

Научная статья
УДК 621.43

Профилирование юбки составного поршня ДВС

Сергей Владимирович Смирнов¹, Александр Алексеевич Воробьев²

^{1,2}Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

¹smirnov-sv@rudn.ru

²vorobyev-aa@rudn.ru

Аннотация. Основными направлениями развития современного энергетического машиностроения является повышение мощностных, улучшение экономических и экологических показателей с обеспечением высокой надежности работы двигателя. Одним из основных узлов, влияющих как на надежность работы поршневого двигателя, так и на мощностные и экономические показатели является поршневая группа двигателя. В работе представлена методика проектирования юбки поршня, направленная на разработку конструкции, обеспечивающей преимущественно гидродинамический режим трения в сопряжении «юбка поршня – цилиндр». Исследования гидродинамических параметров в сопряжении выполнялись с учетом деформаций юбки поршня от гидродинамических давлений и тепловой нагрузки, а также особенностей вторичного движения юбки поршня. Проведены расчетные и экспериментальные исследования с использованием программного пакета ANSYS, разработанных авторами программ и испытательного стенда. Представлены результаты исследований, выполненные для юбки составного поршня дизеля, и предложен профиль юбки, обеспечивающий преимущественно гидродинамический режим трения в сопряжении «юбка поршня – цилиндр».

Ключевые слова: юбка поршня, цилиндро-поршневая группа, напряженно-деформированное состояние, профилирование юбки поршня.

Благодарности: публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Для цитирования: Смирнов С.В., Воробьев А.А. Профилирование юбки составного поршня ДВС // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Profiling the two-piece piston skirt of an ICE

Sergei V. Smirnov¹, Alexander A. Vorobyev²

^{1,2}Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), Moscow, Russia

¹smirnov-sv@rudn.ru

²vorobyev-aa@rudn.ru

Abstract. The main directions of development of modern power engineering industry are increasing power, improving economic and environmental performance with high reliability of the engine. One of the main components affecting both the reliability of the piston engine and the power and economic performance is the cylinder-piston group. The article presents the piston skirt design methodology aimed at developing a design that provides a predominantly hydrodynamic mode of friction in the "piston skirt-cylinder" conjunction. Studies of the hydrodynamic parameters in the conjunction were performed taking into account the deformations of the piston skirt from hydrodynamic pressures and thermal loading, as well as the peculiarities of the secondary movement of the piston skirt. Computational and experimental studies were carried out using the ANSYS software package, the programs developed by the authors and the test stand. The results of studies performed for the two-piece piston skirt of a diesel engine piston are presented, on the basis of which, for the investigated skirt design the profile that provides mainly hydrodynamic lubrication in conjunction "piston skirt - cylinder" is proposed.

Keywords: Piston skirt, cylinder-piston group, stress-strain state, piston skirt profiling.

Acknowledgements: the publication was made with the support of the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

For citation: Smirnov S.V., Vorobyev A.A. Profiling the two-piece piston skirt of an ICE. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

Одним из перспективных направлений повышения мощностных, улучшение экономических и экологических показателей является снижение механических потерь двигателя, в первую очередь, в цилиндро-поршневой группе, на которую приходится до 50% всей мощности механических потерь [1; 2]. Эффективным способом снижения механических потерь является профилирование юбки поршня в направлении обеспечения преимущественно жидкостного режима трения в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» в течение всего рабочего цикла с учетом деформаций деталей сопряжения [3–5]. При этом важно минимизировать монтажный зазор, который выбирается из условия обеспечения работоспособности при максимальных тепловых и механических нагрузках.

В высоконагруженных дизелях одним из используемых вариантов конструкции является составной поршень с качающейся юбкой, соединенной

со стальной или чугунной головкой поршня через поршневой палец. Данная конструкция по сравнению с монометаллическим поршнем из алюминиевого сплава позволяет снизить уровень температур юбки поршня и уменьшить монтажный зазор в сопряжении «юбка поршня – цилиндр», обеспечить более благоприятные условия трения, тем самым снизить потери на трение. При этом необходимо учитывать особенности вторичного движения юбки составного поршня.

В статье приводится методика проектирования юбки поршня и результаты исследования для составного поршня дизеля 6ЧН 13/15, мощностью 300кВт.

Цель исследования

Разработать методику проектирования юбки поршня, обеспечивающую преимущественно жидкостное трение в сопряжении «юбка поршня-цилиндр» на основе математического моделирования процесса гидродинамического трения в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» с учетом деформаций юбки поршня и особенностей поперечного движения составного поршня.

Постановка задачи исследования

Профилирование юбки поршня проводится с учетом особенностей конструкции поршня и действующих нагрузок.

Отличительными особенностями составного поршня с качающейся юбкой, конструкция которого представлена на рис. 1, по сравнению с монометаллическими поршнями без продольных и поперечных разрезов являются: меньший уровень температур и меньшая жесткость конструкции юбки поршня, что позволяет уменьшить монтажный зазор; расположение центра масс юбки поршня максимально приближено к оси поршневого пальца; на повороты юбки поршня не оказывают влияние поршневые кольца, что в большей степени дает возможность юбке поршня совершать повороты относительно поршневого пальца в направлении улучшения

гидродинамического эффекта «клина» и тем самым способствовать обеспечению гидродинамического режима трения.

Определение гидродинамических параметров масляного слоя в сопряжении «юбки поршня – цилиндр» необходимо проводить с учетом деформаций деталей сопряжения от тепловой нагрузки и гидродинамических давлений масляного слоя и особенностей вторичного движения юбки поршня.

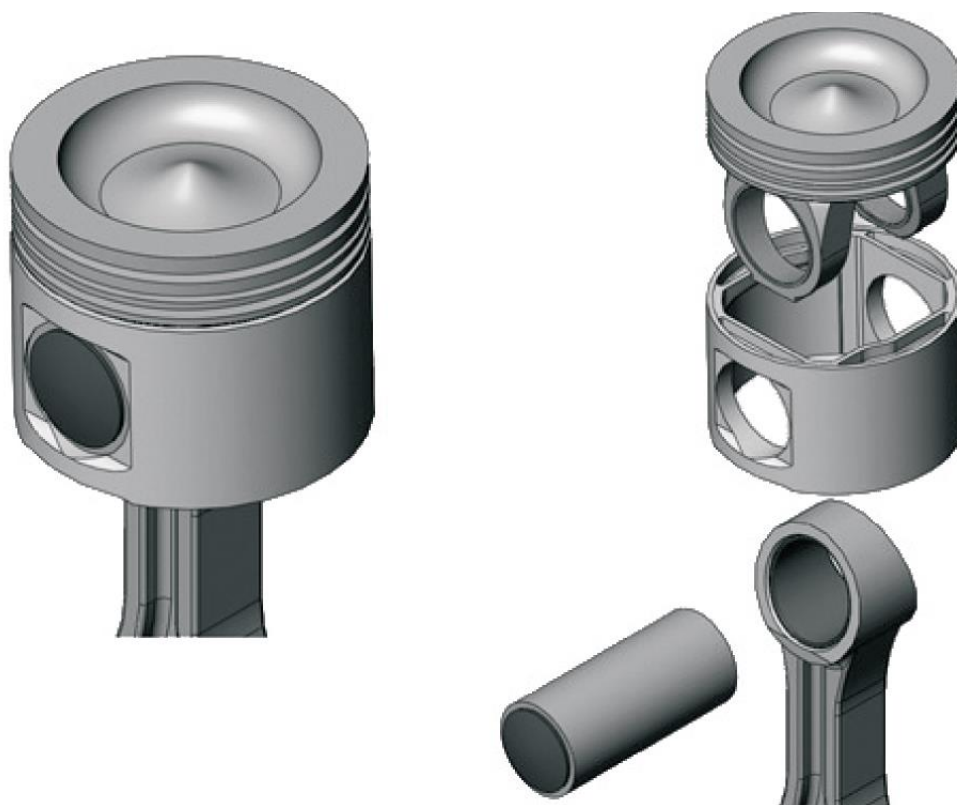


Рис. 1. Конструкция поршня-прототипа

Результаты исследования

Алгоритм методики разработки конструкции юбки поршня с профилированием, обеспечивающим преимущественно жидкостное трение в сопряжении «юбка поршня-цилиндр» представлен на рис. 2.

Первый этап включает в себя разработку конечно-элементной модели (КЭМ) поршня и цилиндра двигателя прототипа для проведения расчетов на прочность от действия тепловой и механических нагрузок. Конструкция

юбки поршня проверяется по запасу прочности от действия максимальной боковой силы. При необходимости проводятся изменения конструкции, обеспечивающие необходимый запас прочности конструкции $n > 1,5$ [6]. Для обеспечения достоверности деформаций и напряжений, рассчитываемых с использованием конечно-элементной модели (КЭМ), в процессе ее создания была выполнена верификация КЭМ на разработанном авторами стенде [7].

В результате выполненных исследований на данном этапе будут:

- получены распределения температур ($t_{\text{ю}}(x, y)$; $t_{\text{ц}}(x, y)$) и тепловых деформаций ($\delta_{\text{ю}}^T(x, y)$; $\delta_{\text{ц}}^T(x, y)$) по поверхности юбки поршня и цилиндра;
- формируется матрица податливости ($[C]$) для узлов конечно-разностной сетки на поверхности трения юбки поршня с помощью разработанной авторами программы [8] и САПР ANSYS с использованием КЭМ исследуемого поршня.

На втором этапе осуществляется профилирование юбки поршня, обеспечивающее преимущественно гидродинамический режим трения в течение всего рабочего цикла на наиболее нагруженном номинальном режиме работы ДВС на основе гидродинамического расчета для сопряжения «юбка поршня-цилиндр» с учетом:

- деформаций юбки поршня от гидродинамического давления масляного слоя в сопряжении;
- тепловых деформаций юбки поршня и цилиндра;
- поперечного движения юбки поршня.

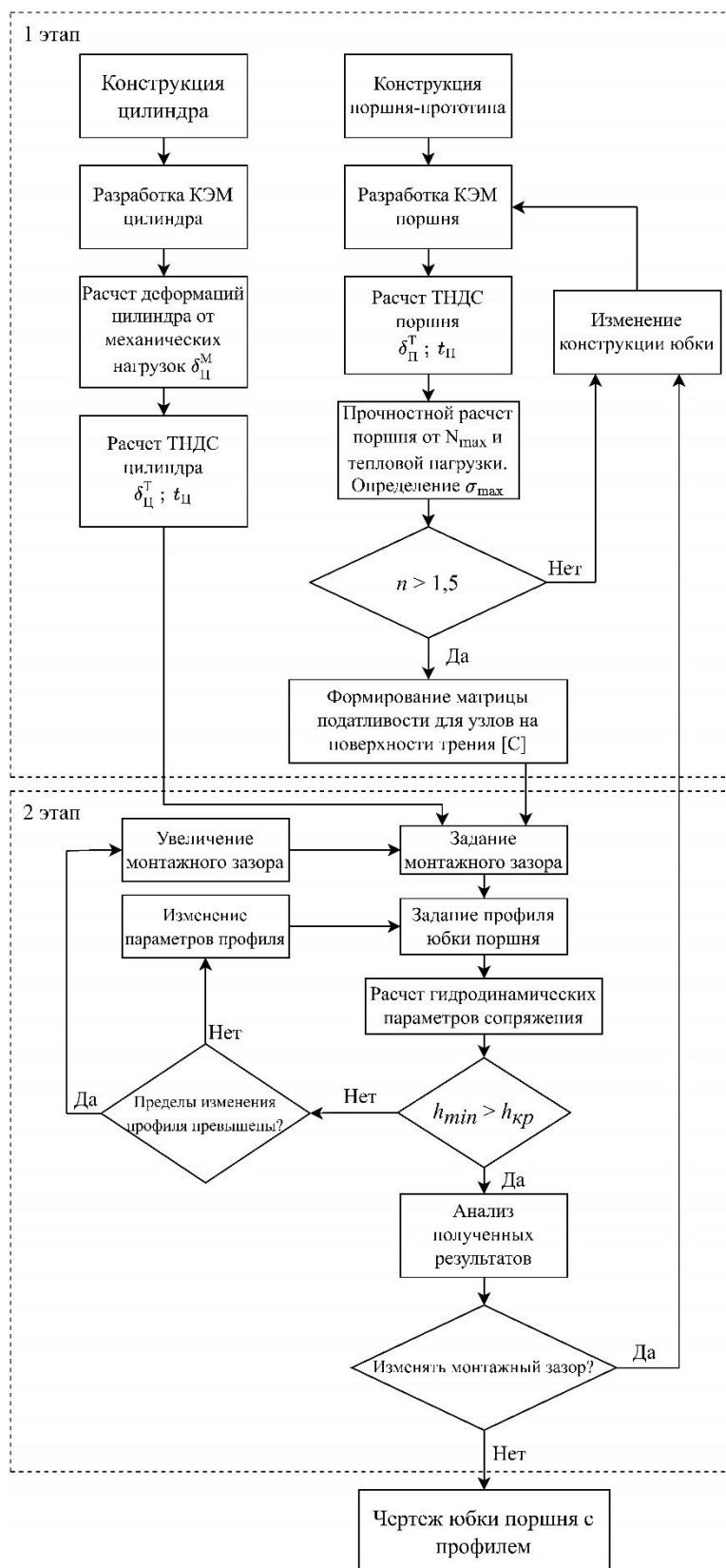


Рис. 2. Блок-схема разработки конструкции поршня с профилированием юбки поршня

Оценка разделения поверхностей трения смазочным слоем должна происходить с учетом их шероховатостей, т.е. выполнения условия [9]:

$$h_m > h_{кр} \quad (1)$$

где h_m – минимальная толщина смазочного слоя в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» за весь рабочий цикл, $h_{кр} = 1.5\sqrt{R_{зю}^2 + R_{зц}^2}$ – критическое значение толщины масляного слоя, равное среднеквадратичной шероховатости поверхностей юбки поршня $R_{зю}$ и цилиндра $R_{зц}$, множитель 1,5 является общепринятым запасом гидродинамической надежности [10].

Продольный профиль задается двумя параболами и параметрами: L_0 ; U_B ; U_H , представленными на рис. 3, а) по расчетному выражению (2), поперечный профиль задается радиальной овальностью профиля в поперечном сечении Δr и рассчитывается по выражению (3) (рис. 3 б).

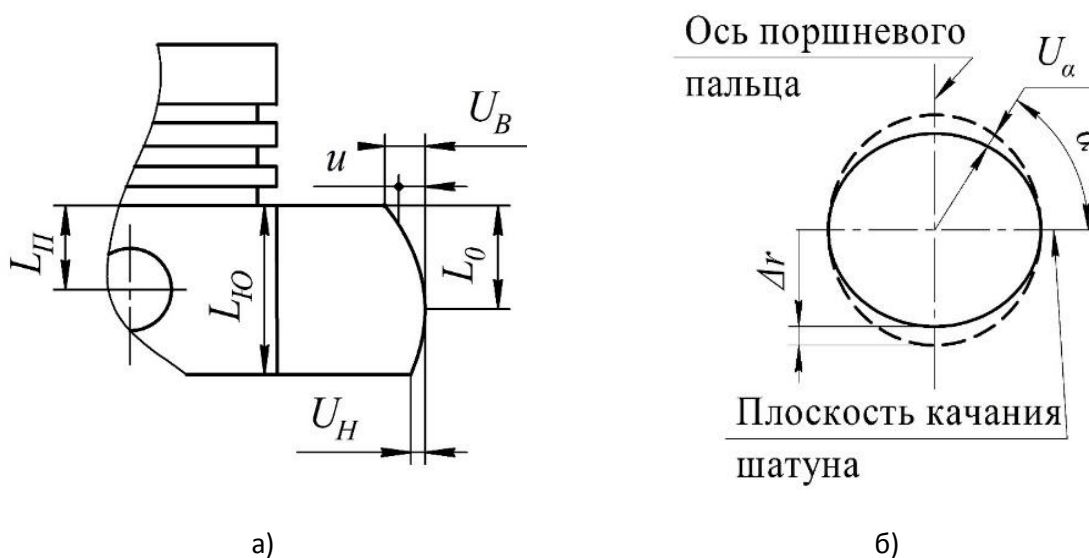


Рис. 3. Параметры профиля юбки поршня:
а) продольный профиль; б) поперечный профиль

$$\begin{aligned} X = [0; L_0]: u &= a_1(X - L_0)^2; a_1 = U_B/L_0^2; \\ X = [L_0; L_{ю}]: u &= a_2(X - L_0)^2; a_2 = U_H/(L - L_0)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_0 – расстояние до точки максимальной высоты профиля, $L_{ю}$ – длина юбки поршня, $L_{п}$ – расстояние до оси поршневого пальца от верхней кромки

юбки поршня, U_B , U_H – максимальные отклонения верхнего и нижнего участков профиля в плоскости качания шатуна.

$$U_\alpha = \frac{\Delta r}{2} (1 - \cos 2\alpha), \quad (3)$$

где Δr – радиальная овальность профиля в поперечном сечении, α – угол относительно плоскости качания шатуна.

Для описания профиля вместо L_0 удобнее использовать относительное положение нулевой точки профиля: $\zeta = L_0/L_\Pi$, введенное д.т.н., проф. Б. Я. Гинцбургом [11].

Математическая модель определения гидродинамических параметров масляного слоя для составного поршня в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» описана в статье [12].

Для начала расчетов задается монтажный зазор двигателя прототипа. Далее последовательно проводятся исследования влияния каждого из выше перечисленных параметров (ζ ; U_B ; U_H ; Δr) на изменение минимальной толщины масляного слоя в сопряжении. В рамках данных исследований возможно рассмотрение переменной овальности поперечного профиля для выполнения условия (1).

При невыполнении условия (1), монтажный зазор увеличивается и исследования повторяются.

После анализа полученных результатов принимается решение по величине монтажного зазора. При необходимости его уменьшения вводятся изменения в конструкцию юбки поршня (изменения жесткости юбки поршня, введения терморегулирующих вставок и т.д.) и исследования повторяются согласно блок-схеме на рис. 2.

После завершения исследования выпускаются чертежи конструкции юбки поршня с профилем поверхности.

В ходе исследований, с использованием предлагаемой методики разработки конструкции поршня, были определены значения монтажного зазора, параметров продольного и поперечного профиля юбки поршня,

обеспечивающих поддержание преимущественно гидродинамического трения в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» на протяжении всего рабочего цикла и обеспечения минимального наклона юбки поршня (γ), с учетом выполнения условия (1).

Влияние параметров профиля на выбранные критерии, приведено на рисунках 4 и 5.

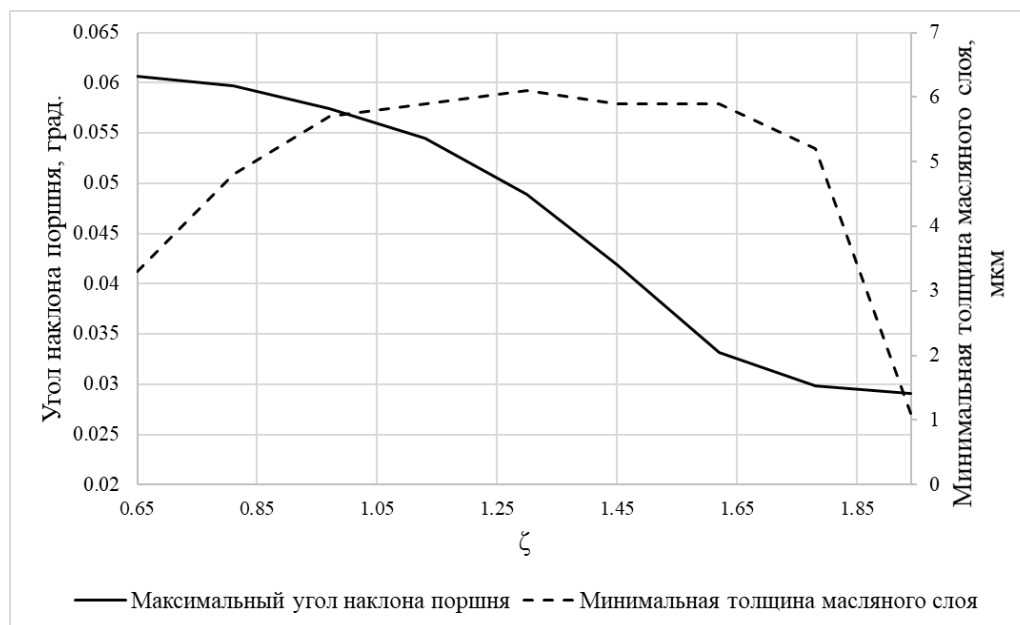


Рис. 4. Изменение минимальной толщины масляного слоя и максимальных значений угла наклона поршня от положения нулевой точки профиля ζ

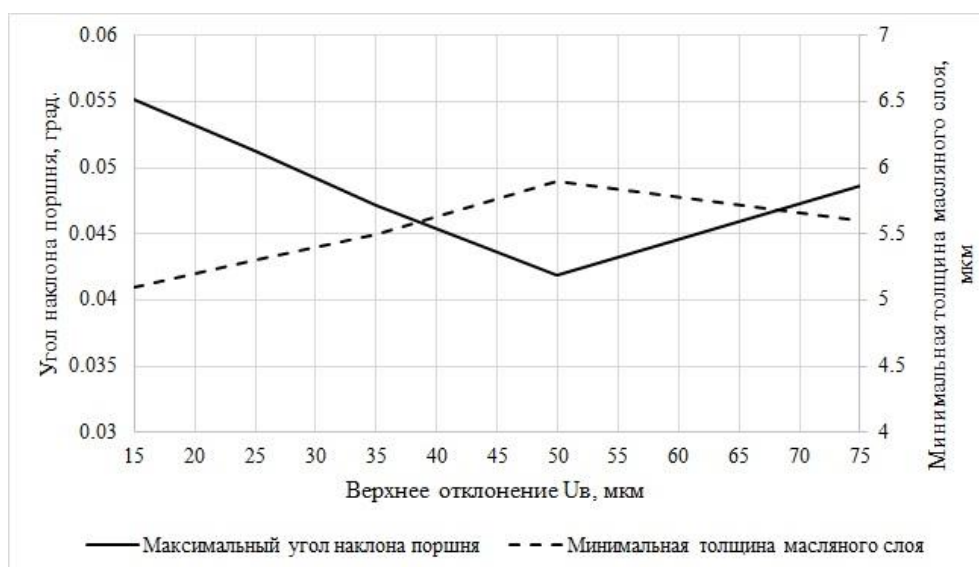


Рис. 5. Влияние верхнего отклонения профиля U_b на максимальный наклон юбки поршня и минимальную толщину масляного слоя нагруженной стороны

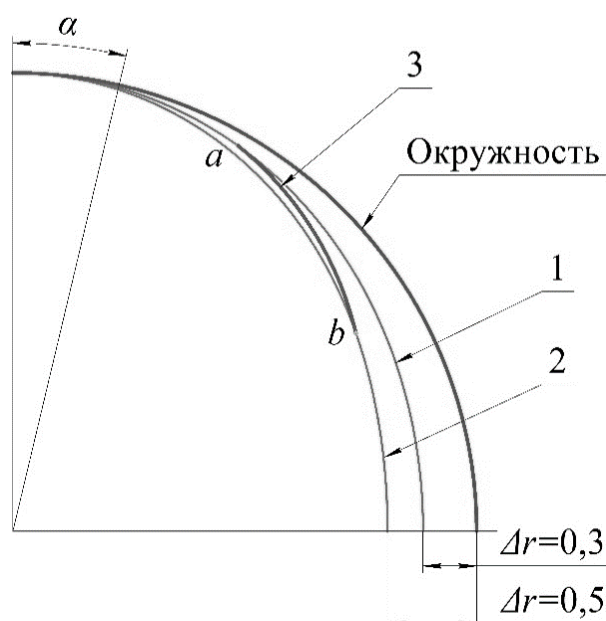
Параметры разработанного профиля (рисунок 3): $\zeta = 1,45$, $U_B = 0,050$ мм, $U_H = 0,015$ мм, переменная овальность в поперечном сечении юбки поршня $\Delta r = 0,3 - 0,5$ мм (рис. 6);

Монтажный зазор $\Delta_{МЗ} = 0,05$ мм;

Диаметр юбки поршня $D = 130$ мм;

Высота юбки поршня - $L_{Ю} = 72$ мм;

Расположение поршневого пальца - $L_{П} = 37$ мм.



- 1 - Овальность $\Delta r = 0,3$ мм;
- 2 - Овальность $\Delta r = 0,5$ мм;
- 3 - Переменная овальность на участке $a-b$ от 0,3 мм до 0,5 мм.

Рис. 6. Поперечный профиль юбки поршня

Выводы

В результате выполненной работы предложена методика разработки конструкции юбки составного поршня с профилированием, обеспечивающим преимущественно жидкостное трение в сопряжении «юбка поршня - цилиндр».

Выполнено профилирование юбки составного поршня дизеля 6ЧН 13/15, мощностью 300кВт.

Список источников

1. Путинцев, С.В. Введение в трибологию поршневых двигателей / С.В. Путинцев – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 183 с.
2. Gosh, M.K. Fundamentals of Fluid Film Lubrication / M.K. Gosh, B.C. Majumdar, M. Sarangi – Tech M, 2014 – 469 с.
3. Макаров, А.Р. Математическое моделирование движения поршня в цилиндре / А.Р. Макаров, С.В. Смирнов, С.В. Осокин // Известия МГТУ. – 2014. – №2 (20). – с.24-29.
4. Engine testing ATZ/MTZ-Fachbuch / Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. с. 115–280.
5. Meiser, J. Friction Power Measurements of a Fired Gasoline Engine Influence of Piston Skirt Geometry / J. Meiser, T. Deuß, H. Ehinis, R. Künzel // MTZ worldwide №79, 2018. с. 50-57.
6. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашиностроение» / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков; под ред. Н.Д. Чайнова. – М: Машиностроение, 2008. – 496 с.
7. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на безмоторном стенде / С. В. Смирнов, В. В. Копылов, А. Р. Макаров [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – Т. 20. – № 4. – С. 285-292. – DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-285-292.
8. Программа для составления матрицы податливости юбки поршня / А.А. Воробьев, С.В. Смирнов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021664565. РФ. зарег. 09.09.2021г.
9. Путинцев, С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний [Электронный ресурс] // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. –Режим доступа: <http://wwwcdl.bmstu.ru/e2/putintsev1.pdf> (дата обращения: 20.06.2018).
10. Путинцев, С.В. Снижение механических потерь в автотракторных двигателях внутреннего сгорания : дис. ... д-ра технических наук: 05.04.02, 05.02.04. / Путинцев Сергей Викторович. – М., 1997. – 385 с.
11. Гинцбург, Б.Я. Профилирование юбок поршней / Б.Я. Гинцбург, Г.Я. Васильченко, Н.С. Судойский, Цимеринов И.А. – М: Машиностроение, 1973. – 89 с.
12. Смирнов, С. В. Профилирование юбки составного поршня двигателя внутреннего сгорания / С. В. Смирнов, И. А. Заев, А. А. Воробьев // Двигателестроение. – 2022. – № 3(289). – С. 15-31. – DOI 10.18698/jec.2022.3.15-31.

References

1. Putinsev, S.V. Vvedenie v tribologiju porshnevyyh dvigatelej (Introduction to Tribology of Piston Engines), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2018, 183p.
2. Gosh, M.K. Fundamentals of Fluid Film Lubrication, Tech M, 2014, 469 p.

3. Makarov A.R., Smirnov S.V., Osokin S.V. *Izvestija MGTU*, 2014, no. 2(20), pp. 24-29.
4. Engine testing ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. pp. 115–280.
5. Meiser J., Deuß T., Ehinis H., Künzel R. Friction Power Measurements of a Fired Gasoline Engine Influence of Piston Skirt Geometry, *MTZ worldwide*, No. 79, 2018. pp. 50-57.
6. Chajnov N.D., Ivashhenko N.A., Krasnokutskij A.N., Mjagkov L.L. *Konstruirovanie dvigatelej vnutrennego sgoraniya* (Designing internal combustion engines), Moscow, Mechanical Engineering, 2008, 496 p.
7. Smirnov S.V., Kopylov V.V., Makarov A. R., Vorobyev A.A., Shkarin K.V. *Vestnik rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: inzhenernye issledovanija*, 2019, No. 4, pp. 285-292.
8. Vorobyev A.A., Smirnov S.V. RU Computer program № 2021664565, 09.09.2021г.
9. Putinsev, S.V. *Mehanicheskie poteri v porshnevnyh dvigateljah: special'nye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy* (Mechanical Losses in Piston Engines: Special Chapters in Design, Calculation, and Testing) Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2011, p.288, available at: <http://wwwcdl.bmstu.ru/e2/putintsev1.pdf>.
10. Putinsev, S.V. *Snizhenie mehanicheskikh poter' v avtotraktornyh dvigateljah vnutrennego sgoraniya* (Reduction of mechanical losses in internal combustion engines), Doctors thesis, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1997, 385 p.
11. Gincburg B.Ja., Vasil'chenko G.Ja., Sudojskij N.S., Cimerinov I.A. *Profilirovanie jubok porshnej* (Piston skirt profiling), Moscow, Mechanical Engineering, 1973. – 89 p.
12. Smirnov S.V., Zaev I. A., Vorobyev A.A. *Dvigatelsestroenie*, 2022, – No. 3(289), pp. 15-31.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Смирнов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц., РУДН.

Воробьев Александр Алексеевич, ассистент, РУДН.

Information about the authors

Smirnov Sergei V., Ph.D., associate professor, PFUR.

Vorobyev Alexander A., assistant, PFUR.

Статья поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 28.03.2023; принята к публикации 30.03.2023.

The article was submitted 02.03.2023; approved after reviewing 28.03.2023; accepted for publication 30.03.2023.