

Научная статья  
УДК 621.43

## Повышение эффективности уплотнения в сопряжении поршневое кольцо – гильза цилиндра путем снижения погрешностей при расчете формы кольца в свободном состоянии

Павел Дмитриевич Никитин<sup>1</sup>, Артур Рафикович Асоян<sup>2</sup>  
Дмитрий Анатольевич Никитин<sup>3</sup>, Валентин Владимирович Сафонов<sup>4</sup>,  
Василий Васильевич Чекмарев<sup>5</sup>, Игорь Артурович Асоян<sup>6</sup>

<sup>1,2,6</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>3,4,5</sup>Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия

<sup>1</sup>skalersar@yandex.ru

<sup>2</sup>asoyan.ar@mail.ru

<sup>3</sup>nilppr@rambler.ru

<sup>4</sup>safonow2010sgau@yandex.ru

<sup>5</sup>chekmarev.v@yandex.ru

<sup>6</sup>ig.asoyan@yandex.ru

**Аннотация.** В настоящее время в Российской Федерации активно ведутся работы по снижению зависимости от импортных комплектующих во всех отраслях народного хозяйства. В частности, зависимости от импортных комплектующих и технологий в отрасли поршневого двигателестроения. Так, одной из наиболее важных деталей в обеспечении нормативных параметров работы цилиндропоршневой группы являются поршневые кольца. Именно они обеспечивают надежное уплотнение камеры сгорания от картерной полости. Авторами показано, что известные из открытой печати методы расчета формы колец в свободном состоянии имеют существенные погрешности, влияющие на качество их изготовления и эффективность их работы в процессе эксплуатации силового агрегата. В связи с чем, целью исследования является поиск путей повышения точности расчета формы поршневых колец в свободном состоянии, для формирования технических решений и предложений производителям поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. В качестве объекта исследования выбрано верхнее поршневое кольцо двигателя КАМАЗ-740. В работе авторами предложены некоторые пути повышения точности расчета, оказывающие положительное влияние на эффективность уплотнения камеры сгорания поршневого двигателя внутреннего сгорания.

**Ключевые слова:** поршневое кольцо, форма поршневого кольца в свободном состоянии, эпюра радиального давления.

**Для цитирования:** Никитин П.Д., Асоян А.Р., Никитин Д.А., Сафонов В.В., Чекмарев В.В., Асоян И.А. Повышение эффективности уплотнения в сопряжении поршневое кольцо – гильза цилиндра путем снижения погрешностей при расчете формы кольца в свободном состоянии // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

## Increasing the sealing efficiency of the piston ring-cylinder liner interface by reducing the errors in calculating the shape of the ring in its free state

Pavel D. Nikitin<sup>1</sup>, Artur R. Asoyan<sup>2</sup>, Dmitry A. Nikitin<sup>3</sup>, Valentin V. Safonov<sup>4</sup>,  
Vasily V. Chekmarev<sup>5</sup>, Igor A. Asoyan<sup>6</sup>

<sup>1,2,6</sup>Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>3,4,5</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

<sup>1</sup>skalersar@yandex.ru

<sup>2</sup>asoyan.ar@mail.ru

<sup>3</sup>nilppr@rambler.ru

<sup>4</sup>safonow2010sgau@yandex.ru

<sup>5</sup>chekmarev.v@yandex.ru

<sup>6</sup>ig.asoyan@yandex.ru

**Abstract.** Currently, the Russian Federation is actively working to reduce its dependence on imported components in all sectors of the national economy. In particular, the dependence on imported components and technologies in the piston engine manufacturing industry. One of the most important components in ensuring the proper functioning of the cylinder-piston group is the piston rings. These rings provide a reliable seal between the combustion chamber and the crankcase. The authors have shown that the methods of calculating the shape of rings in a free state, known from the open literature, have significant errors that affect the quality of their manufacture and the efficiency of their operation during the operation of the power unit. Therefore, the purpose of this study is to find ways to improve the accuracy of calculating the shape of piston rings in a free state, in order to develop technical solutions and suggestions for manufacturers of piston rings for internal combustion engines. The upper piston ring of the KAMAZ-740 engine was selected as the object of research. In this work, the authors propose some ways to improve the accuracy of calculations, which have a positive effect on the efficiency of sealing the combustion chamber of a piston internal combustion engine.

**Keywords:** piston ring, free piston ring shape, radial pressure plot.

**For citation:** Nikitin P.D., Asoyan A.R., Nikitin D.A., Safonov V.V., Chekmarev V.V., Asoyan I.A. Increasing the sealing efficiency of the piston ring-cylinder liner interface by reducing the errors in calculating the shape of the ring in its free state. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 1 (47).

### Введение

Проблема изготовления поршневого кольца, имеющего такую форму в свободном состоянии, которая при введении кольца в гильзу цилиндра обеспечит не только полное прилегание, но и требуемое распределение радиального давления на его стенки, стоит ровно столько, сколько производят поршневые двигатели [2, 3, 6, 7, 8–10]. Как известно, родоначальником производства поршневых колец принято считать английского инженера Джона Рэмсботтома, который устанавливал поршневые кольца на паровые двигатели за 25 лет до изобретения Николасом Отто двигателя внутреннего сгорания еще в 1852 году. Таким образом, история использования поршневых колец насчитывает более 170 лет. И на протяжении всего этого времени задача расчета формы поршневых колец остается актуальной, совершенствуются технологии их производства и теории расчета формы в свободном состоянии [11–13].

На начальном этапе изготовления поршневых колец использовались эмпирические методы расчета формы, которые производители выводили на основе опытов. Родоначальником расчёта поршневых колец можно считать К. Рейнхарда. Позже теория расчёта развивалась такими учёными, как Прескотт, Мелдах, Арнольд и другими. При этом использовались такие положения теории деформируемого твердого тела, как теоремы о взаимности перемещений Бетти и Максвелла. Наиболее полный обзор методов расчетов был дан Загребиним Г.Г. в работе [1].

Многие из предлагаемых методов расчета содержат погрешности, определяемые допущениями используемых теорий. Наибольшее внимание заслуживают методики, основанные на использовании уравнения изгиба кривого бруса (1), [1]:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ}, \quad (1)$$

где  $\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho}$  – изменение кривизны кольца при его переходе из свободного состояния в сжатое;

$M$  – изгибающий момент в соответствующем сечении кольца, возникающий при его деформации при переходе из свободного состояния в сжатое;

$E$  – модуль упругости материала кольца;

$J$  – момент инерции сечения кольца.

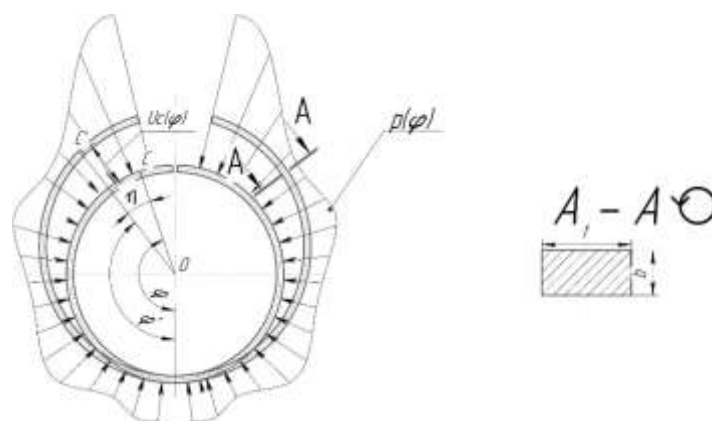
Или на его более широком трактовании:

$$p(\varphi) = \left[ \frac{d^4 u}{d\varphi^4} + 2 \frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u(\varphi) \right] \frac{EJ}{br^4}, \quad (2)$$

где  $u(\varphi)$  – радиальное перемещение точки кольца с угловой координатой  $\varphi$  при его переходе из свободного состояния в рабочее;

$p(\varphi)$  – радиальное давление кольца на гильзу цилиндра в точке с угловой координатой  $\varphi$ .

Величины, входящие в уравнение (2), иллюстрируются рис. 1.



*Рис. 1. Схема перехода кольца из свободного положения в сжатое*

Данное уравнение не имеет аналитического решения. Профессор Гинцбург Б. Я. нашёл решение уравнения (2) для  $p(\varphi) = \text{const}$ , однако для других распределений давления ему не удалось найти достоверного решения. Прорывом стало решение этой задачи, опубликованное в [4, 5]. В продолжении рассматривалось решение данного уравнения методом конечных разностей.

Учитывая, что при расчете поршневого кольца решается задача определения его формы в свободном состоянии, обеспечивающей при установке кольца в гильзу требуемое распределение давления на гильзу цилиндра  $p(\varphi)$ . Соответственно, уравнение (2) решается относительно перемещений точек кольца  $u(\varphi)$  при его переходе из свободного состояния в сжатое. В работах [4, 5] авторы предложили заменить в уравнении (2) их производные следующими разностными выражениями:

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} = \frac{1}{H^2} (u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}) \quad (3)$$

$$\frac{d^4u}{d\varphi^4} = \frac{1}{H^4} [u_{i-2} - 4u_{i-1} + 6u_i - 4u_{i+1} + u_{i+2}], \quad (4)$$

где  $H$  – шаг численного дифференцирования.

С учетом (3) и (4) уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{1}{H^4} [u_{i-2} + u_{i-1}(2H^2 - 4) + u_i(H^4 - 4H^2 + 6) + u_{i+1}(2H^2 - 4) + \\ + u_{i+2}] = \frac{P(\varphi)br_0^4}{EJ} \end{aligned} \quad (5)$$

Недостающие «слева» точки средней линии кольца восполняли в силу её симметрии относительно оси кольца «замок – спинка», а «справа» – используя следующие полиномиальные зависимости:

$$u_{N+1} = (2 - H^2)u_n - u_{N-1} \quad (6)$$

$$U_{N+2} = (2 - H^2)^2u_N + (2H^2 - 4)u_{N-1} + U_{N-2} \quad (7)$$

Таким образом уравнение (2) приводится к системе линейных уравнений (СЛАУ), в матричной форме, имеющей следующий вид:

$$A \cdot B = U, \quad (8)$$

здесь  $A$  – матрица левых частей уравнения (5),  $B$  – матрица требуемых давлений кольца,  $U$  – матрица искомым перемещений точек кольца.

Тогда искомые перемещения определяются следующим образом:

$$U = A^{-1} \cdot B \quad (9)$$

Однако анализ вычисления производных по выражениям (3) и (4) с учетом (6) и (7) дают существенные вычислительные погрешности (рис. 2).

Как видно из этого рисунка, погрешность вычисления второй производной вполне приемлема, она не превышает 2,5%. Погрешность вычисления четвертой производной уже значима и составляет 3,5%. А вот погрешность расчета в целом достигает 11%, что неприемлемо в современных условиях эксплуатации данных деталей. Связано это с тем, что кольцо должно не просто надежно «прилегать» к поверхности гильзы, но и обладать одной из важнейших качественных характеристик – приспособляемостью. Этот термин ввел профессор Гинцбург Борис Яковлевич и определил его как способность поршневого кольца прилегать к гильзе цилиндра без просвета и сохранять непрерывный контакт при её деформации в результате износа и воздействия монтажных и температурных напряжений.



Рис. 2. Погрешности вычисления производных и результатов расчетов в целом

Таким образом, точность метода, предложенного в работах [4, 5] нельзя признать удовлетворительной применительно к современным требованиям.

Целью настоящего исследования является поиск путей повышения точности расчета формы поршневых колец в свободном состоянии.

**Выявление причин возникновения погрешностей и поиск путей их минимизации.** В качестве объекта исследования было выбрано верхнее поршневое кольцо двигателя КАМАЗ-740. Расчет формы поршневого кольца

в свободном состоянии с равномерной ЭРД ( $z = 1$ ) и обладающим давлением  $0,016375 \text{ Н/м}^2$  проводили аналитически. После чего полученные значения аппроксимировали полиномом (фрагментом тригонометрического ряда Фурье) следующего вида:

$$u(\varphi) = C_0 + C_1 \varphi \sin(\varphi) + \sum_{k=2}^n C_k [1 - \cos((k-1)\varphi)] \quad (10)$$

Данный фрагмент ряда является сходящимся применительно к поставленной задаче, а точность поддается нормированию и определяется используемым количеством членов ряда. Аппроксимация многократно дифференцируемым полиномом потребовалась нам для вычисления относительно точных (с заданной погрешностью) значений второй и четвертой производных.

Сопоставление аналитически определенных значений с исходными показало полную сходимость результатов с результатами, представленными на рис. 2.

По мнению авторов это вызвано чрезмерно большим шагом численного интегрирования (согласно рекомендациям, изложенным в работах [4, 5]), составляющим  $3^\circ$ , и использованием односторонних формул для численного вычисления четвертой производной. В этой связи авторами предлагается использовать шаг дифференцирования в  $1^\circ$ , а для численного дифференцирования использовать формулы, полученные на основании центральных разностей:

$$\frac{d^2 u_i}{d\varphi^2} = \frac{1}{4H^2} [u_{i-2} - 2u_i + u_{i+2}] \quad (11)$$

$$\frac{d^4 u_i}{d\varphi^4} = \frac{1}{16H^4} [u_{i-4} - 4u_{i-2} + 6u_i - 4u_{i+2} + u_{i+4}] \quad (12)$$

Перемещения точек кольца  $u(\varphi)$  согласно рис. 1, вычисленные с учетом данных корректировок в методику расчета, изложенных в [11, 13], представлены на рис. 3.

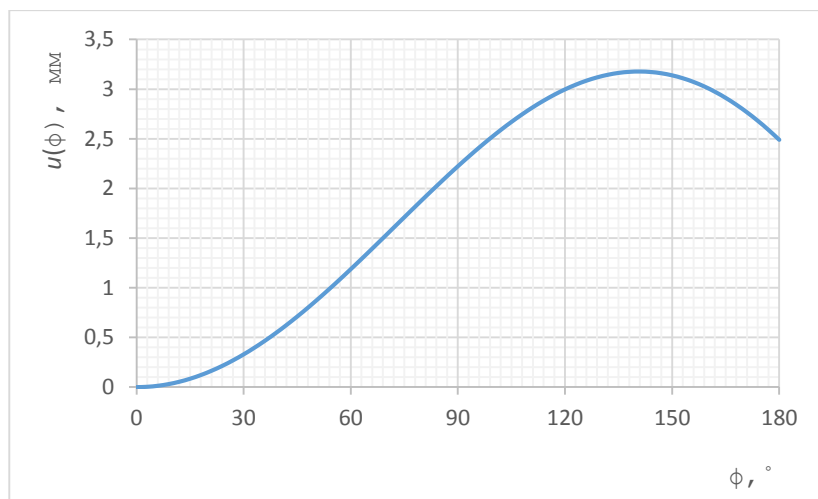


Рис. 3. Перемещения точек кольца при его переходе из свободного состояния в рабочее

Давление, которое, кольцо с такими значениями  $u(\varphi)$  оказывает на стенки гильзы цилиндра определяли по зависимости (2) с учетом (11) и (12). Сопоставление вычисленного давления с заданным представлено на рис. 4. Абсолютная погрешность вычислений при этом не превышает  $1,10036 \cdot 10^{-7}$  Н/м, что составляет всего  $-0,00067\%$ .

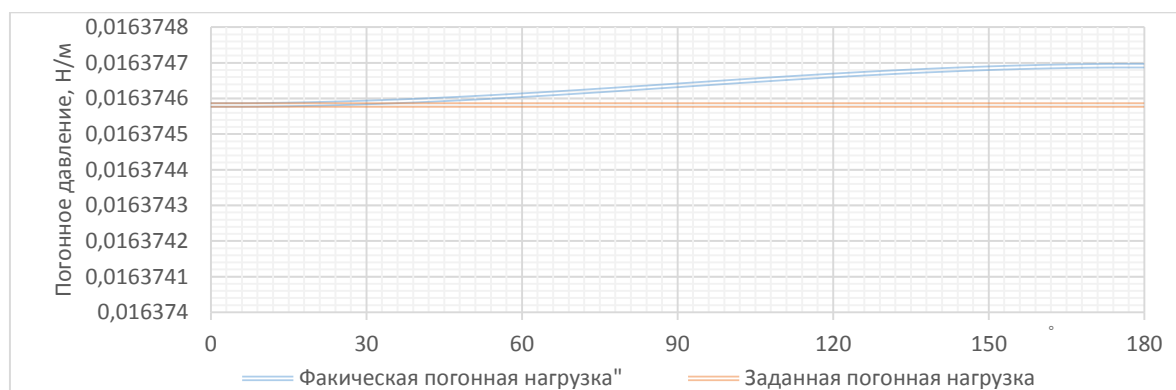


Рис. 4. Сопоставление результатов расчетов

## Заключение

Сопоставление результатов расчетов, представленное на рис. 4 позволяет сделать однозначный вывод о том, что цель, поставленная в настоящей работе достигнута. Авторам удалось существенно снизить методические погрешности расчета формы поршневых колец в свободном состоянии.

Использование предлагаемой методики расчета может быть полезно производителям данного вида продукции. Вместе с тем, авторы ставят перед собой задачу практической апробации данной методики в производственных условиях.

### Список источников

1. Загребин, Г. Г. Научное обоснование процесса формообразования поршневых колец судовых дизелей : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Загребин Герман Георгиевич. – Саратов, 1999. – 405 с. – EDN QDBTZF.
2. Моделирование теплового состояния и расчет на заедание пар трения базовых теплонапряженных деталей поршневых двигателей : Серия: Научная мысль / В. Г. Заренбин, Н. Д. Чайнов, С. Ю. Руссинковский, М. П. Р. Вальехо. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2024. – 202 с. – ISBN 978-5-16-019033-4. – DOI 10.12737/2083543. – EDN WRLTUT.
3. Руссинковский, С. Ю. Моделирование теплового состояния базовых теплонапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания при согласованных граничных условиях теплообмена в сопряжениях / С. Ю. Руссинковский, Н. Д. Чайнов, М. С. Новиков // Двигателестроение. – 2025. – № 2(300). – С. 14-22. – EDN ZRSHKI.
4. Симдянкин, А. А. Повышение качества поршневых колец технологическим обеспечением приспособляемости кольца к цилиндру: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Симдянкин Аркадий Анатольевич ; СГТУ. – Саратов, 1992. – 23 с.
5. Егурнов, Н. В. Математическое моделирование приспособляемости поршневых колец к стенке гильзы двигателя внутреннего сгорания / Н. В. Егурнов., А. А. Симдянкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 2. – С. 114-119.
6. Расчет условий теплообмена в зоне поршневых колец при моделировании теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы двигателей / С. Ю. Руссинковский, Н. Д. Чайнов, В. Г. Заренбин, М. С. Новиков // Двигателестроение. – 2025. – № 4(302). – С. 16-23. – EDN ZKANUI.
7. Повышение износостойкости и эффективности работы поршневого уплотнения двигателей внутреннего сгорания / А. К. Каукаров, Г. Б. Бакыт, Б. У. Жаманбаев [и др.] // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. – 2024. – № 3(148). – С. 253-264. – DOI 10.32523/2616-7263-2024-148-3-253-264. – EDN VIJUDA.

8. Piston rings Kolbenringe. – URL: <https://www.enginepartsuk.net/sites/default/files/goetze-rings-cat.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).

9. Yamamoto, K. Dynamic Contact Analysis of Piston Ring in Distorted Cylinder Bore / K. Yamamoto, M. Ochiai // Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan. – 2019. – Vol. 50, No. 1. – P. 61-66. – DOI 10.1299/jsmemecj.2016.J0720201.

10. Liu, Y. Development and application of ring-pack model integrating global and local processes. Part 1. / Y. Liu, T. Tian // SAE International Journal of Engines. – 2017. – Vol. 10, No. 4. – P. 1927-1939. – DOI 10.4271/2017-01-1043.

11. Оценка целесообразности корректировки формы поршневых колец при их изготовлении на токарно-фрезерном станке HCFX-2 путем использования масштабного устройства / П. Д. Никитин, А. Р. Асоян, Д. А. Никитин [и др.] // Наука в центральной России. – 2025. – № 6(78). – С. 66-72. – DOI 10.35887/2305-2538-2025-6-66-72. – EDN HVZKSY.

12. Курицын, С. Ю. Методика расчета определения размеров конструктивно доработанного поршневого кольца нового уплотнения деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля / С. Ю. Курицын, Ю. И. Матвеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2025. – № 3. – С. 43-50. – DOI 10.24143/2073-1574-2025-3-43-50. – EDN YDVFFQ.

13. Influence of the Piston Ring Shape in a Free State on the Efficiency of Sealing the Combustion Chamber / D. A. Nikitin, P. D. Nikitin, A. R. Asoyan [et al.] // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11–12 ноября 2021 года. – Moscow, 2021. – DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639210. – EDN SJNSOF.

### References

1. Zagrebin G.G. Nauchnoye obosnovaniye protsessa formoobrazovaniya porshnevykh kolets sudovykh dizeley (Scientific substantiation of the process of shaping piston rings of marine diesel engines), Doctor's thesis, Saratov, 1999, 405 p.

2. Zarenbin V. G., Chajnov N. D., Russinkovskij S. Yu., Val'eho M. P. R. *Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya i raschet na zayedaniye par treniya bazovykh teplonapryazhennykh detaley porshnevykh dvigateley* : *Seriya: Nauchnaya mysl'* (odeling of the thermal state and calculation of seizure of friction pairs of basic heat-stressed parts of piston engines: Series: Scientific Thought), Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Nauchno-izdatel'skiy tsentr INFRA-M», 2024, 202 p., ISBN 978-5-16-019033-4, doi 10.12737/2083543.

3. Russinkovskij C.Yu., Chajnov N.D., Novikov M.S. *Dvigatelsestroyeniye*, 2025, no. 2(300), pp. 14-22.
4. Simdyankin A.A. *Povysheniye kachestva porshnevnykh kolets tekhnologicheskim obespecheniyem prisposoblyayemosti kol'tsa k tsilindru (improving the quality of piston rings by technological support of ring adaptability to the cylinder) abstract candidate's thesis*, Saratov, SGTU, 1992, 23 p.
5. Yegurnov N.V., Simdyankin A.A. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2000, no. 2, pp. 114-119.
6. Russinkovskij C.Yu., Chajnov N.D., Zarenbin V.G., Novikov M.S. *Dvigatelsestroyeniye*, 2025, no. 4(302), pp. 16-23.
7. Kaukarov A.K., Bakyt G.B., Zhamanbaev B.U., Samenov G.K., Zabieva A.B., Sauhanov N.S. *Vestnik Yevraziyskogo natsional'nogo universiteta imeni L.N.Gumileva. Seriya: Tekhnicheskiye nauki i tekhnologii*, 2024, no. 3(148), pp. 253-264, doi 10.32523/2616-7263-2024-148-3-253-264.
8. Piston rings Kolbenringe, available at: <https://www.enginepartsuk.net/sites/default/files/goetze-rings-cat.pdf> (15.12.2025).
9. Yamamoto K., Ochiai M. Dynamic Contact Analysis of Piston Ring in Distorted Cylinder Bore, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 61-66, doi 10.1299/jsmemecj.2016.J0720201.
10. Liu Y., Tian T. Development and application of ring-pack model integrating global and local processes. Part 1, *SAE International Journal of Engines*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 1927-1939, doi 10.4271/2017-01-1043.
11. Nikitin P.D., Asoyan A.R., Nikitin D.A., Safonov V.V., Chekmarev V.V., Sinelnikov A.A. *Nauka v tsentral'noy Rossii*, 2025, no. 6(78), pp. 66-72, doi 10.35887/2305-2538-2025-6-66-72.
12. Kuritsyn S.Yu., Matveyev Yu.I. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2025, no. 3, pp. 43-50, doi 10.24143/2073-1574-2025-3-43-50.
13. Nikitin D.A., Nikitin P.D., Asoyan A.R., Solntsev A.A., Snarsky S.V. Influence of the Piston Ring Shape in a Free State on the Efficiency of Sealing the Combustion Chamber, *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021*, Conference Proceedings, Moscow, 2021, doi 10.1109/TIRVED53476.2021.9639210.

Рецензент: И.А. Якубович, д-р техн. наук, проф., МАДИ

*Информация об авторах*

**Никитин Павел Дмитриевич**, ассистент, РУДН.

**Асоян Артур Рафикович**, д-р техн. наук, доц., МАДИ; РУДН.

**Никитин Дмитрий Анатольевич**, д-р техн. наук, доц., Вавиловский университет.

**Сафонов Валентин Владимирович**, д-р техн. наук, проф., Вавиловский университет.

**Чекмарев Василий Васильевич**, д-р техн. наук, доц., Вавиловский университет.

**Асоян Игорь Артурович**, аспирант, РУДН.

*Information about the authors*

**Nikitin Pavel D.**, assistant, RUDN University.

**Asoyan Artur R.**, Doctors of Sciences (Technical), Associate Professor, MADI;  
RUDN University.

**Nikitin Dmitry A.**, Doctors of Sciences (Technical), Associate Professors, SSU GBE.

**Safonov Valentin V.**, Doctors of Sciences (Technical), Professor, SSU GBE.

**Chekmarev Vasily V.**, Doctors of Sciences (Technical), Associate Professors, SSU GBE.

**Asoyan Igor A.**, Postgraduate student, RUDN University.

*Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 25.03.2026.*

*The article was submitted 12.02.2026; approved after reviewing 23.03.2026; accepted for publication 25.03.2026.*