

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 621.713.1: 621.2.082.18

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-57-61

**Расчёт и выбор посадки с зазором с использованием теории гидродинамической смазки****Леонов Олег Альбертович**✉, *д-р техн. наук, профессор*oaleonov@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Шкаруба Нина Жоровна**, *д-р техн. наук, профессор*shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019**Вергазова Юлия Геннадьевна**, *канд. техн. наук, доцент*vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022**Гринченко Лаврентий Александрович**, *ассистент*

grinchenko@rgau-msha.ru

Александрук Кирилл Игоревич, *студент*

9859317318k@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Гидродинамическая смазка увеличивает ресурс соединений. Качество и долговечность работы соединений с гидродинамической смазкой определяются функциональными параметрами, включающими в себя характеристики прочности, жёсткости, износостойкости и точностные характеристики. В указанных соединениях точностными характеристиками являются зазоры, шероховатость поверхности деталей, отклонение формы и расположение поверхностей. С целью обеспечения наибольшего запаса материалов и деталей и наибольшего ресурса рассчитана и выбрана посадка для соединения подшипника скольжения редуктора винтового конвейера сушки зерна, работающего в условиях гидродинамического трения. Для данного соединения расчётным путём выбраны две посадки: $\text{Ø}50\text{H}9/\text{g}9$ и $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$. Исходя из рационального назначения шероховатости поверхности трущихся пар, следует назначить посадку $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$, имеющую коэффициент запаса точности 22. Для посадки $\text{Ø}50\text{H}9/\text{g}9$ соответствует коэффициент запаса точности 7. Рекомендуемая посадка $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$ обеспечивается хонингованием отверстия и тонким шлифованием вала, и именно она даёт наибольший запас материалов деталей на износ и наибольший ресурс соединения.

Ключевые слова: гидродинамическая смазка, посадка, подшипник скольжения, коэффициент запаса точности, запас материалов, ресурс соединения

Формат цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А., Александрук К.И. Расчёт и выбор посадки с зазором с использованием теории гидродинамической смазки // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 5. С. 57-61. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-57-61>.

© Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А., Александрук К.И., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Calculation and selection of a clearance fit using the theory of hydrodynamic lubrication**Oleg A. Leonov**✉, *DSc (Eng), Professor*oaleonov@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Nina Zh. Shkaruba**, *DSc (Eng), Professor*shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019**Yuliya G. Vergazova**, *CSc (Eng), Associate Professor*vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022

Lavrenty A. Grinchenko, Assistant Professor

grinchenko@rgau-msha.ru

Kirill I. Aleksandrok, student

9859317318k@gmail.com

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Hydrodynamic lubrication increases the service life of connections. The quality and durability of connections with hydrodynamic lubrication is determined by functional parameters, including the characteristics of strength, rigidity, wear resistance and accuracy characteristics. In these joints, the accuracy characteristics are gaps, surface roughness of parts, shape deviation and surface arrangement. To ensure the largest supply of materials and parts and the greatest resource, the authors calculated a fit and selected for connecting the plain bearing of the gearbox of the grain drying screw conveyor operating under hydrodynamic friction. For this connection, two fits were chosen by calculation: $\text{Ø}50\text{H}9/\text{g}9$ and $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$. Based on the rational assignment of the surface roughness of rubbing pairs, it is necessary to assign a fit $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$, which has an accuracy factor of 22. For a fit $\text{Ø}50\text{H}9/\text{g}9$, the accuracy factor corresponds to 7. The recommended fit $\text{Ø}50\text{H}7/\text{g}6$ is provided by honing the hole and fine grinding the shaft. It is the fit that provides the largest stock of parts materials for wear and the largest connection resource.

Keywords: hydrodynamic lubrication, fit, plain bearing, accuracy factor, material stock, service life of the connection

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko L.A., Alexandrok K.I. Calculation and selection of a clearance fit using the theory of hydrodynamic lubrication. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(5):57-61. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-57-61>.

Введение. Теория гидродинамической смазки широко применяется при проектировании современной техники [1, 2]. Гидродинамическая смазка увеличивает ресурс соединений, поскольку в процессе эксплуатации материалы вала и отверстия взаимодействуют только во время пуска и остановки, а при нормальном режиме эксплуатации взаимодействуют слои смазки [3-5].

В двигателях внутреннего сгорания применяются соединения с гидродинамической смазкой: коренные и шатунные подшипники, верхняя головка шатуна с поршневым пальцем, опоры распределительного вала, юбка поршня с гильзой и др. [6-9]. Качество и долговечность работы данных соединений определяются функциональными параметрами, включающими в себя не только характеристики прочности, жёсткости, износостойкости, но и точностные характеристики (зазоры, шероховатость поверхности деталей, отклонение формы и расположение поверхностей) [5, 10].

Расчёты функциональных зазоров в пределах нормальной работы соединения направлены на повышение надёжности и долговечности двигателей внутреннего сгорания [11] и являются основой для выбора посадок и назначения рациональной точности проектируемого соединения [12, 13].

Расчёт посадок для подшипников скольжения на основе теории гидродинамической смазки заключается в определении наибольшего и наименьшего функциональных зазоров, конструкционного допуска посадки, определяемого с помощью коэффициента запаса точности. Выбор посадки сводится к назначению качественных точности отверстия и вала и основного отклонения в зависимости от заданной системы посадки.

Цель исследований: рассчитать и выбрать посадку для соединения, работающего в условиях гидродинамического трения, обеспечивающую наибольший запас материалов деталей на износ и наибольший ресурс соединения.

Материалы и методы. В исследованиях использованы положения теории гидродинамической смазки, теории точности, а также нормы взаимозаменяемости.

Объектом исследований явился подшипник скольжения редуктора винтового конвейера сушки зерна.

Динамическая вязкость масла зависит от его марки и наибольшей реальной рабочей температуры. Выбрано промышленное масло И-Л-А-46, у которого нормированная рабочая температура составляет $50\text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1).

Предельные функциональные зазоры в теории гидродинамической смазки определялись по выражению [10]:

$$S_{r_{\min}^{\max}} = \frac{\omega k \mu d^2 \pm \sqrt{(\omega k \mu d^2)^2 - 16 p h_{\min}^2 \omega \mu d^2}}{4 p h_{\min}}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения вала, c^{-1} ; d – диаметр соединения, м; p – удельное давление, Па; h_{\min} – наименьшая толщина масляного слоя, м; μ – динамическая вязкость масла, Па·с; k и m – конструктивные коэффициенты И.Н. Поздова.

Наименьшая толщина масляного слоя, необходимая для обеспечения жидкостного трения в подшипнике скольжения, определялась по выражению [10]:

$$h_{\min} = k_o (R_{Zd} + R_{ZD}), \quad (2)$$

где $k_o = 2,0$ – коэффициент запаса надёжности по толщине масляного слоя; R_{Zd} – шероховатость поверхности вала, мкм; R_{ZD} – шероховатость поверхности отверстия, мкм.

Конструктивные коэффициенты И.Н. Поздова определялись соотношением геометрических параметров l/d (длины цапфы и диаметра соединения).

Исходные данные приведены в таблице 1.

Результаты и их обсуждение. В результате расчётов определены предельные функциональные зазоры и сделан вывод о том, что соединение будет иметь жидкостную смазку в диапазоне зазоров от 7,42 до 918,79 мкм (табл. 2). После выбора коэффициента запаса точности $K_{ЗТ} = 7$ назначена посадка $\varnothing 50 \frac{H9}{g9} \left(\begin{matrix} +0,062 \\ -0,009 \\ -0,071 \end{matrix} \right)$ Для данных квалитетов деталей

выбраны следующие виды обработки: для отверстия – развёртывание полустачное; для вала – шлифование круглое полустачное. Однако для увеличения коэффициента запаса точности, а как следствие – и долговечности соединения, можно изменить значения квалитета для отверстия и вала (рис. 1, 2). Учитывая, что рекомендуемое значение шероховатости поверхности для подшипников скольжения равно 0,25...0,32 мкм, можно изменить метод обработки деталей:

для отверстия – хонингование (обеспечивает 7...8 квалитет);

для вала – шлифование тонкое (обеспечивает 6...7 квалитет).

Таким образом, исходя из рационального назначения шероховатости поверхности трущихся пар, можно назначить посадку $\varnothing 50 \frac{H7}{g6}$. При этом коэффициент запаса точности становится равным 22.

Таблица 1

Исходные данные

Table 1

Initial data	
Наименование и обозначение параметров Name and designation of parameters	Значение Value
Номинальный диаметр соединения, d_n , мм Nominal diameter of connection, d_n , mm	50
Длина цапфы, l , мм / Length of journal, l , mm	45
Шероховатость поверхности отверстия, R_{ZD} , мкм Bore surface roughness, R_{ZD} , μm	1,0
Шероховатость поверхности вала, R_{Zd} , мкм Shaft surface roughness, R_{Zd} , μm	0,8
Частота вращения вала, n , мин ⁻¹ / Shaft speed, n , min ⁻¹	1200
Радиальная нагрузка на подшипник, R , кН Radial load on bearing, R , kN	2,0
Система изготовления / Manufacturing system	СН
Марка масла / Oil grade	И-Л-А-46
Динамическая вязкость масла, μ , Па·с Dynamic viscosity of oil, μ , Pa·s	0,027

На рисунке 1 изображены поля допусков посадок $\varnothing 50 \frac{H9}{g9}$ и $\varnothing 50 \frac{H7}{g6}$. При равенстве наименьшего стандартного зазора ($S_{min} = 9$ мкм) у двух сравниваемых посадок наблюдаем существенное различие в величинах наибольшего стандартного зазора S_{max} : 133 мкм у более грубой посадки и 50 мкм – у более точной.

Различие зазоров и использование более точной посадки формируют определённый запас материалов деталей на износ и дают возможность существенно увеличить ресурс соединения (рис. 2).

Таблица 2

Результаты расчётов

Table 2

Calculation results

Наименование и обозначение параметров Parameter name and designation	Значение Value
Угловая скорость вращения вала, ω , с ⁻¹ Angular speed of the shaft, ω , s ⁻¹	126
Удельное давление, p , Па / Specific pressure, p , Pa	$0,88 \cdot 10^6$
Наименьшая толщина масляного слоя, h_{min} , м Smallest thickness of the oil layer, h_{min} , m	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Конструктивный коэффициент, k / Design factor, k	0,690
Конструктивный коэффициент, m / Design factor, m	0,705
Наименьший функциональный зазор, $S_{F_{min}}$, м Smallest functional clearance, $S_{F_{min}}$, m	$7,42 \cdot 10^{-6}$
Наибольший функциональный зазор, $S_{F_{max}}$, м Largest functional gap, $S_{F_{max}}$, m	$918,79 \cdot 10^{-6}$

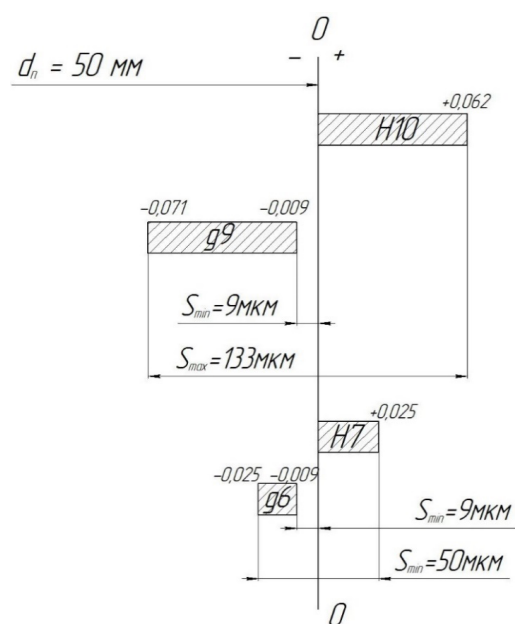


Рис. 1. Схемы полей допусков грубой и точной посадок
Fig. 1. Diagrams of tolerance fields of coarse and fine fits

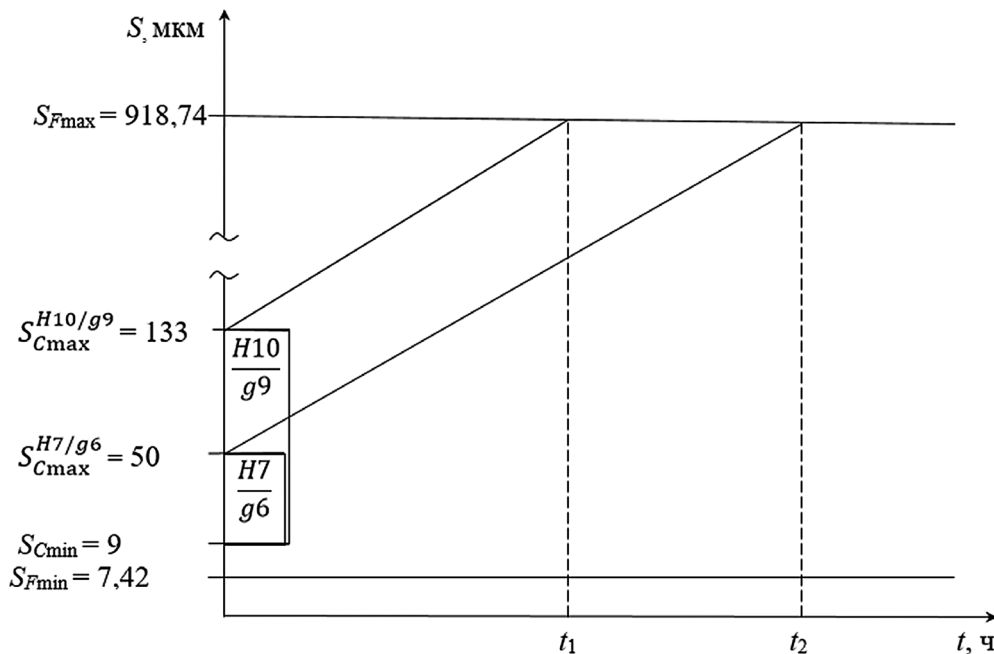


Рис. 2. Приращение ресурса при использовании более точной посадки

Fig. 2. Service life increment when using a more accurate fit

Выводы

Для соединения, работающего в условиях гидродинамического трения, определены предельные функциональные зазоры и выбраны две посадки: $\varnothing 50 \frac{H9}{g9}$ и $\varnothing 50 \frac{H7}{g6}$. Первая посадка – более грубая, когда

по 9 качеству точность деталей обеспечивается простыми и дешевыми способами обработки: развертыванием отверстия и полустойным шлифованием вала. Вторая (более точная) посадка обеспечивается хонингованием отверстия и тонким шлифованием вала. Именно она дает наибольший запас материалов деталей на износ и наибольший ресурс соединения.

Список использованных источников

1. Захаров С.М. Гидродинамическая смазка: состояние и перспективы // Трение и износ. 2010. Т. 31, № 1. С. 78-92. EDN: KZXMFТ.
2. Силуянова М.В., Фертиков А.О. Расчёт течения смазки в подшипнике скольжения редуктора авиационного двигателя // Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение: Вестник Самарского университета. 2019. Т. 18, № 2. С. 75-88. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-75-88>
3. Захаров С.М. Многоопорные валы с подшипниками скольжения: моделирование и оценка их работоспособности // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 3. С. 208-216. EDN: YURYAT.
4. Иванов В.А. Программный комплекс расчёта давления в смазочном слое подшипника скольжения // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 3. С. 540-549. <https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-3-540-549>
5. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Константинов В.А. Гидродинамическая смазка радиального подшипника повышенной несущей способности, обусловленной профилем его опорной поверхности и шероховатостью поверхности вала // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10, № 3 (46). С. 325-329. EDN: MVSQRP.
6. Смирнов С.В., Воробьёв А.А. Исследование гидродинамических условий смазывания юбки составного поршня // Научно-производственное общество. 2018. № 2 (16). С. 70-73. EDN: YWTPUD.

References

1. Zakharov S.M. Hydrodynamic lubrication research: Current situation and future prospects. *Journal of Friction and Wear*. 2010;31(1):78-92. (In Rus.)
2. Siluyanova M.V., Fertikov A.O. Calculation of lubricant flow in the slide bearing of the aviation engine reducer. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*. 2019;18(2):75-88. (In Rus.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-75-88>
3. Zakharov S.M. Multiple-support shafts with journal bearings: a simulation and evaluation of their performance. *Journal of Friction and Wear*. 2017;38(3):208-216. (In Rus.)
4. Ivanov V.A. Program complex of pressure calculation in lubricated slide bearing layer. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018;19(3):540-549. (In Rus.) <https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-3-540-549>
5. Akhverdiev K.S., Aleksandrova E.E., Konstantinov V.A. Hydrodynamic lubrication of a radial bearing of increased bearing capacity with barrel rotation unevenness. *Vestnik of Don State Technical University*. 2010;10(3):325-329. (In Rus.)
6. Smirnov S.V., Vorobyev A.A. Investigation of hydrodynamic lubrication conditions of the compound piston skirt. *Naukograd. Nauka. Proizvodstvo. Obshchestvo*. 2018;2(16):70-73. (In Rus.)
7. Smirnov S.V., Makarov A.R., Vorobyev A.A. Mathematical modeling of dynamics movement of a piston skirt in the cylinder of the internal combustion engine. *RUDN Journal of Engineering Research*. (In Rus.) 2017;18(3):338-344. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-338-344>

7. Смирнов С.В., Макаров А.Р., Воробьёв А.А. Математическое моделирование динамики движения юбки поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2017. Т. 18, № 3. С. 338-344. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-338-344>

8. Смирнов С.В., Макаров А.Р., Абу-Ниджим Р.Х. Математическое моделирование динамики движения составного поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 11. С. 57-63. EDN: ZSLOKB.

9. Денисов А.С., Асоян А.Р. Повышение надёжности подшипников коленчатого вала двигателя КАМАЗ при ремонте // Научное обозрение. 2012. № 1. С. 42-47. EDN: OWQEPD.

10. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Модель параметрического отказа для расчёта точностных параметров соединения с зазором // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 4. С. 424-430. EDN: PMGHNY.

11. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Расчёт допуска посадки по модели параметрического отказа соединения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 14-20. EDN: VILYGG.

12. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В., Пупкова Д.А. Расчёт посадок соединений упругих втулочно-пальцевых муфт с валами // Вестник машиностроения. 2023. № 2. С. 96-101. EDN: ITNRLQ.

13. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Хасьянова Д.У. Обоснование посадок соединений со шпонками // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2022. № 6. С. 65-71. EDN: EITIEV.

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованием; формулирование основной концепции исследования и задач.

Н.Ж. Шкаруба – разработка методологии исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование.

Ю.Г. Вергазова – верификация данных; разработка программного обеспечения.

Л.А. Гринченко – визуализация данных, описание результатов и формирование выводов исследования.

К.И. Александрук – подготовка начального варианта текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 23.03.2023; после рецензирования 31.08.2023, принята к публикации 01.09.2023

8. Smirnov S.V., Makarov A.R., Abu-Nidzhim R.Kh. Mathematical modeling of dynamics of movement of the compound piston in the cylinder of the internal combustion engine. *Traktory i selkhoz-machiny*. 2017;11:57-63. (In Rus.)

9. Denisov A.S., Asoyan A.R. Increasing the reliability of crankshaft bearings of kamaz engine during maintenance. *Nauchnoe obozrenie*. 2012;1:42-47. (In Rus.)

10. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. A parametric failure model for the calculation of the fit tolerance of joints with clearance. *Journal of Friction and Wear*. 2019;40(4):424-430. (In Rus.)

11. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of the fit tolerance by model parametric connection failure. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2020;4:14-20. (In Rus.)

12. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Golitskiy P.V., Pupkova D.A. Calculation of joint fits of elastic sleeve-pin couplings with shafts. *Vestnik mashinostroeniya*. 2023;2:96-101. (In Rus.)

13. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Khasyanova D.U. Justification of keyed joint fits. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2022;6:65-71. (In Rus.)

Authors' contribution

O.A. Leonov – research supervision; conceptualization and setting objectives.

N.Zh. Shkaruba – methodology, finalizing (reviewing) and editing the draft.

Y.G. Vergazova – data verification; software development.

L.A. Grinchenko – data visualization, description of results and making conclusions.

K.I. Aleksandruk – original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 23.03.2023; revised 31.08.2023; accepted 01.09.2023