

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНОАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА НЕНЬЮТОНОВСКИХ МАСЛАХ

И.Г. Леванов

Введение. Сегодня при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания наибольшее распространение получили всесезонные моторные масла. Их круглогодичное применение целесообразно вследствие большего, чем у сезонных, индекса вязкости. Кроме того, использование всесезонных масел уменьшает образование отложений, облегчает запуск двигателя при низких температурах, а также способствует повышению ресурса, благодаря несколько большей, чем у сезонных, вязкости при повышенных температурах.

Однако, эффективное применение масел таких классов возможно только в том случае, если это допускает конструкция двигателя, в частности, подшипников скольжения коленчатого вала. Это связано с некоторыми особенностями реологического поведения всесезонных масел. В частности, с зависимостью вязкости от скорости сдвига, наличием вязкоупругих эффектов.

Исследованию влияния неньютоновских свойств масел на характеристики трибосопряжений посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, обзор которых выполнен в [1]. Очевидно, что пренебрежение этими свойствами при расчётах таких трибосопряжений как подшипники коленчатого вала может привести к неправильной оценке их работоспособности. Несмотря на это, методики учёта неньютоновских

свойств моторных масел пока не получили широкого распространения в отечественной практике проектирования подшипников скольжения коленчатых валов. Это обусловлено, во-первых, недостаточным объёмом информации о реологическом поведении современных моторных масел в подшипнике скольжения; во-вторых, отсутствием методики, позволяющей оценивать одновременное влияние различных неньютоновских свойств моторных масел на динамику подшипников скольжения коленчатого вала.

В данной работе предпринята попытка разработать такую методику, а также соответствующее программное обеспечение, пригодные для инженерной практики.

Описание методики. Методики расчёта сложнонагруженных подшипников скольжения, как правило, базируются на совокупности методов решения четырёх взаимосвязанных задач:

1. Расчёт поля гидродинамических давлений в смазочном слое, разделяющем поверхности цапфы и втулки, при произвольном законе их относительного движения.

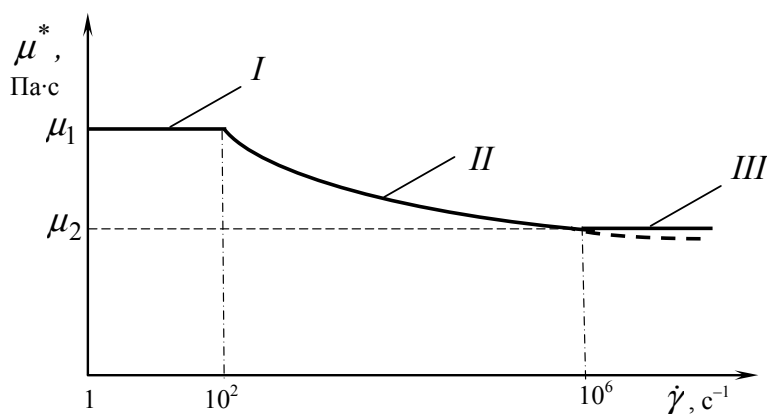
2. Расчёт температуры смазочного слоя.

3. Решение уравнений движения центра цапфы и построение её траектории.

4. Расчёт интегральных характеристик подшипников.

Поле гидродинамических давлений определяется из уравнения Рейнольдса при граничных условиях Свифта–Штибера [2]. С точки зрения гидродинамической теории смазки, как теоретического фундамента для расчёта подшипников скольжения ДВС, вязкость, входящая в обобщенное уравнение Рейнольдса, является наиболее важной характеристикой смазочного материала. Изменение вязкости влияет на распределение гидродинамических давлений в подшипнике скольжения и, следовательно, на все его гидромеханические характеристики. В связи с этим задача исследования реологических свойств всесезонных моторных масел и обоснование выбора реологической модели являются принципиальными для методики расчёта.

Для аппроксимации зависимости вязкости от скорости предлагается использовать комбинированную модель (см. рисунок).



Комбинированная модель вязкости

На участке I в диапазоне скоростей сдвига от 1 до 10^2 с^{-1} масло ведёт себя как ньютоновская жидкость с вязкостью μ_1 . Для участка II в диапазоне скоростей сдвига от 10^2 до 10^6 с^{-1} характерно снижение вязкости по степенному закону [1]. На участке III при скорости сдвига больше 10^6 с^{-1} масло ведёт себя как ньютоновская жидкость с вязкостью μ_2 .

Значения вязкостей μ_1 и μ_2 , а также параметры степенного закона определяются из экспериментальных данных.

Используется предположение, что течение жидкости в тонком смазочном слое изотермическое. Вязкость рассчитывается как функция некоторой эффективной температуры $T_{\text{э}}$, значение которой определяется из уравнения теплового баланса, отражающего равенство количеств теплоты, рассеиваемой в смазочном слое и отводимой смазкой, вытекающей в торцы подшипника на каждом временном шаге расчёта траектории центра цапфы.

Зависимость вязкости от скорости сдвига, температуры и давления имеет вид:

$$\mu^* = \mu \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot e^{\alpha(T) \cdot p} \cdot C_1 \cdot e^{C_2/(T+C_3)}.$$

Здесь μ – вязкость при скорости сдвига $\dot{\gamma}$ до 10^2 с^{-1} ; n – параметр степенного закона; $\alpha(T)$ – пьезокоэффициент вязкости смазки, являющийся функцией температуры; p – гидродинамическое давление; C_1, C_2, C_3 – экспериментальные константы [3].

Вязкоупругие свойства смазки учитываются путём замены внешней нагрузки, действующей на подшипник, модифицированной с учётом времени релаксации.

Экспериментальные исследования вязкости. Исследования были выполнены в соответствии с рекомендациями, изложенными в руководстве по эксплуатации к измерительному комплексу Rheotest RN 4.1. Методика эксперимента включает следующие основные этапы: калибровка, температуростатирование, измерение, обработка результатов. В табл. 1 представлены результаты измерений вязкости масла класса SAE 10W-40.

Таблица 1

Результаты измерений вязкости масла класса SAE 10W-40

Масло		Температура, T , °C				
		40	80	100	120	150
10W-40	μ , мПа·с	70,78	18,12	11,38	8,50	6,43
	$n(T)$	0,991	0,995	0,987	0,971	0,940
		$n(T) = -7,04580446 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8,24586570 \cdot 10^{-4} \cdot T + 9,74477918 \cdot 10^{-1}$				

Аналогичные зависимости получены для масел классов 0W-30, 5W-30, 5W-40, 15W-40, 5W-50.

Результаты расчёта. Методика реализована в комплексе программ «Неньютон-II», имеющим удобный интерфейс для работы [4]. Результаты расчёта характеристик шатунного подшипника двигателя 4ЧН 13/15.

Таблица 2

Результаты расчёта гидромеханических характеристик шатунного подшипника двигателя 4ЧН 13/15

Масло	Характеристика							
	$\inf h_{\min}$, мкм	$\alpha_{h_{\min}}$, ° П.К.В.	$\sup p_{\max}$, МПа	N^* , Вт	h_{\min}^* , мкм	p_{\max}^* , МПа	Q_B^* , 10^{-1} л/с	T_{Σ} , °С
10W-40	2,715 ¹	292,3	575,8	692,4	5,804	65,39	0,2358	107,9
	2,297 ²	285,0	1143	644,0	5,276	77,64	0,2706	104,5
5W-50	2,932 ¹	292,0	450,2	747,8	6,357	60,37	0,2221	110,6
	2,606 ²	285,0	1066	740,6	5,999	70,57	0,2452	108,5

Примечания:

¹ без учёта неньютоновских свойств (вязкость–функция температуры и давления);

² с учётом неньютоновских свойств (вязкость–функция температуры, давления, градиента скорости сдвига; время релаксации смазки $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ с).

Результаты показывают, что учёт неньютоновских свойств масел приводит к снижению минимальной толщины смазочного слоя на 11–23 %, потерь мощности на трение на 9–30 %, температуры смазочного слоя на 3 %, к повышению максимальных гидродинамических давлений на 35–50 %.

Применение разработанного методического и программного обеспечения в инженерной практике позволит на ранних стадиях проектирования машин учесть влияние реологических свойств смазочного материала на характеристики сложнонагруженных подшипников жидкостного трения, обоснованно подходить к выбору класса вязкости масла.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», Российского фонда фундаментальных исследований, Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Библиографический список

1. Леванов, И.Г. Обзор реологических моделей моторных масел, используемых при расчётах динамики подшипников скольжения коленчатого вала / И.Г. Леванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10. – С. 54–62.
2. Прокопьев, В.Н. Динамика сложнонагруженного подшипника, смазываемого неньютоновской жидкостью / В.Н. Прокопьев, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 6. – С. 108–114.

3. Прокопьев, В.Н. Влияние неньютоновских свойств масел на нагруженность шатунных подшипников коленчатого вала / В.Н. Прокопьев, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов // Двигателестроение. – 2008. – № 3. – С. 40–42.

4. Комплекс программ анализа динамики и гидромеханических характеристик подшипников скольжения, работающих на неньютоновских маслах «Неньютон-II» [Программа для ЭВМ] / В.Н. Прокопьев, Е.А. Задорожная, А.К. Бояршинова, И.Г. Леванов. – № 2007613507; зарегистрирован Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 20.06.2007.