

## КОМПЕНСАЦИЯ МОМЕНТНЫХ НАГРУЗОК УЗЛА КАЧАНИЯ РУЛЕВОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Косенок Б.Б., Долгих Д.Е.*

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
Самара*

**Ключевые слова:** рулевой агрегат, вектор, контур, модель, модули, момент, асимметрия, неуравновешенность, компенсация, динамика.

**Аннотация.** Во многих случаях управление ракетой-носителем осуществляется с помощью рулевого блока жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), который, изменяя вектор тяги, корректирует отклонения космического аппарата от траектории полета. В качестве привода рулевой машины используется рулевая машина с системой рычажных механизмов с демпфером, преобразующим вращательное движение вала рулевой машины в угловое движение сопла рулевого агрегата. В данной работе предлагается оптимизировать параметры узла качения рулевого узла с целью снижения моментных и силовых нагрузок на узел качения. Проведение параметрического синтеза кинематических параметров еще на этапе эскизного проектирования рулевого агрегата позволяет либо снизить энергетические затраты на управление соплом, либо увеличить скорость вращения сопла двигателя при тех же характеристиках привода. Также введение компенсации позволяет уменьшить влияние неуравновешенности и асимметрии, получаемых при изготовлении рулевого агрегата и сопла.

## COMPENSATION OF TORQUE LOADS OF THE SWING UNIT OF THE STEERING UNIT OF THE LIQUID ROCKET ENGINE

*Kosenok B.B., Dolgikh D.E.*

*Samara National Research University named after S.P. Korolev, Samara*

**Keywords:** steering unit, vector, contour, model, modules, moment, asymmetry, unbalance, compensation, dynamics.

**Abstract.** In many cases, the control of the launch vehicle is carried out using the steering unit of the liquid rocket engine (LRE), which, by changing the thrust vector, corrects the deviations of the spacecraft from the flight path. As a steering machine drive, a steering machine with a system of lever mechanisms with a damper is used, which converts the rotational movement of the steering machine shaft into the angular movement of the steering unit nozzle. In this paper, it is proposed to optimize the parameters of the rolling unit of the steering unit in order to reduce the torque and power loads on the rolling unit. Carrying out parametric synthesis of kinematic parameters at the stage of preliminary design of the steering unit allows either to reduce the energy costs of controlling the nozzle, or to increase the rotation speed of the engine nozzle with the same drive characteristics. Also, the introduction of compensation makes it possible to reduce the influence of unbalance and asymmetry obtained during the manufacture of the steering unit and nozzle.

### **Введение**

Для управления полётом ракеты-носителя (РН) в ряде случаев используется рулевой агрегат (РА) жидкостно-реактивного двигателя (ЖРД), который за счёт изменения вектора тяги корректирует отклонение летательного аппарата от траектории полёта. В качестве привода рулевого агрегата используется рулевая машина (РМ) с системой рычажных механизмов с демпфером, трансформирующих вращательное движение вала рулевой машины в угловое перемещение сопла рулевого агрегата (рис. 1).

Известные работы по конструкции ЖРД [1-3] практически не рассматриваются проблемы, возникающие при проектировании и изготовлении рулевого агрегата (РА), его шарнирных узлов качания рулевых камер (сопел). Часть проблем, связанных с этой темой такие, как расчёты осевых усилий в торцевых уплотнениях, моментов трения ( $M_{\text{ТР}}$ ) узлов качания, рассматриваются в работах [4-12]. Тем не менее, особенности производства конструкции ЖРД создают добавочные механические потери, создаваемые моментом асимметрии ( $M_{\text{АС}}$ ) рулевой машины относительно оси серьги и момента неуравновешенности ( $M_{\text{НЕУР}}$ ), возникающего при

изготовлении корпуса сопла. Неучет воздействия моментов  $M_{AC}$  и  $M_{HEUP}$  в совокупности с моментом трения  $M_{TP}$  узлов качания может в процессе эксплуатации приводить к замедлению коррекции и стабилизации траектории РН, что может привести к срыву полетного задания. Решение данной проблемы видится в создании компенсирующего механизма, который позволял в процессе сборки РА сводить воздействие данных моментов к минимуму.

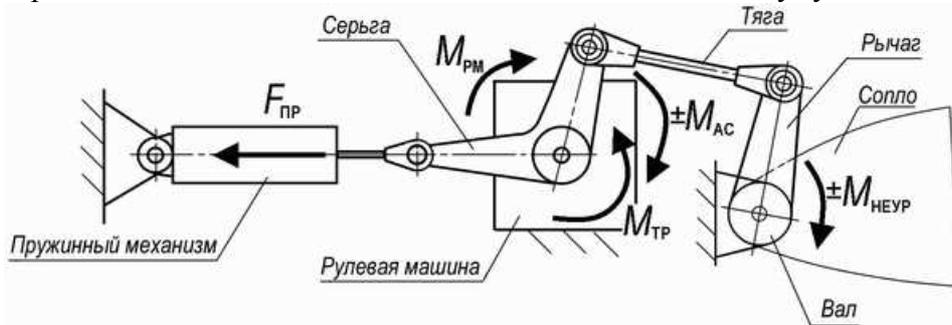


Рис. 1. Кинематическая схема рулевого агрегата (повернуто) с нагрузками

### Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи используется метод модульного векторного моделирования [13], реализованный в программе «Кинематический и динамический анализ механизмов» (КДАМ) [14], созданной на кафедре основ конструирования машин Самарского университета. Программа КДАМ решает задачи кинематического и динамического анализа и синтеза для плоских и пространственных механизмов, путём их моделирования стандартными векторными замкнутыми контурами – модулями, позволяющих получать однозначные решения нахождения неизвестных параметров.

В программе КДАМ была создана кинематическая векторная модель, дополненная массовыми характеристиками каждого звена, координатами центров масс, а также значениями и координатами приложения активных нагрузок, которая позволяет провести динамический анализ рычажного механизма с пружинным демпфером. На рисунке 2 показано представление механизма РА в программе КДАМ.

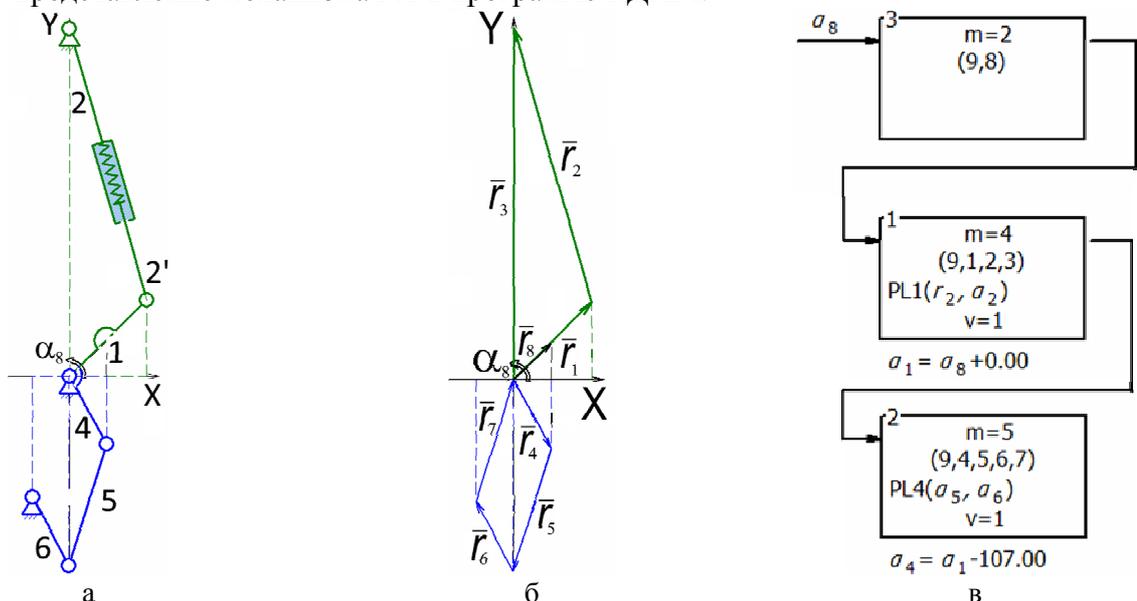


Рис. 2. Представление РА в программе КДАМ: а) структурная схема РА, б) векторная модель РА, в) параметрическая формула векторной модели РА

Силовые и моментные нагрузки, которые будут, учитываться в динамическом анализе РА, были представлены на рисунке 1.

Сила упругости пружины рассчитывается по закону Гука:

$$F_{\text{пр}} = -k(L_{\text{пр}0} - L_{\text{пр}}(\alpha_1)),$$

где  $k$  – коэффициент жёсткости пружины;  $L_{\text{ПР}0}$  – начальная длина пружины;  $L_{\text{ПР}}(\alpha_1)$  – длина пружины, при текущем угле поворота  $\alpha_1$  серьги.

На рисунке 3,а показано представление в программе КДАМ кривой изменения углового перемещения рулевой машины, в векторной модели РА являющейся аргументом модели и изменением угла вектора  $\delta - \alpha_8$ , а на рисунке 3,б –  $F_{\text{ПР}}$  в зависимости от числа положений механизма.

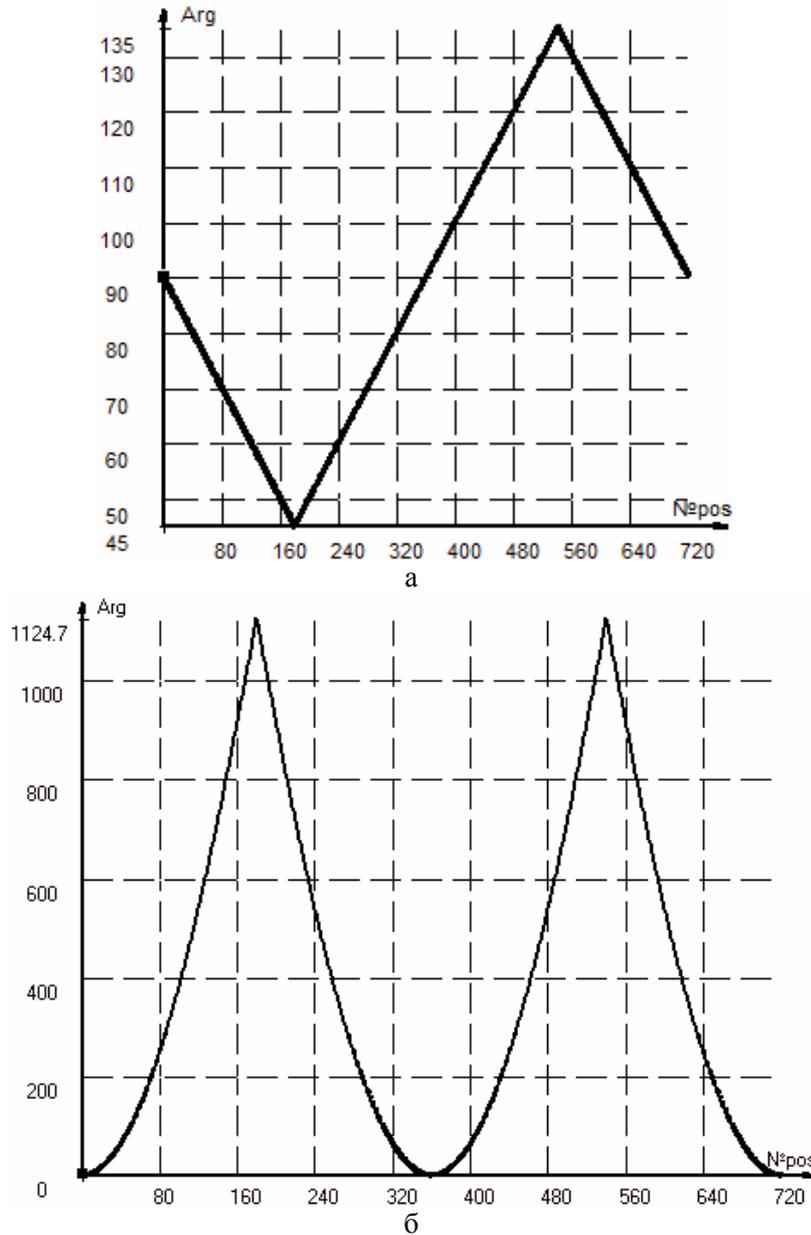


Рис. 3. Представление в программе КДАМ: а) закона изменения угла  $\alpha_8$ , б) нагрузок на РА  $F_{\text{ПР}}$

Были проведены численные эксперименты пяти вариантов нагружения, и получены значения суммарных моментов кручения ( $M_{\text{КР}}$ ) и момент уравнивающий ( $M_{\text{УР}}$ ), все моменты рассчитывались с учётом инерционных нагрузок, в рамках приведения к одномассовой модели динамики.

Вариант №1: нагружение РА моментом от РМ ( $M_{\text{РМ}}$ ), моментом трения от узлов качения ( $M_{\text{ТР}}$ ) и силой упругости пружины ( $F_{\text{ПР}}$ ).

Вариант №2: нагружение РА  $M_{\text{РМ}}, M_{\text{ТР}}, F_{\text{ПР}}, +M_{\text{АС}}, +M_{\text{НЕУР}}$ .

Вариант №3: нагружение РА  $M_{\text{РМ}}, M_{\text{ТР}}, F_{\text{ПР}}, -M_{\text{АС}}, +M_{\text{НЕУР}}$ .

Вариант №4: нагружение РА  $M_{\text{РМ}}, M_{\text{ТР}}, F_{\text{ПР}}, -M_{\text{АС}}, -M_{\text{НЕУР}}$ .

Вариант №5: нагружение РА  $M_{\text{РМ}}, M_{\text{ТР}}, F_{\text{ПР}}, +M_{\text{АС}}, -M_{\text{НЕУР}}$ .

В качестве граничных условий приняты угловые перемещения РМ с фиксированным значением частоты ( $\pm 45^\circ$  и  $\sim \frac{1}{3}$  Гц соответственно), используемые при проведении стандартного полноразмерного огневого испытания РА. Наибольшие отклонения  $M_{\text{КР}}$  и  $M_{\text{УР}}$  были получены для варианта №4 (см. табл. 1).

Табл. 1 Сводные характеристики по вариантам

Вариант	$M_{\text{АС}}$ , Нм	$M_{\text{НЕУР}}$ , Нм	$M_{\text{УР}}$ , Нм	$M_{\text{КР}}^{\text{max}}$ , Нм	$M_{\text{КР}}^{\text{min}}$ , Нм
1	0	0	0.08	142	-224
2	+30	+7,4	36	179	-187
3	-30	+7,4	-22,3	170	-246
4	-30	-7,4	38	362	-286
5	+30	-7,4	22,08	241	-202

Были выбраны четыре параметра РА, которые можно будет менять в процессе настройки на стадии испытаний (разумеется, с соответствующим вводом изменений в конструкцию при проектировании РА): 1) длина звеньев; 2) угол развала серьги; 3) натяжение пружины; 4) угол точки подвеса пружины на серьге  $\alpha_1$ .

Критерием параметрического синтеза выбрано получение минимально возможного  $M_{\text{УР}}$ . Синтез проводился для всех четырех случаев с использованием блока автоматизированного параметрического синтеза в КДАМ-е. При этом изменение кинематических параметров от исходных не должно было отличаться более, чем на 5 процентов в сторону уменьшения или увеличения для длин звеньев и 20 процентов для угла точки подвеса.

### Результаты

Полученные результаты показали, что первые три случая не дают значительного снижения уравнивающего момента, в то время как для четвертого случая, такое положение угла точки подвеса пружина найдено и получен  $M_{\text{УР}}=0,035$  Нм, что даже немного меньше, чем для первого варианта (см. табл. 1), при этом  $M_{\text{КР}}^{\text{max}}=278$  Нм,  $M_{\text{КР}}^{\text{min}}=-380$  Нм для установочного угла точки подвеса пружины  $\alpha_1 = \alpha_8 + 8^\circ$ .

Полученный в результате механизм показан на рисунке 4. Измененная диаграмма силы упругости пружины приведена на рисунке 5, а на рисунке 6 приведены зависимости  $M_{\text{КР}}$  для РА с нагрузками 1-го варианта, 3-его варианта, и полученного механизма.

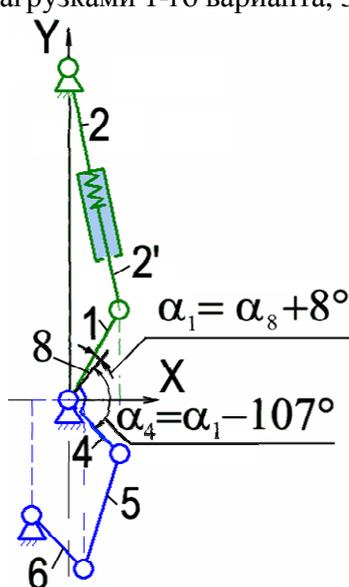


Рис. 4. Вид полученного механизма

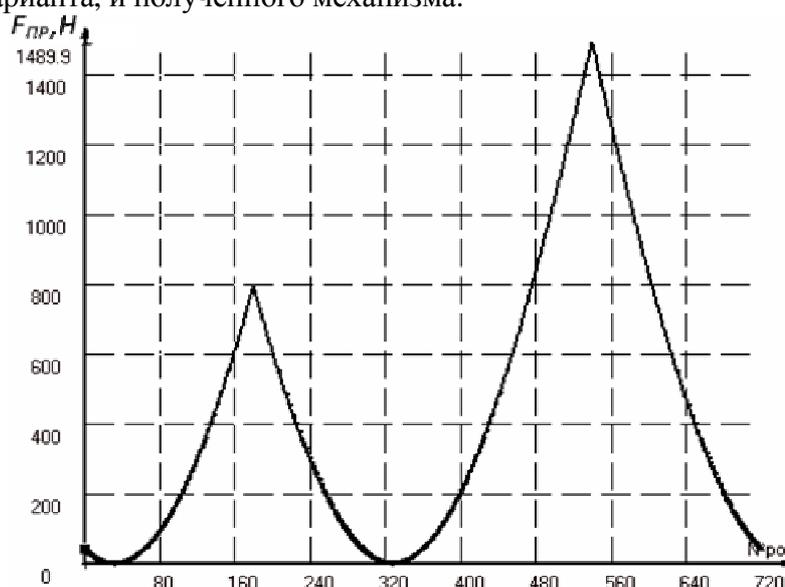


Рис. 5. Сила упругости пружины ( $F_{\text{пр}}$ ), при измененном угле точки подвеса пружины

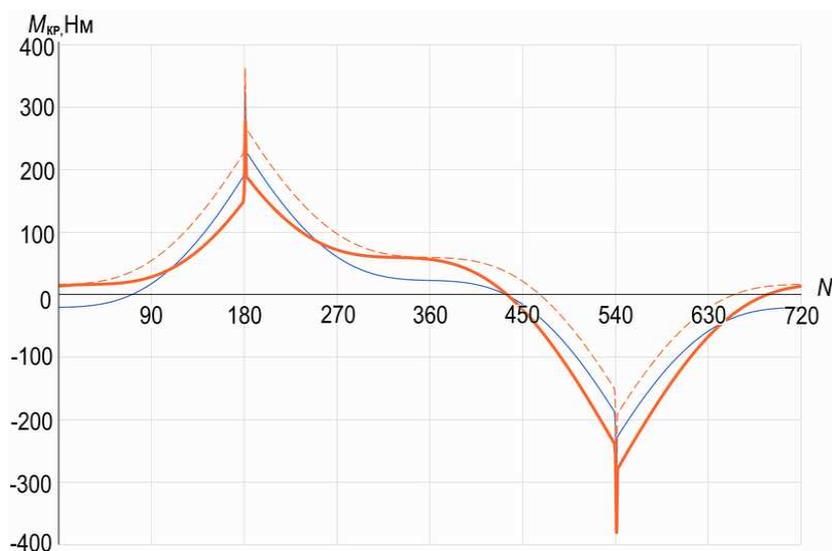


Рис. 6. Зависимости крутящего момента  $M_{кр}$  от угла поворота серьги: — для варианта 1, — для варианта 3, — полученного механизма.

Как видим, получилось компенсировать вредное влияние моментов от асимметрии рулевой машины относительно оси серьги и неуравновешенности сопла, возникающих при изготовлении агрегата.

### Заключение

Продемонстрированный подход позволяет решать вопрос снижения возникающих дополнительных нагрузок при проектировании, изготовлении и эксплуатации РА. Проведение параметрического синтеза кинематических параметров с динамическими критериями ещё на стадии эскизного проектирования рулевого агрегата позволяет или снизить энергетические затраты на управление соплом, или увеличить скорость поворота сопла двигателя при тех же характеристиках привода, а введение компенсационного устройства, позволяет снизить влияние неуравновешенности и асимметрии, полученных при изготовлении сопла.

### Список литературы

1. Гахун Г.Г., Баулин В.И., Володин В.А., Курпатенков В.Д., Краев М.В., Трофимов В.Ф. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Под общ. ред. Г.Г. Гахуна. – М.: Машиностроение, 1989. – 424 с.
2. Павутницкий Ю.В., Мазарченков В.А., Шиленков М.В., Герасимов А.Б. Павутницкий Ю.В. Отечественные ракеты-носители. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 1996. – 178 с.
3. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для студентов вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 448 с.
4. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б., Гордеев В.В., Фурманов Б.А., Кармугин Б.В. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
5. Жильников Е.П., Самсонов В.Н. Трение и изнашивание в узлах авиационной техники. – Самара: Изд-во Самарского аэрокосмического университета, 2007. – 143 с.
6. Королев А.А. Экспериментальное исследование влияния геометрии контакта тел и дорожек качения шариковых подшипников на момент трения качения // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, №2. – С. 156-161.
7. Туренко А.П. Момент трения в упорном подшипнике // Исследование сложных технических и технологических систем. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2017. – С. 166-171.
8. Тарабарин В.Б., Фурсяк Ф.И., Тарабарина З.И. Исследование момента сил трения во вращательной паре // Теория механизмов и машин. – 2012. – Т. 10, № 1(19). – С. 88-97.
9. Королев А.В., Туренко А.П. Зависимость момента трения качения упорного подшипника от внешней нагрузки // Actualscience. – 2016. – Т. 2, №12. – С. 137-138.
10. Юрков Ю.В. Исследование динамической погрешности при измерении момента трения подшипников качения // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 35-38.

11. Фурлетова Н.В. Момент трения как фактор потерь энергии в подшипниках качения // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 228-228.
12. Балякин В.Б., Лаврин А.В. Анализ условий комплексного нагружения радиальных подшипников узлов качения рулевых агрегатов ЖРД // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Самара, 23-25 июня 2021 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – С. 99-100.
13. Семенов Б.П., Косенок Б.Б. Методы и средства динамического синтеза механизмов авиационных энергоустановок. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 281 с.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010616342. Программа КДАМ (Кинематический и динамический анализ механизмов) / Б.Б. Косенок, В.П. Тукмаков. – Заявка №2010614593 от 29.07.2010; зарег. 24.09.2010.

#### References

1. Gakhun G.G., Baulin V.I., Volodin V.A., Kurpatenkov V.D., Kraev M.V., Trofimov V.F. Design and design of liquid rocket engines: textbook for students majoring in "Aircraft engines and power plants" / Under total ed. G.G. Gakhun. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 424 p.
2. Pavutnitsky Yu.V., Mazarchenkov V.A., Shilenkov M.V., Gerasimov A.B. Domestic launch vehicles. – SPb.: Ed. center SMTU, 1996. – 178 p.
3. Dobrovolsky M.V. Liquid rocket engines. Fundamentals of design: a textbook for university students. – M.: Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 2005. – 448 p.
4. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Seals and sealing technology: Handbook / Under total ed. A.I. Golubev, L.A. Kondakov. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – 464 p.
5. Zhilnikov E.P., Samsonov V.N. Friction and wear in the nodes of aviation equipment. – Samara: Publ. house of the Samara Aerospace University, 2007. – 143 p.
6. Korolev A.A. Experimental study of the influence of the geometry of the contact of the bodies and raceways of ball bearings on the moment of rolling friction // Friction and wear. 2016, vol. 37, no. 2, pp. 156-161.
7. Turenko A.P. Friction moment in thrust bearing // Research of complex technical and technological systems. – Saratov: Saratov State Technical University and, 2017. – P. 166-171.
8. Tarabarin V.B., Fursyak F.I., Tarabarina Z.I. Investigation of the moment of friction forces in a rotational pair // Theory of Mechanisms and Machines. 2012, vol. 10, no. 1(19), pp. 88-97.
9. Korolev A.V., Turenko A.P. Dependence of the rolling friction moment of a thrust bearing on external load // Actualscience. 2016, vol. 2, no. 12, pp. 137-138.
10. Yurkov Yu.V. Investigation of dynamic error in measuring the moment of friction of rolling bearings // News of higher educational institutions. Engineering. 2005, no. 4, pp. 35-38.
11. Furletova N.V. Friction moment as a factor of energy loss in rolling bearings // Successes of modern natural science. 2011, no. 7, pp. 228-228.
12. Balyakin V.B., Lavrin A.V. Analysis of the conditions of complex loading of radial bearings of the rocking units of the LRE steering units // Problems and prospects for the development of engine building: Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference. In 2 volumes, Samara, June 23-25, 2021. – Samara: Samara National Research University n.a. S.P. Korolev, 2021. – P. 99-100.
13. Semenov B.P., Kosenok B.B. Methods and means of dynamic synthesis of mechanisms of aviation power plants // Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. – 281 p.
14. Certificate of official registration of computer programs No. 2010616342. KDAM Program (Kinematic and Dynamic Analysis of Mechanisms) / B.B. Kosenok, V.P. Tukumakov. – Appl. No. 2010614593 from 29.07.2010; reg. 24.09.2010.

#### *Сведения об авторах:*

#### *Information about authors:*

<b>Косенок Борис Борисович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин	<b>Kosenok Boris Borisovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of machine design principles
<b>Долгих Дмитрий Евгеньевич</b> – аспирант	<b>Dolgikh Dmitry Evgenievich</b> – postgraduate student
borkos@yandex.ru	

Получена 30.11.2022