

Оптимальные рабочие скорости для основных технологий почвообработки (табл.) обеспечиваются переходом с 1-й (нижней) на 3-4-ю (высшую) передачу основного диапазона. Трактор работает при этом в зоне максимального тягового КПД, обеспечивая перекрытие скоростного диапазона  $\delta v^* = v_{opt\ max}^* / v_{opt\ min}^* = 1,56$  тяговым диапазоном  $\delta T^* = \varphi_{KP\ max}^* / \varphi_{KP\ min}^*$ , равным 1,56 на одинарных и 1,69 на сдвоенных колесах.

Предлагаемые варианты оптимизации удельного энергетического потенциала тракторов общего назначения являются наиболее простыми и нашли широкое применение при их адаптации к природно-производственным условиям.

### Выводы

1. Установлены функциональные связи удельных показателей энергетического потенциала и эксплуатационной массы колесного трактора общего назначения с тягово-скоростными режимами их использования на разных видах основной обработки почвы.

2. Определены рациональные диапазоны изменения удельного энергетического потенциала и эквиваленты эксплуатационной массы трактора разной комплектации, а также способы их реализации на основных видах обработки почвы.

3. Для характерной в АПК Красноярского края занятости тракторов «Кировец» на разных видах почвообработки наиболее рационально по критериям ресурсосбережения использовать тракторы К-744Р<sub>2</sub> и К-744Р<sub>3</sub> на одинарных и сдвоенных колесах.

### Литература

1. Селиванов Н.И. Эффективное использование энергонасыщенных тракторов. – Красноярск, 2008. – 208 с.



УДК621.517,681.142.36

*В.А. Меновщиков, С.И. Щелканов,  
А.С. Кайгородов, А.А. Шаронов*

### ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

*В данной статье излагается теория определения смещения тел в контакте подшипника скольжения с учетом влияния шероховатости поверхностей. Рассматриваются явления в момент, предшествующий началу движения, так называемое предварительное смещение, под которым обычно понимают процессы, происходящие на контакте при переходе к скольжению.*

**Ключевые слова:** *подшипник скольжения, контакт, предварительное смещение, трение, коэффициент трения, коэффициент жесткости, шероховатость поверхностей, работоспособность.*

*V.A.Menovshchikov, S.I.Shchelkanov,  
A.S.Kaygorodov, A.A.Sharonov*

### INFLUENCE OF PRELIMINARY DISPLACEMENT IN THE CONTACT ZONE ON THE SLIDING BEARING NORMAL OPERATION

*The theory for body displacement determination in the sliding bearing contact taking into account the surface roughness influence is reported in the article. The phenomena in the moment, which goes before the motion start, so-called preliminary displacement, which is usually understood as the processes that occur at the contact in the process of transition to sliding, are considered.*

**Keywords:** *sliding bearing, contact, preliminary displacement, friction, friction factor, rigidity factor, surface roughness, normal operation.*

---

**Введение.** Физическая картина работы цилиндрического подшипника скольжения, несущего радиальную нагрузку, хорошо отображается диаграммой Герси-Штрибека [1, 2]. Диаграмма строится на основе экс-

периментальных данных (рис. 1), особый интерес на данной кривой представляет участок (1-2), который соответствует страгиванию вала из состояния покоя. В этой зоне имеет место «сухое трение» со значительным коэффициентом трения, сопровождаемое высокой интенсивностью изнашивания и возможностью возникновения задира или заедания. Началу движения вала во втулке предшествует предварительное смещение в контакте.

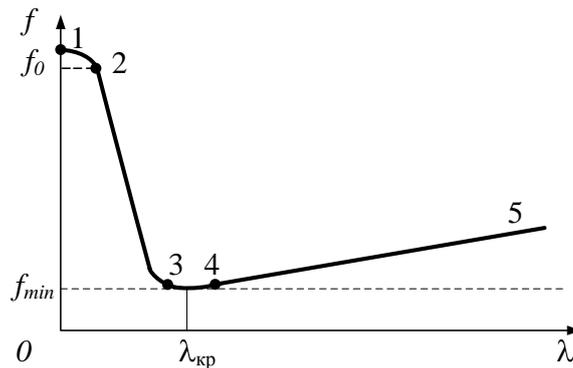


Рис. 1. Диаграмма Герси-Штрибека

**Объект исследования.** Объектом нашего исследования послужил подшипник скольжения, используемый во многих отраслях промышленного производств.

**Цели и задачи исследования.** Соприкосновение вала и втулки в подшипнике скольжения можно рассматривать как систему, обладающую определенными физическими свойствами. Изучение свойств этой связи, её формирования и разрушения имеет большое значение для анализа явлений, происходящих в контакте.

Наибольший интерес представляют явления, возникающие на контакте, в момент, предшествующий началу движения, так называемое предварительное смещение, под которым обычно понимают процессы, происходящие на контакте при переходе к скольжению. В данный период времени присутствует граничное трение, наличие как металлического контакта, так и жидкостного.

Если к телу 1, находящемуся в контакте с телом 2 (рис. 2), приложить сдвигающую силу  $F$ , то до начала скольжения появится смещение, равное предварительному смещению  $\Delta$  в сторону действия силы  $F$ . Значение силы  $F$  в области предварительного смещения зависит от силы трения покоя  $F_{тр}$ .

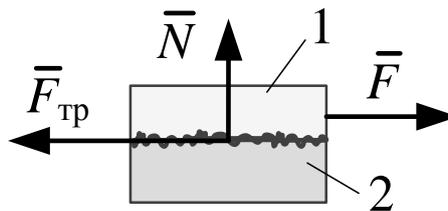


Рис. 2. Контакт шероховатых тел

Закон изменения силы трения в зависимости от перемещения представлен на рисунке 3. При этом в области предварительного смещения сила  $|\bar{F}| \leq |\bar{F}_{тр}|$ . Сила трения на участке (о-а), (следуя рис. 3), подчиняется закону

$$\bar{F}_{тр} = cx, \tag{1}$$

где  $c$  – коэффициент жесткости контактирующих поверхностей [Н/м],  $x$  – смещение тела 1 в пределах от 0 до  $\Delta$ .

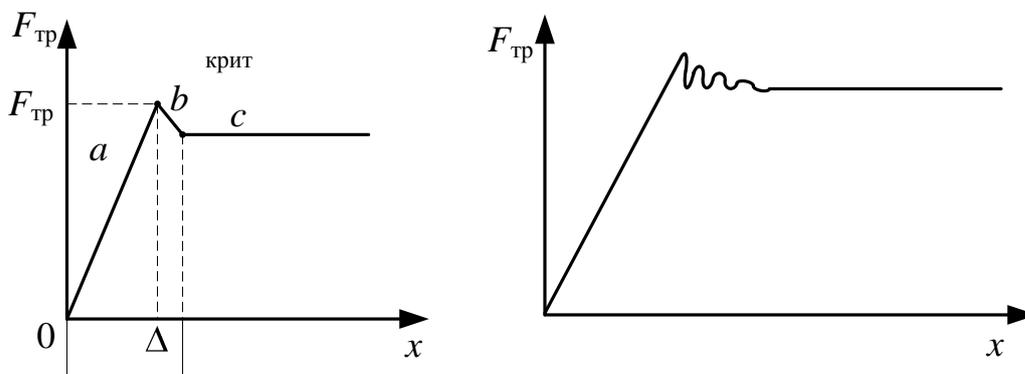


Рис. 3. Закон изменения силы трения в зависимости от перемещения

Дифференциальное уравнение движения тела 1 имеет вид

$$m\ddot{x} = F - cx. \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (2) к виду

$$m\dot{x}d\dot{x} = F - cx \, dx. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) при начальных условиях:  $t=0, x \ 0 = 0, \dot{x} \ 0 = 0$ , получим

$$\dot{x} = \left( 2 \frac{F}{m} x - \frac{c}{m} x^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Решаем уравнение (4) относительно  $t$

$$t = \int \frac{dx}{\left( -\frac{c}{m} x^2 + 2\frac{F}{m} x \right)^{\frac{1}{2}}} = -\sqrt{\frac{m}{c}} \arcsin \left( 1 - \frac{c}{F} x \right) + C_2. \quad (5)$$

Значение  $C_2$  определим из (5) при соответствующих начальных условиях  $C_2 = \sqrt{\frac{m}{c}} \cdot \frac{\pi}{2}$ , тогда с учетом значения постоянной

$$t = -\sqrt{\frac{m}{c}} \arcsin \left( 1 - \frac{c}{F} x \right) + \sqrt{\frac{m}{c}} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

Используя уравнение (6), выразим перемещение  $x$  тела 1 в зависимости от времени

$$x = \frac{F}{c} \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{c}{m}} t \right) \right]. \quad (7)$$

Анализ движения тела 1 показывает, что на участке (b-c) при  $|\bar{F}| = |\bar{F}_{тр}|$  движение подобно затухающим колебаниям (рис. 3,б). Амплитуда этих колебаний равна  $A = \frac{F}{c}$ , т.е. максимальная амплитуда колебаний равна предварительному смещению  $\Delta$ .

Принимая  $x = \Delta$ , из уравнения (7) определим время, за которое произойдет предварительное смещение

$$t_{п.с.} = \sqrt{\frac{m}{c}} \arccos \left( 1 - \frac{c}{F} \Delta \right). \quad (8)$$

В формуле (8) подлежат определению коэффициент жесткости  $c$  и величина предварительного смещения  $\Delta$ . Данные параметры зависят от физико-механических свойств контактирующих материалов и геометрии поверхностей (шероховатость, волнистость).

При скольжении контактирующих поверхностей вначале происходит процесс приработки, в результате которого шероховатость поверхностей при дальнейшей эксплуатации остается почти постоянной. Поскольку изменение микрогеометрии поверхности еще недостаточно изучено, то, по-видимому, контакт следует рассматривать при условии сохранения прирабочной шероховатости. Следует также отметить тот факт, что после приработки контакт шероховатостей поверхностей будет в основном упругим, в крайнем случае упругопластическим, с преобладанием упругих деформаций. При упругом контакте приложение тангенциальной силы приводит к смещению точки с  $\tau_{max}$  к поверхности соприкасающихся тел.

Допустим, что после приработки неровности соприкасающихся поверхностей равновысотны и имеют сферическую форму. Следует отметить, что нагрузка в подшипнике скольжения распределяется в основном по наибольшим контурным площадям, полученным после приработки наиболее выступающих неровностей [3]. Такие неровности деформируются в упругой области и имеют контурные площади контакта ( $A_c$ ), изменение площади которых при многократном нагружении не превышает 5 % [4].

Рассмотрим контакт сферических выступов неровностей (рис. 4).

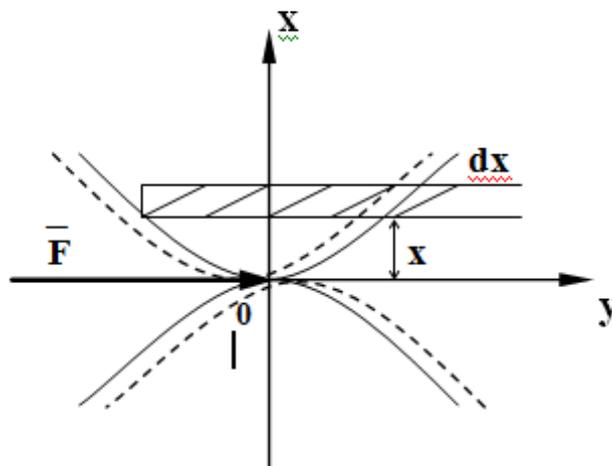


Рис. 4. Расчетная схема

Под действием силы  $F$  происходит упругое смещение неровностей в точке  $O$ . Для сечения с координатой  $x$  смещение  $y$  определяется уравнением

$$E J_z \frac{d^2 x}{dy^2} = M(y) \text{ , или } E J_z \frac{d^2 x}{dy^2} = -F \cdot y \text{ ,} \quad (9)$$

где  $E$  – приведенный модуль нормальной упругости,  $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$ ;

$J_z$  – момент инерции, определяемый по формуле [6],  $J_z = \frac{\pi \cdot z^4}{4}$ .

Выражая  $z$  через  $R$  и  $y$ , получим

$$J_z = \frac{\pi}{4} y^2 (2R - y)^2 \quad (10)$$

Подставляя выражение (10) в уравнение (9), имеем

$$\frac{d^2 x}{dy^2} = -\frac{4F}{\pi E y^2 (2R - y)^2} \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (11), получим

$$\frac{dx}{dy} = \frac{F}{\pi E} \left( \frac{1}{R^2} \ln \frac{2R - y}{y} - \frac{2}{R(2R - y)} \right) + C_1 \quad (12)$$

При начальных данных  $x_0 = 0, y_0 = R, \frac{dx}{dy} \Big|_{y=R} = 0$   $C_1 = \frac{2F}{\pi ER^2}$ .

Решая уравнение (12) относительно  $x$ , найдем смещение  $\Delta$ . При  $y = 0$

$$\Delta = x = -\frac{2F}{\pi ER} \quad (13)$$

Вводя в формулу (13) число основных неровностей на контакте по теореме Кастильяно [6] при  $n > 1$ , получим

$$\Delta_1 = x_1 = -\frac{2F}{(2n - 1) \pi ER} \quad (14)$$

Применяя (14) в уравнении (8) и заменяя  $c = E \cdot S$ . (здесь  $S$  – суммарная контурная площадь), получим

$$t_{п.с.} = \frac{1}{k^2} \arccos \left[ 1 + \frac{2SF}{\pi RE \cdot 2n-1} \right] \quad (15)$$

При этом в формуле (15)  $P < F$ , т.е. значение силы  $P$  соответствует силе трения в точке  $b$  (см. рис. 3), а  $F$  будет равной силе трения покоя в точке  $a$ .

Сдвигающая сила  $P$  может быть определена по формуле [5]

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^a \tau \rho d\rho d\varphi, \quad (16)$$

где  $t$  – напряжение сдвига, определяемое из выражения

$$\tau = \frac{3f_{сц}N}{2\pi a^3} \sqrt{a^2 - \rho^2} - 2\sqrt{d^2 - \rho^2}, \quad (17)$$

причем  $c \leq \rho \leq d$ .

После подстановки (17) в (16) имеем

$$P = \frac{fN}{a^3} \left[ a^3 - b^3 - 2d^3 - c^3 \right], \quad (18)$$

где  $a, b, c, d$  – параметры сдвигаемых сферических неровностей.

**Выводы.** Таким образом, первоначальный сдвиг шероховатых поверхностей в основном зависит от коэффициента сцепления неровностей, который в значительной степени определяется микрогеометрией и физико-механическими свойствами контактирующих поверхностей.

#### Литература

1. Мур Д. Основы применения трибологии. – М.: Мир, 1978. – 487 с.
2. Коднир Д.С. Контактная гидродинамическая теория смазки. – М.: Машиностроение, 1975.
3. Галахов М.А., Бурмистров А.Н. Расчет подшипниковых узлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбанов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Максак В.И. Предварительные смещение и жесткость механического контакта. – М.: Наука, 1975. – 59 с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1989 – 512 с.

