12541206

Зависимость погрешности, обусловленной трением в опорах, от приложенного момента вращения ($M_{вр}$) для исходной (пунктир) и предложенной конструкций (сплошная кривая) представлена на рис. 5.

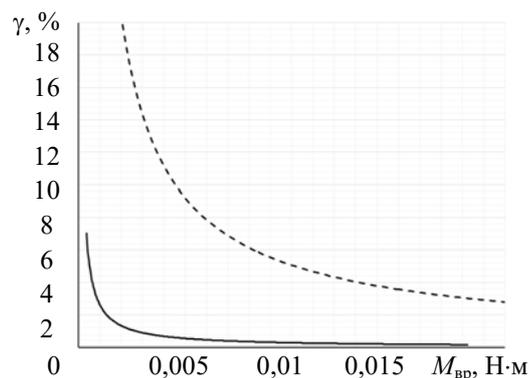


Рис. 5

Выводы

1. В случае малых значений вращающего момента в исходной конструкции шарикоподшипники вносят существенные погрешности измерений при работе ротационного вискозиметра.

2. Предложенная конструкция обеспечивает значительное повышение точности прибора за счет снижения трения в опорах часового типа измерительной части.

3. Точность измерения свойств жидких смазочных материалов может снижаться (по сравнению с густыми) вследствие увеличения момента трения в опоре вискозиметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березовский Ю. М. Погрешность ротационного вискозиметра // Компетентность. 2005. № 5(22). С. 20—25.
2. Грачев И. Н., Пирогов А. Н., Леонов А. А. Применение метода возвратно-вращательного движения цилиндрического тела для контроля процесса свертывания молока // Изв. вузов. Пищевая технология. 2007. № 5-6. С. 94—96.
3. Пат. RU 88806 S. Ротационный вискозиметр на полезную модель / В. Н. Водяков, П. Н. Пяткин, В. В. Кузнецов, С. Б. Сысуев. Опубл. 21.07.2009.
4. Пат. RU 36527 U1. Ротационный вискозиметр / С. Ф. Яцун, Е. Н. Политов, В. А. Шеполухин. Опубл. 10.03.2004.
5. Пяткин П. Н., Пяткин Н. П., Строганова О. В. Определение реологических параметров пищевых продуктов на ротационном комбинированном вискозиметре // Матер. междунар. науч.-практ. конф. „Наука сегодня: проблемы и перспективы развития“. Вологда, 2016. С. 97—99.
6. Артюнин А. И., Суменков О. Ю. Учет сил сопротивления в опорах маятников при исследовании процесса автоматической балансировки роторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63, № 3. С. 53—58. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).
7. Бейзельман Р. Д., Цыпкин Б. В., Перель Л. Я. Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 896 с.
8. Опоры осей валов машин и приборов / Под общ. ред. Н. А. Спицына, И. М. Машкова. Л.: Машиностроение, 1970. 896 с.
9. Решетов Д. Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1976. 655 с.
10. Галахов Н. А., Бурмистров А. И. Расчет подшипниковых узлов. М.: Машиностроение, 1988. С. 271.
11. Артюнин А. И. Исследования движения ротора с автобалансиром // Изв. вузов. Машиностроение. 1993. № 1. С. 15—18.
12. Лазарев Е. К. Влияние динамических нагрузок на метрологические и эксплуатационные характеристики аналоговых приборов // Вестн. УлГТУ. 2000. № 2. С. 61—69.
13. Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов / Под ред. Н. Н. Понамарева. Л., 1943.
14. Арутюнов В. О. Расчет и конструирование электроизмерительных приборов. М.—Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1956.
15. Бондаренко Л. Н., Демин Г. К., Буратинский А. П. Момент трения в подшипниках скольжения // Вісник ПДАБА. 2016. № 9(222) [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/moment-treniya-v-podshipnikah-skolzheniya>>.
16. Чистяков В. В. Кинетика динамически неуравновешенного ротора при сухом трении скольжения в опорах оси // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 129—134.

Сведения об авторах

Марк Геннадьевич Евсин

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Высшая школа машиностроения; Институт машиностроения, материалов и транспорта;
E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru

Маргарита Александровна Скотникова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения; Институт машиностроения, материалов и транспорта;
E-mail: skotnikova@mail.ru

Поступила в редакцию
03.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Евсин М. Г., Скотникова М. А. Совершенствование конструкции опор ротационного вискозиметра // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 367—373.

IMPROVING THE DESIGN OF SUPPORTS FOR A ROTARY VISCOMETER

M. G. Evsin^{1,2}, M. A. Skotnikova¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: skotnikova@mail.ru

² "K-M" Scientific Production company Ltd. of the „Constanta“ Group,
198097, St. Petersburg, Russia

For a rotary viscometer with an elastic element, deviation of the measurements which arises as a result of friction in the measuring unit bearings is considered. Results of estimating the error due to friction moments in the bearings using ball bearings are presented. Methods of mathematical calculation of the error caused by friction for some bearing structures are described. A promising design of the supports of the measuring part of the rotary viscometer is proposed, which allows reduction of the error due to friction. Results of experimental determination of the error from friction in the supports of the proposed design confirms the effectiveness of the design application.

Keywords: rotary viscometer, clockwork support, pivot bearing, instrument accuracy, friction, corundum, leucosapphire

REFERENCES

1. Berezovskiy Yu.M. *Kompetentnost'*, 2005, no. 5(22), pp. 20–25. (in Russ.)
2. Grachev I.N., Pirogov A.N., Leonov A.A. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 2007, no. 5-6, pp. 94–96. (in Russ.)
3. Patent RU88806 S, *Rotatsionnyi viskozimetr* (Rotational Viscometer), Vodyakov V.N., Pyatkin P.N., Kuznetsov V.V., Sysuyev S.B., Published 21.07.2009. (in Russ.)
4. Patent RU 36527 U1, *Rotatsionnyi viskozimetr* (Rotational Viscometer), Yatsun S.F., Politov E.N., Shepolukhin V.A., Published 10.03.2004. (in Russ.)
5. Pyatkin P.N., Pyatkin N.P., Stroganova O.V. *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya* (Science Today: Problems and Development Prospects), Materials of the International Scientific-Practical Conference, Vologda, 2016, pp. 97–99. (in Russ.)
6. Artyunin A.I., Sumenkov O.Yu. *Modern Technologies System Analysis Modeling*, 2019, no. 3(63), pp. 53–58. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).
7. Beyzel'man R.D., Tsyppin B.V., Perel' L.Ya. *Podshipniki kacheniya: Spravochnik* (Rolling Bearings: Reference), Moscow, 1975, 896 p. (in Russ.)
8. Spitsyn N.A., Mashkov I.M., ed., *Oporo osey valov mashin i priborov* (Supports of Shaft Axles of Machines and Devices), Leningrad, 1970, 896 p. (in Russ.)
9. Reshetov D.N. *Detali mashin* (Machine Parts), Moscow, 1976, 655 p. (in Russ.)
10. Galakhov N.A., Burmistrov A.I. *Raschet podshipnikovyx uzlov* (Calculation of Bearing Units), Moscow, 1988, 271 p. (in Russ.)
11. Artyunin A.I. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 1993, no. 1, pp. 15–18. (in Russ.)
12. Lazarev E.K. *Vestnik Ul'yanovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2000, no. 2, pp. 61–69. (in Russ.)
13. Ponamarev N.N., ed., *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektroizmeritel'nykh priborov* (Theory, Calculation and Design of Electrical Measuring Instruments), Leningrad, 1943. (in Russ.)
14. Arutyunov V.O. *Raschet i konstruirovaniye elektroizmeritel'nykh priborov* (Calculation and Design of Electrical Meters), Moscow–Leningrad, 1956. (in Russ.)
15. <https://cyberleninka.ru/article/n/moment-treniya-v-podshipnikah-skolzheniya>. (in Russ.)
16. Chistyakov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 2(61), pp. 129–134. (in Russ.)

Data on authors

- Mark G. Evsin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport; E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru
- Margarita A. Skotnikova** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport; E-mail: skotnikova@mail.ru

For citation: Evsin M. G., Skotnikova M. A. Improving the design of supports for a rotary viscometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 367—373 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-367-373