

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВО БРЯНСКИЙ ГАУ

КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА

Киселева Л.С., Будко С.И.

РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Методическое пособие для практической
и самостоятельной работы по курсу
«Основы взаимозаменяемости и технические измерения»

БРЯНСК 2021

УДК 621.822 (076)

ББК 34.445

Б 90

Киселева, Л. С. Расчет подшипников жидкостного трения: методическое пособие для практической и самостоятельной работы по курсу «Основы взаимозаменяемости и технические измерения» / Л. С. Киселева, С. И. Будко. - Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – 33 с.

Методические указания предназначены для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия.

Рецензент: к.э.н., доцент Гринь А.М.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического института Брянского государственного аграрного университета, протокол №3 от 25 октября 2021 года.

© Брянский ГАУ, 2021

© Киселева Л.С., 2021

© Будко С.И., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Качество выпускаемых машин и агрегатов, а также оптимальные условия их производства и ремонта в значительной мере зависят от уровня стандартизации и взаимозаменяемости, используемых в конструкции деталей и узлов, а также правильного выбора и соблюдение допусков и посадок при их проектировании и изготовлении.

В свою очередь соблюдение заданных допусков и посадок возможно при использовании соответствующих измерительных инструментов и приборов для контроля размеров при изготовлении деталей и сборке узлов.

В процессе изучения курса «Основы взаимозаменяемости и технические измерения» студент должен ознакомиться с общими принципами взаимозаменяемости и стандартизации, системой допусков и посадок, а также с методами и средствами измерения для достижения точности размеров деталей.

Практические занятия позволяют студенту закрепить теоретические знания, полученные на лекциях, научиться самостоятельно назначать допуски и посадки, правильно выбрать контрольно-измерительные инструменты и уметь ими пользоваться, а также научиться пользоваться стандартами и справочной литературой.

Методическое пособие для проведения практической работы разработано в соответствии с программой дисциплины "Основы взаимозаменяемости и технические измерения" для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия.

Для качественного выполнения практической работы ее содержание приводится в логической последовательности и включает следующие части: цель работы; краткие теоретические сведения по теме;

порядок выполнения работы; форму отчета; контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

УК-2: Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.

ОПК-2: Способен использовать нормативные правовые акты и оформлять специальную документацию в профессиональной деятельности.

РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Цель работы: Практическое ознакомление с методикой расчета подшипников жидкостного трения.

Справочный материал

Посадки с зазором предназначены для подвижных и неподвижных соединений деталей. В подвижных соединениях зазор служит для обеспечения свободы перемещения, размещения слоя смазки, компенсации температурных деформаций, а также компенсации отклонений формы сборки и др.

В неподвижных соединениях посадки с зазором применяются для обеспечения беспрепятственной сборки деталей (в особенности сменных). Их относительная неподвижность обеспечивается дополнительным креплением шпонками, винтами, болтами, штифтами и т. п.

Если допускается работа соединения в условиях полужидкостного, полусухого трения, то выбор посадок производится по аналогии с посадками известных и хорошо работающих соединений. При этом должны быть внесены поправки с учетом конкретных особенностей параметров и условий работы соединений.

Особенности посадок с зазором:

1) посадки $H7/h6$, $H8/h7$ имеют наименьший зазор, равный нулю, поэтому они находятся на грани между неподвижными и подвижными посадками. При хорошей смазке детали перемещаются свободно друг относительно друга (пиноли в станках, поршневые штоки в цилиндрах). Но при дополнительном креплении они превращаются в неподвижную посадку. Это осуществляется в случаях, когда требуется точ-

ное центрирование соединяемых деталей при частой сборке и разборке (соединение валов со сменными колесами);

2) посадки $H7/j7$, $H8/h6$, $H7/e7$, $H8/d8$, $H9/d9$, $H7/c8$ и др. применяются в соединениях для облегчения сборки и невысокой точности центрирования, для обеспечения смазки трущихся поверхностей, компенсации тепловых деформаций, для сборки деталей с антикоррозионными покрытиями;

3) посадки $H8/j8$, $H7/j7$ применяют в подшипниках скольжения, поршневых компрессорах.

Подшипник жидкостного трения

Примером подшипника жидкостного трения является *подшипник скольжения*.

Подшипники скольжения следует применять там, где нельзя применить подшипники качения, а именно:

а) когда подшипник должен быть разъемным по оси (например, подшипники средних шеек коленчатого вала);

б) для очень больших нагрузок, когда подходящих стандартных подшипников качения подобрать нельзя;

в) для сверхбыстроходных валов, где центробежные силы инерции не допускают применения подшипников качения;

г) для работы в сильно загрязненной среде или воде

В подшипниках скольжения жидкостная смазка возможна лишь в определенном диапазоне допускаемых диаметральных зазоров (выражаемых в микрометрах), ограниченном наименьшим $[S_{min}]$ и наибольшим $[S_{max}]$ функциональными зазорами (рисунок 1). Данным зазорам соответствует минимальная толщина масляного слоя $[h_{min}]$ (мкм).

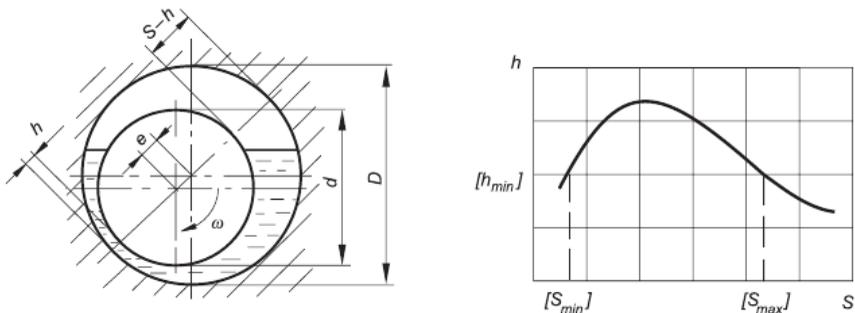


Рисунок 1 - Зависимость толщины масляного слоя h от зазора S

Оптимальная толщина масляного слоя h_{opt} обеспечивается при оптимальном зазоре S_{opt} .

Условия подбора посадки после определения наименьшего $[S_{min}]$ и наибольшего $[S_{max}]$ функциональных зазоров следующие:

$$S_{min \text{ табл}} \geq [S_{min}]; \quad (1)$$

$$S_{max \text{ табл}} < [S_{min}] - 2 \cdot (Rz_1 + Rz_2) \approx [S_{max}] - 8 \cdot (Ra_1 + Ra_2);$$

$$S_{ср.табл} \approx S_{opt} \text{ (не строго обязательно),}$$

где $S_{min \text{ табл}}$ — наименьший табличный зазор, мкм;

$S_{max \text{ табл}}$ — наибольший табличный зазор, мкм;

$S_{ср.табл}$ — средний табличный зазор, мкм;

Rz_1 и Rz_2 , Ra_1 и Ra_2 — шероховатость поверхности вала и втулки соответственно, мкм.

Расчет посадки с гарантированным зазором для подшипника жидкостного трения

Среднее давление p , Па, в подшипнике определяют как

$$p = \frac{R}{ld}, \quad (2)$$

где R — радиальная нагрузка, Н;

l — длина контакта, м;

d — номинальный диаметр, м.

Минимальная допускаемая толщина масляного слоя $[h_{\min}]$, мкм, при которой обеспечивается жидкостное трение, вычисляется по формуле

$$[h_{\min}] = k_{\text{жт}}(Rz_1 + Rz_2 + \gamma_d), \quad (3)$$

где $k_{\text{жт}} > 2$ — коэффициент запаса надежности по толщине масляного слоя, принимается $k_{\text{жт}} = 2$;

Rz_1 и Rz_2 — шероховатости охватывающей и охватываемой поверхности соответственно, мкм;

γ_d — добавка на неразрывность масляного слоя, $\gamma_d = 2,0$ ч- $3,0$ мкм, принимается $\gamma_d = 3,0$ мкм.

Для обеспечения жидкостного трения необходимо соблюдение условия

$$h \geq [H_{\min}],$$

где h — фактическая толщина масляного слоя, мкм.

Коэффициент A_n , необходимый для определения предельно допускаемых зазоров в соединении элементов подшипника скольжения, рассчитывают по формуле

$$A_h = \frac{2[h_{\min}]}{d \sqrt{\frac{\mu \omega}{p}}}, \quad (4)$$

где p — динамическая вязкость смазки при рабочей температуре

$$t_{pa\acute{o}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ Па} \cdot \text{с};$$

ω — угловая скорость, рад/с.

Минимальный относительный эксцентриситет χ_{\min} , при котором толщина масляного слоя равна $[h_{\min}]$, определяют по найденному значению A_h при данном отношении l/d . Пример определения χ_{\min} представлен на рисунке 2.1, а.

Наименьший допускаемый зазор $[S_{\min}]$ рассчитывают по найденному значению χ_{\min} :

а) при $\chi_{\min} > 0,3$

$$[S_{\min}] = \frac{2[h_{\min}]}{1 - \chi_{\min}}; \quad (5)$$

б) если $\chi_{\min} < 0,3$ (т. е. χ_{\min} находится левее вертикальной оси А), то по рисунку 2.1, а определяется A_x при заданном отношении l/d и $\% = 0,3$. Затем рассчитывают наименьший допускаемый зазор $[S_{\min}]$:

$$[S_{\min}] = 2,857 [h_{\min}] \frac{A_x}{A_h}. \quad (6)$$

Оптимальный расчетный зазор $[S_{opt}]$ определяют по формуле

$$S_{opt} = \frac{2[h_{\min}]}{1 - \chi_{opt}} \frac{A_{opt}}{A_h}, \quad (7)$$

где A_{opt} — максимальное значение A_h при данном значении отношения l/d по рисунку 2;

χ_{opt} — значение %, при котором $A_h = A_{opt}$.

Наибольший допускаемый зазор $[S_{max}]$. По найденному ранее значению A_h , по рисунку 2.1 определяют наибольший относительный эксцентриситет χ_{max} , при котором толщина масляного слоя равна $[h_{min}]$. Затем рассчитывают наибольший допускаемый зазор $[S_{max}]$:

$$[S_{max}] = \frac{2[h_{min}]}{1 - \chi_{max}}. \quad (8)$$

Выбор посадки. По полученным значениям расчетных зазоров $[S_{min}]$ и $[S_{max}]$ подбирают стандартную (табличную) посадку с численными значениями $S_{min \text{ табл}}$ и $S_{max \text{ табл}}$, близкими к расчетным (приложение А пособия или ГОСТ 25347—2013), затем определяют численные значения предельных отклонений (ГОСТ 25347—2013). При подборе посадки по приложению В из ГОСТ 25347—2013 необходимо отдавать предпочтение рекомендуемым посадкам. Подобранные посадки должны удовлетворять условиям (1).

Значения зазоров табличных посадок определяют по следующим формулам:

а) наименьший табличный зазор

$$S_{min \text{ табл}} = EI - es = D_{min} - d_{max}, \quad (9)$$

где EI — нижнее отклонение отверстия, мкм;

es — верхнее отклонение вала, мкм.

б) наибольший табличный зазор

$$S_{\max \text{ табл}} = ES - ei = D_{\max} - d_{\min}, \quad (10)$$

где ES — верхнее отклонение отверстия, мкм;

ei — нижнее отклонение вала, мкм.

Зависимость коэффициента A от относительного эксцентриситета χ .

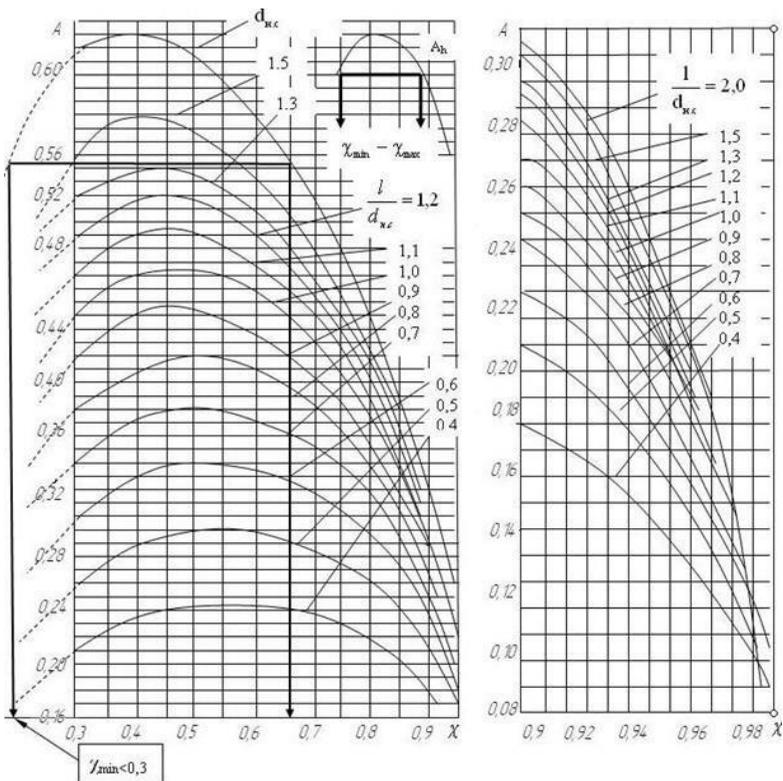


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента A_h от относительного эксцентриситета χ

В случае, когда не удается подобрать стандартную табличную посадку, допускается формировать комбинированную посадку (посадку, в которой не используются интервалы (поля) допусков ни основного отверстия (H), ни основного вала (h), например $\varnothing 50T7/g6$). Решение о пригодности выбранной комбинированной посадки принимается на основании выполнения условий неравенства (1).

Упрощенный метод расчета посадок с зазором для подшипников скольжения.

Для наиболее ответственных соединений, которые должны работать в условиях жидкого трения, зазоры рассчитываются на основе гидродинамической теории трения. На практике чаще применяют упрощенный метод расчета посадок с зазором для подшипников скольжения по относительному зазору (1).

Относительный зазор Ψ , мкм, определяют по эмпирической формуле

$$\Psi = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{V}, \quad (11)$$

где V — скорость вращения вала, м/с.

Оптимальный зазор S_{opt} , мкм, в подшипнике в этом случае определяется по формуле

$$S_{opt} = \Psi d, \quad (12)$$

где d — номинальный диаметр соединения, мм.

Радиальная нагрузка R , H , на цапфу обуславливающая (согласно гидродинамической теории трения) несущую способность подшипников (при соблюдении условия неразрывности слоя смазки), определяется как

$$R = \frac{\mu\omega}{\psi^2} ldC_R, \quad (13)$$

где p — динамическая вязкость смазочного масла при рабочей температуре подшипника, Па • с (значения берут из приложения А);

ω — угловая скорость, рад/с;

ψ — относительный зазор, мкм;

l — длина подшипника, м;

d — номинальный диаметр соединения, м;

C_R — коэффициент нагружения подшипника, безразмерная величина, зависящая от положения вала в подшипнике.

Коэффициент нагруженности подшипника C_R выражают из формулы (13) с учетом формулы (2):

$$C_R = \frac{p\psi^2}{\mu\omega}. \quad (14)$$

Относительный эксцентриситет χ определяют по таблице 2 в зависимости от значения коэффициента нагруженности подшипника C_R при отношении l/d .

Минимальная толщина масляного слоя h_{min} , мкм, в месте наибольшего сближения поверхностей вала и вкладыша подшипника определяется по формуле

$$h_{\min} = \frac{S_{\text{opt}}}{2} (1 - \chi). \quad (15)$$

Для обеспечения запаса надежности жидкостного трения также необходимо выполнить условие неразрывности масляного слоя

$$k_{\text{ж.т}} \geq \frac{h_{\min}}{h_{\text{крит}}}, \quad (16)$$

где $h_{\text{крит}}$ — критическая толщина масляного слоя;

$$h_{\text{крит}} = Ra_1 + Ra_2, \quad (17)$$

где Ra_1 и Ra_2 — шероховатости поверхностей вкладыша подшипника и цапфы вала соответственно. Если $h_{\text{крит}} > 2$, то запас погрешности жидкостного трения удовлетворяет необходимым требованиям. Посадку выбирают из набора стандартных (табличных), ориентируясь на среднее значение зазора.

Пример (упрощенный расчет и выбор посадки с зазором для подшипника скольжения, работающего в условиях гидродинамического режима)

Выполните расчет и выбор посадки с зазором для подшипника скольжения, работающего в условиях гидродинамического режима, по следующим исходным данным:

- номинальный диаметр соединения $d_n = D_n = 150$ мм;
- длина подшипника $l = 160$ мм;
- угловая скорость $\omega = 60$ рад/с;
- динамический коэффициент вязкости $\eta = 0,017$ Па·с;

- удельное давление на опору $\rho = 2,2 \text{ МПа};$
- шероховатость отверстия $R_{a2} = 1,6 \text{ мкм};$
- шероховатость вала $R_{a1} = 3,2 \text{ мкм}.$

Решение

1. Вычисляем окружную скорость вала:

$$V = \omega \cdot D_n / 2 = 60 \cdot 0,15 / 2 = 4,5 \text{ м/с}.$$

2. Определяем относительный зазор в подшипнике скольжения по эмпирической формуле:

$$\psi = 0,8 \cdot \sqrt[4]{V} / 1000 = 0,8 \cdot \sqrt[4]{4,5} / 1000 = 0,0012.$$

3. Диаметральный расчетный зазор:

$$S_p = \psi \cdot D_n = 0,0012 \cdot 0,15 = 0,00018 \text{ м} = 180 \text{ мкм}.$$

4. Определяем коэффициент нагруженности подшипника:

$$C_r = \rho \cdot \psi^2 / (\eta \cdot \omega) = (2,2 \cdot 10^6) \cdot 0,0012^2 / (0,017 \cdot 60) = 3,106.$$

5. В нашем случае $l/D_n = 1,067$, $C_r = 3,106$. В таблице [Приложение Б] значение $l/D_n = 1,067$ и $C_r = 3,106$ являются промежуточными, поэтому C_r определяем методом линейной интерполяции табличных данных.

Сначала определим величины C_r при $l/D_n = 1,067$ для двух значений χ : $\chi = 0,75$ и $\chi = 0,80$, т.к. в этих пределах χ находится значение $C_r = 3,106$.

5.1. Из таблицы для $\chi = 0,75$, определяем величины C_r :

если $l/D_n = 1,0$, то $C_r = 2,469$;

если $l/D_n = 1.1$, то $C_r = 2,664$.

Тогда из подобия треугольников ABC и $A_1B_1C_1$, изображенных на рисунке 3а, находим величину C_{r1} для $l/D_n = 1,067$ при $\chi = 0,75$:

$$C_{r1} = 2,469 + \frac{AC \cdot B_1C_1}{AC_1} = 2,469 + \frac{(1,067 - 1,0) \cdot (2,664 - 2,469)}{(1,1 - 1,0)} = 2,599.$$

5.2. Аналогично определяем величину C_{r2} для $l/D_n = 1,067$ при $\chi = 0,8$ из подобия $\triangle ABC$ и $\triangle A_1B_1C_1$, изображенных на рисунке 3б.

Из таблицы для $\chi = 0,8$, определяем величины C_r :

если $l/D_n = 1,0$, то $C_r = 3,372$;

если $l/D_n = 1,10$, то $C_r = 3,580$,

тогда

$$C_{r2} = 3,372 + \frac{AC \cdot B_1C_1}{AC_1} = 3,372 + \frac{(1,067 - 1,0) \cdot (3,580 - 3,372)}{(1,1 - 1,0)} = 3,511.$$

5.3. Определяем относительный эксцентриситет χ для нашего случая: $l/D_n = 1,067$ и $C_r = 3,106$,

если $C_{r1} = 2,599$, то $\chi = 0,75$;

если $C_{r2} = 3,511$, то $\chi = 0,80$.

Из подобия треугольников ABC и $A_1B_1C_1$, изображенных на рисунке 3в, имеем:

$$\chi = 0,75 + \frac{AC \cdot B_1 C_1}{AC_1} = 0,75 + \frac{(3,106 - 2,599) \cdot (0,8 - 0,75)}{(3,511 - 2,599)} = 0,778.$$

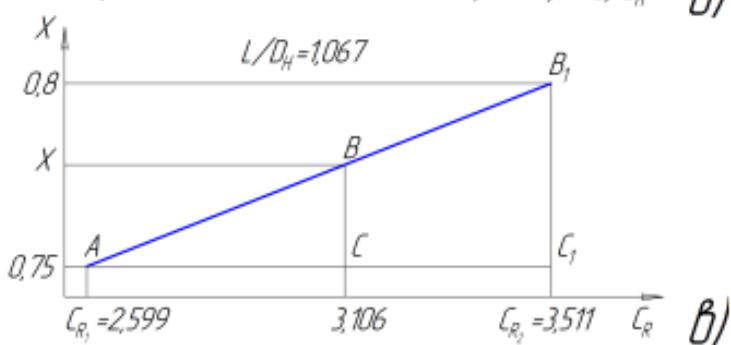
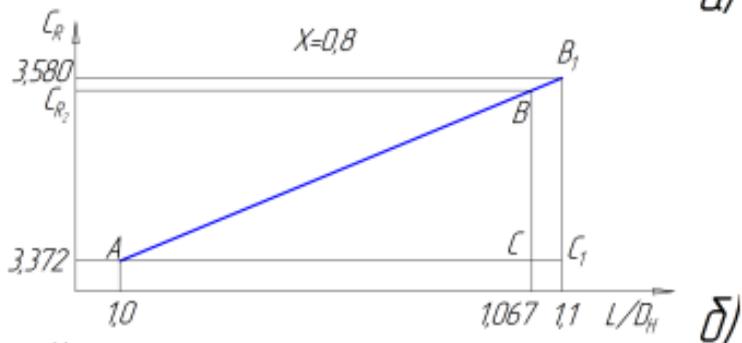
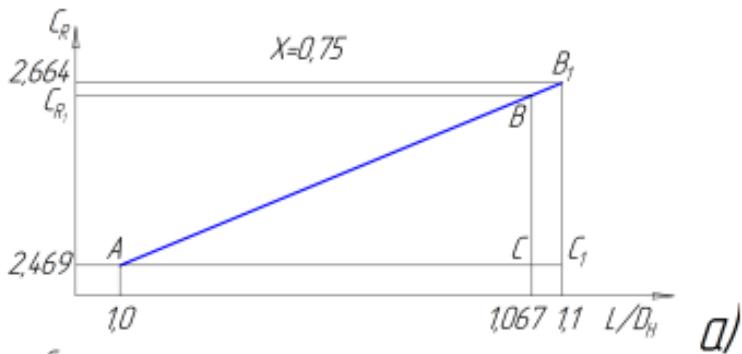


Рисунок 3

6. Определяем толщину масляного слоя h в месте наибольшего сближения поверхностей отверстия вкладыша подшипника скольжения и вала при найденном диаметральном зазоре:

$$h = (Sp/2) \cdot (1 - \chi) = (180/2) \cdot (1 - 0,778) = 20 \text{ мкм.}$$

7. Допускаемая минимальная толщина масляного слоя $[h_{min}]$:

$$[h_{min}] = k_{эст} \cdot (R_{a2} + R_{a1} + \gamma_{\delta}),$$

где $k_{эст} = 2$ мкм - коэффициент запаса надежности по толщине масляного слоя;

$\gamma_{\delta} = 2$ мкм - добавка, учитывающая отклонение фактических значений нагрузки, скорости, температуры от расчетных, а также механические отклонения в масле.

Тогда

$$[h_{min}] = 2 \cdot (1,60 + 3,20 + 2) = 14 \text{ мкм.}$$

Для обеспечения жидкостного трения необходимо соблюдение условия: $h \geq [h_{min}]$. В нашем случае: $h = 20 \text{ мкм} \geq [h_{min}] = 14 \text{ мкм}$, т.е. условие жидкостного трения выполняется.

8. Определяем минимальный зазор $[S_{min}]$ в подшипнике, при котором толщина масляного слоя равна минимальной допускаемой величине $[h_{min}]$:

$$[S_{min}] = 2 \cdot [h_{min}] / (1 - \chi) = 2 \cdot 14 / (1 - 0,778) = 126 \text{ мкм.}$$

9. Подбираем посадку. Чтобы срок службы соединения был наибольшим, а затраты на изготовление деталей минимальными, посадки следует выбирать так, чтобы средний табличный зазор $S_{cp\ табл}$ (ГОСТ 25347—2013) был близким к оптимальной расчетной величине зазора S_{opt} , т. е.

$$S_{cp.табл} \approx S_{opt}. \quad (18)$$

Условия подбора посадки:

1) $S_{min} \geq [S_{min}]$, в нашем случае: $[S_{min}] = 126$ мкм;

2) $S_{cp\ табл} \approx S_p$, в нашем случае: $S_p = 180$ мкм,

где $S_{cp\ табл}$ - средний диаметральный зазор посадки:

$$S_{cp\ табл} = (S_{max\ табл} + S_{min\ табл})/2.$$

где $S_{max\ табл}$ — наибольший табличный зазор;

$S_{min\ табл}$ — наименьший табличный зазор.

Для выбора посадки используем таблицы предельных отклонений отверстий (таблицы 2-16) и валов (таблицы 17-32) ГОСТ 25347-2013.

Этим условиям наиболее близко соответствует посадка $\varnothing 150$ D8/h6 с зазорами $S_{min} = 145$ мкм, $S_m = 189,0$ мкм, $S_{max} = 233$ мкм [Приложение Г].

Для номинального размера соединения «вал — цапфа» 150 мм соответствует:

- отверстие с интервалом (полем) допуска D8 с верхним предельным отклонением $ES = +208$ мкм, с нижним предельным отклонением $EI = +145$ мкм (таблица 8 ГОСТ 25347-2013);

• вал с интервалом (полем) допуска hb с верхним предельным отклонением $es = 0$ мкм, с нижним предельным отклонением $ei = -25$ мкм (таблица 7 ГОСТ 25347-2013).

10. Рассчитываем наибольшие и наименьшие предельные размеры для вала

$$\begin{aligned}d_{max} &= d + es; \\d_{min} &= d + ei. \\d_{max} &= 150,000 + 0 = 150,000 \text{ мм}; \\d_{min} &= 150,000 - 0,025 = 149,975 \text{ мм}.\end{aligned}$$

11. Вычисляем наибольшие и наименьшие размеры для отверстия:

$$\begin{aligned}D_{max} &= D + ES; \\D_{min} &= D + EI. \\D_{max} &= 150,000 + 0,208 = 150,208 \text{ мм}; \\D_{min} &= 150,000 + 0,145 = 150,145 \text{ мм}.\end{aligned}$$

12. Определяем допуски отверстия и вала:

$$\begin{aligned}TD &= ES - EI; \\Td &= es - ei. \\TD &= +208 - (+145) = 63 \text{ мкм}; \\Td &= 0 - (-25) = 25 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

13. Рассчитываем наименьший зазор $S_{min \text{ табл}}$ и наибольший зазор $S_{max \text{ табл}}$:

$$\begin{aligned}S_{min \text{ табл}} &= EI - es = D_{min} - d_{max}; \\S_{max \text{ табл}} &= ES - ei = D_{max} - d_{min}; \\S_{min \text{ табл}} &= +145 - (0) = 145 \text{ мкм}; \\S_{max \text{ табл}} &= +208 - (-25) = 233 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

14. Вычисляем средний зазор

$$\begin{aligned}S_{cp. \text{ табл}} &= (S_{max \text{ табл}} + S_{min \text{ табл}})/2; \\S_{cp. \text{ табл}} &= (233 + 145)/2 = 189 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

17. Определяем диапазон (допуск) посадки

$$TS = S_{\max \text{ табл}} - S_{\min \text{ табл}} = TD + Td;$$

$$TS = 63 + 25 = 88 \text{ мкм}$$

Схема расположения интервалов (полей) допусков посадки (в системе вала) представлена на рисунке 4, эскизы сопрягаемых деталей приведены на рисунке 5.

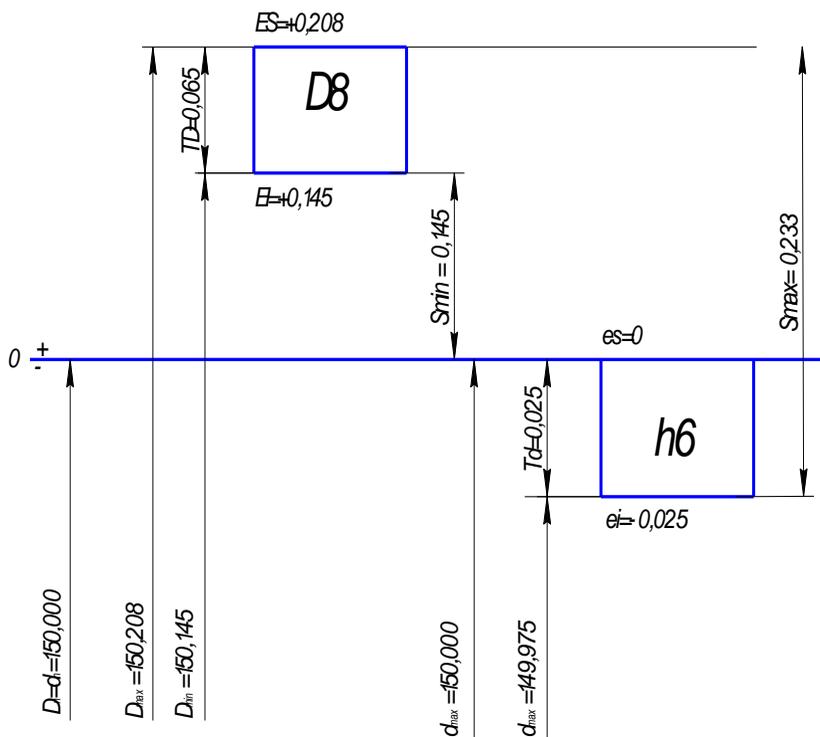


Рисунок 3 - Схема расположения интервалов (полей) допусков посадки

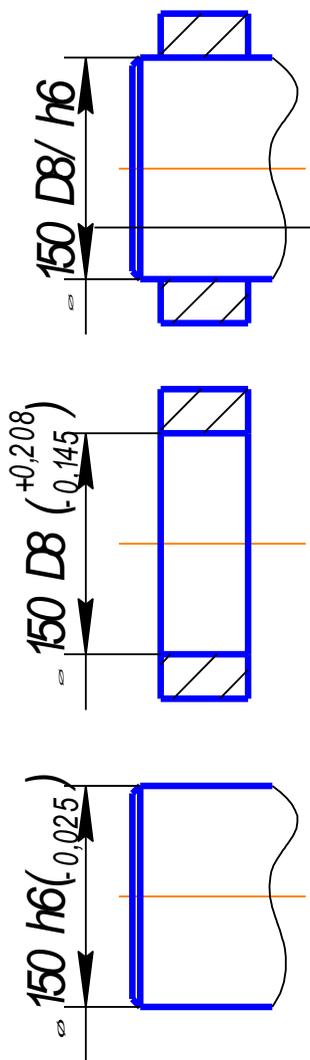


Рисунок 4 - Эскизы сопрягаемых деталей

Контрольные вопросы

1. Что собой представляют подшипники жидкостного трения?
2. Какую роль играет зазор в подвижных соединениях?
3. Назначение зазора в неподвижных соединениях.
4. Перечислите особенности посадок с зазором.
5. Поясните смысл линейной интерполяции табличных данных

Литература

1. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия: учеб. для вузов. М.: Юрайт, 2016. 411 с.

2. Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация. В 3 ч. Ч. 1. Метрология: учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2016. 235 с.

3. Схиртладзе А.Г., Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и технические измерения: учеб. для вузов. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 420 с.

4 Метрология, стандартизация и сертификация. Практикум : учеб. пособие для вузов / В.Н. Кайнова, Т.Н. Гребнева, Е.В. Тесленко, Е.А. Куликова; под ред. В.Н. Кайновой. СПб.: Лань, 2015. 368 с.

5. Иванов А.И., Полещенко П.В. Практикум по взаимозаменяемости, стандартизации и техническим измерениям. М.: Колос, 1977. 224 с.

Приложение А
Исходные данные для расчета

№ варианта	номинальный диаметр соединения $d = D$, мм	длина подшипника, l , мм	угловая скорость, ω , рад/с	динамический коэффициент вязкости, η , Па·с	удельное давление на опору, ρ , МПа	шероховатость вала, $R_{\text{дв}}$, мкм	шероховатость отверстия, $R_{\text{от}}$, мкм
1	58	40	90	0,07	11	3,2	3,2
2	20	17	70	0,01	7	6,3	6,3
3	88	50	110	0,01	17	6,3	6,3
4	44	80	110	0,03	17	2,5	6,3
5	58	60	100	0,04	11	3,2	3,2
6	50	48	110	0,03	16	6,3	2,5
7	70	60	109	0,02	14	6,3	3,2
8	40	60	60	0,02	8	4	6
9	66	51	100	0,01	11	2,5	6,3
10	48	45	130	0,02	11	3,2	3,2
11	48	70	150	0,04	8	6,3	3,2
12	93	48	137	0,02	19	6,3	3,2
13	30	45	87	0,04	17	3,2	3,2
14	50	37	190	0,04	21	3,2	2,5
15	60	45	130	0,01	19	3,2	2,5
16	87	45	105	0,09	17	6,3	6,3
17	40	50	80	0,02	21	3,2	5,0
18	40	70	100	0,02	4	2,5	4,0
19	30	50	100	0,02	3,2	1,5	2,5
20	30	40	40	0,04	1,8	1,6	3,2
21	30	50	100	0,04	2	3,2	5,0
22	30	30	90	0,03	11	2,5	2,5
23	64	50	100	0,01	21	2,5	6,3
24	38	40	85	0,07	18	6,3	3,2
25	50	80	60	0,04	5	6,3	6,3
26	40	65	90	0,02	14	4,0	6,3
27	80	40	65	0,05	12	2,5	6,3
28	30	40	60	0,04	11	4,0	6,3
29	40	60	80	0,04	21	2,5	3,2
30	60	70	100	0,02	5,6	1,6	3,2

Приложение Б

Основные смазочные масла для машино- и приборостроения

Наименование, марка масла	Стандарт	Вязкость	
		кинематическая $\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	динамическая ρ , $\text{Па} \cdot \text{с}$
Легкие индустриальные:	ГОСТ 20799—88	4,0—5,0	0,0036—0,0045
И-5А (велосит)	ГОСТ 20799—88	6,0—8,0	0,0054—0,0072
И-8а (вазелиновое)	ГОСТ 1805—76	6,5—8,0	0,0058—0,0072
Приборное МВП Средние индустри- альные: И-12К (И-12)	ГОСТ 20799—88	10,0—14,0	0,0090—0,0126
И-20А (И-20)	ГОСТ 20799—88	17,0—23,0	0,0153—0,0207
И-25А (ИС-25)		24,0—27,0	0,0216—0,0242
И-30А (И-30)		28,0—33,0	0,0252—0,0297
И-40А (И-45)		35,0—45,0	0,0315—0,0405
И-50А (И-50)		47,0—55,0	0,0423—0,0495
И-70А (ИС-65)		65,0—75,0	0,0585—0,0675
Турбинные:	ГОСТ 32—74	20,0—23,0	0,0180—0,0207
Т22 (Л)		28,0—32,0	0,0252—0,0288
Т30 (УТ)		44,0—48,0	0,0396—0,0432
Т46 СД Т57 (турборедук- торные)		55,0—59,0	0,0495—0,0531

Приложение В

Значения относительного эксцентриситета подшипника χ в зависимости от коэффициента нагруженности C_p

χ	Коэффициент нагруженности C_R при l/D											
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0
0,3	0,089	0,133	0,182	0,234	0,287	0,339	0,391	0,440	0,487	0,529	0,610	0,763
0,4	0,141	0,209	0,283	0,361	0,429	0,515	0,589	0,658	0,723	0,784	0,891	1,091
0,5	0,216	0,317	0,427	0,538	0,647	0,754	0,853	0,947	1,033	1,111	1,248	1,483
0,6	0,339	0,493	0,655	0,816	0,972	1,118	1,253	1,377	1,489	1,590	1,763	2,070
0,65	0,431	0,622	0,819	1,014	1,199	1,371	1,528	1,669	1,796	1,912	2,099	2,446
0,7	0,537	0,819	1,070	1,312	1,538	1,745	1,929	2,097	2,247	2,379	2,600	2,981
0,75	0,779	1,096	1,418	1,720	1,965	2,248	2,469	2,664	2,838	2,990	3,242	3,671
0,8	1,079	1,572	2,001	2,339	2,754	3,067	3,372	3,580	3,787	3,968	4,266	4,778
0,85	1,775	2,428	3,036	3,580	4,053	4,459	4,808	5,106	5,364	5,586	5,947	6,545
0,9	3,195	4,261	5,214	6,029	6,721	7,294	7,772	8,186	8,533	8,831	9,304	10,091
0,925	5,055	6,615	7,956	9,072	9,992	10,753	11,38	11,91	12,35	12,73	13,34	14,34
0,95	8,393	10,706	12,64	14,14	15,37	16,37	17,18	17,86	18,43	18,91	19,68	20,97
0,975	21,00	25,62	29,17	31,88	33,99	35,66	37,00	38,12	39,04	39,81	41,07	43,11
0,99	65,26	75,86	83,21	88,90	92,89	96,36	98,95	101,2	102,9	104,4	106,8	110,8

Примечание. Промежуточные значения C_R следует получать интерполяцией табличных данных. У половинных подшипников (с углом охвата 180°) масляный слой создается на половине длины окружности.

Приложение Г
 Предельные зазоры в посадках с зазором при размерах от 1 до 315 мм
 (ГОСТ 25346-89)

Номинальные размеры, мм	Посадки в системе отверстия							
	H5/g4	H5/h4	H6/f6	-	H6/g5	H6/h5	-	H7/d8
	Посадки в системе вала							
	G5/h4	H5/h4	-	F7/h5	G6/h5	H6/h5	D8/h6	D8/h7
	Предельные зазоры S_{max} , S_{min} , мкм							
От. 1 до 3	9	7	18	20	12	10	40	44
	2	0	6	6	2	0	20	20
Св. 3 до 6	13	9	26	27	17	13	56	60
	4	0	10	10	4	0	30	30
Св. 6 до 10	15	10	31	34	20	15	71	77
	5	0	13	13	5	0	40	40
Св. 10 до 18	19	13	38	42	25	19	88	95
	6	0	16	16	6	0	50	50
Св. 18 до 30	22	15	46	50	29	22	111	119
	7	0	20	20	7	0	65	65
Св. 30 до 50	27	18	57	61	36	27	135	144
	9	0	25	25	9	0	80	80
Св. 50 до 80	31	21	68	73	42	32	165	176
	10	0	30	30	10	0	100	100
Св. 80 до 120	37	25	80	86	49	37	196	209
	12	0	36	36	12	0	120	120
Св. 120 до 180	44	30	93	101	57	43	233	248
	14	0	43	43	14	0	145	145
Св. 180 до 250	49	34	108	116	64	49	271	288
	15	0	50	50	15	0	170	170
Св. 250 до 315	56	39	120	131	72	55	303	323

Продолжение Приложения Г

Номинальные размеры, мм	Посадки в системе отверстия							
	H8/d 8	H8/d 9	H8/e 8	H8/e 9; H9/e 8	H8/f 7	H8/f 8	H8/f 9; H9/f 8	H8/h 7
	Посадки в системе вала							
	D8/h 8	D9/h 8	E8/h 8	E9/h 8	F8/h 7	F8/h 8	F9/h 8	H8/h 7
	Предельные зазоры S_{max} S_{min} , мкм							
От. 1 до 3	48	59	42	53	30	34	45	24
	20	20	14	14	6	6	6	0
Св. 3 до 6	66	78	56	68	40	46	58	30
	30	30	20	20	10	10	10	0
Св. 6 до 10	84	98	69	83	50	57	71	37
	40	40	25	25	13	13	13	0
Св. 10 до 18	104	120	86	102	61	70	86	45
	50	50	32	32	16	16	16	0
Св. 18 до 30	131	150	106	125	74	86	105	54
	65	65	40	40	20	20	20	0
Св. 30 до 50	158	181	128	151	89	103	126	64
	80	80	50	50	25	25	25	0
Св. 50 до 80	192	220	152	180	106	122	150	76
	100	100	60	60	30	30	30	0
Св. 80 до 120	228	261	180	213	125	144	177	89
	120	120	72	72	36	36	36	0
Св. 120 до 180	271	308	211	248	146	169	206	103
	145	145	85	85	43	43	43	0
Св. 180 до 250	314	357	244	287	168	194	237	118
	170	170	100	100	50	50	50	0
Св. 250 до 315	352	401	272	321	189	218	267	133
	190	190	110	110	56	56	56	0

Продолжение Приложения Г

Номинальные размеры, мм	Посадки в системе отверстия							
	H8/h 9; H9/h 8	H9/d 9	-	H9/e9	H9/f9	H9/ h9	H10/d 10	H10/ h9
	Посадки в системе вала							
	H8/h 9	D9/h 9	D10 /h9	E9/h9	F9/h9	H9/ h9	D10/h 10	H10/ h9
	Предельные зазоры S_{max} S_{min} , мкм							
От. 1 до 3	39	70	85	64	56	50	100	65
	0	20	20	14	6	0	20	0
Св. 3 до 6	48	90	108	80	70	60	126	78
	0	30	30	20	10	0	30	0
Св. 6 до 10	58	112	134	97	85	72	156	92
	0	40	40	25	13	0	40	0
Св. 10 до 18	70	136	163	118	102	86	190	113
	0	50	50	32	16	0	50	0
Св. 18 до 30	85	169	201	144	124	104	233	136
	0	65	65	40	20	0	65	0
Св. 30 до 50	101	204	242	174	149	124	280	162
	0	80	80	50	25	0	80	0
Св. 50 до 80	120	248	294	208	178	148	340	194
	0	100	100	60	30	0	100	0
Св. 80 до 120	141	294	347	246	210	174	400	227
	0	120	120	72	36	0	120	0
Св.120 до 180	163	345	405	285	243	200	465	260
	0	145	145	85	43	0	145	0
Св.180 до 250	187	400	470	330	280	230	540	300
	0	170	170	100	50	0	170	0
Св.250 до 315	211	450	530	370	316	260	610	340
	0	190	190	110	56	0	190	0

Продолжение Приложения Г

Номинальные размеры, мм	Посадки в системе отверстия							
	H7/c 8	H11/ a11	H11 /b11	H11/c 11	H11/ b11	H11/h 11	H12 /b12	H12/ h12
	Посадки в системе вала							
	-	A11/ h11	B11 /h11	C11/h 11	D11/ h11	H11/h 11	B12/ h12	H12/ h12
Предельные зазоры S_{max} S_{min} , мкм								
От. 1 до 3	84	390	260	180	140	120	340	200
	60	270	140	60	20	0	140	0
Св. 3 до 6	100	420	290	220	180	150	380	240
	70	270	140	70	30	0	140	0
Св. 6 до 10	117	460	330	260	220	180	450	300
	80	270	150	80	40	0	150	0
Св. 10 до 18	140	510	370	315	270	220	510	360
	95	290	150	95	50	0	150	0
Св. 18 до 30	164	560	420	370	325	260	580	420
	110	300	160	110	65	0	160	0
Св. 30 до 40	184	630	490	440	400	320	670	500
	120	310	170	120	80	0	170	0
Св. 40 до 50	194	640	500	450	400	320	680	500
	130	320	180	130	80	0	180	0
Св. 50 до 65	216	720	570	520	480	380	790	600
	140	340	190	140	100	0	190	0
Св. 65 до 80	226	740	580	530	480	380	800	600
	150	360	200	150	100	0	200	0
Св. 80 до 100	259	820	660	610	560	440	920	700
	170	380	220	170	120	0	220	0
Св. 100 до 120	269	850	680	620	560	440	940	700
	180	410	240	180	120	0	240	0

Продолжение Приложения Г

Номинальные размеры, мм	Посадки в системе отверстия							
	H7/c 8	H11/ a11	H11/ b11	H11/c 11	H11/ b11	H11/ h11	H12/b 12	H12/ h12
	Посадки в системе вала							
	-	A11/ h11	B11/ h11	C11/h 11	D11/ h11	H11/ h11	B12/h 12	H12/ h12
	Предельные зазоры S_{max} S_{min} , мкм							
Св.120 до 140	303	960	760	700	645	500	1060	800
	200	460	260	200	145	0	260	0
Св.140 до 160	313	1020	780	710	645	500	1080	800
	210	520	280	210	145	0	280	0
Св.160 до 180	333	1080	810	730	645	500	1110	800
	230	580	310	230	145	0	310	0
Св.180 до 200	358	1240	920	820	750	580	1260	920
	240	660	340	240	170	0	340	0
Св.200 до 225	378	1320	960	840	750	580	1300	920
	260	740	380	260	170	0	380	0
Св.225 до 250	398	1400	1000	860	750	580	1340	920
	280	820	420	280	170	0	420	0
Св.250 до 280	433	1560	1120	940	830	640	1520	1040
	300	920	480	300	190	0	480	0
Св.280 до 315	463	1690	1180	970	830	640	1580	1040
	330	1050	540	330	190	0	540	0
Св.315 до 355	506	1920	1320	1080	930	720	1740	1140
	360	1200	600	360	20	0	600	0
Св.355 до 400	545	2070	1400	1120	930	720	1820	1140
	400	1350	680	400	210	0	680	0
Св.400 до 450	600	2300	1560	1240	1030	800	2020	1260
	440	1500	760	440	230	0	760	0

Учебное издание

Киселева Лариса Сергеевна
Будко Сергей Иванович

РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Методическое пособие для практической
и самостоятельной работы по курсу
«Основы взаимозаменяемости и технические измерения»

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 17.11.2021 г. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 1,91. Тираж 25 экз. Изд. № 7113.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ