

# **Моделирование сложнонагруженных трибосопряжений поршневых и роторных машин**

Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В

*Челябинский государственный технический университет*

Научные достижения гидродинамической теории смазки за свою столетнюю историю огромны, однако проблемы нелинейной динамики валов на подшипниках скольжения жидкостного (гидродинамического) трения остаются актуальными и продолжают привлекать внимание специалистов. Одна из таких проблем связана с решением задач устойчивости уравновешенного и неуравновешенного ротора, вторая с изучением режимов смазки сложнонагруженных опор, т.е. опор, нагруженных силами переменными по величине и направлению. Изучение этих проблем началось практически одновременно, однако развитие их шло обособленно, несмотря на одинаковые отправные положения и теоретический фундамент.

Нелинейным задачам динамики сложнонагруженных опор жидкостного трения посвящена обширная литература, анализ которой позволяет утверждать о наличии двух школ. Первая из них - школа последователей Д.Холланда. Основой предложенных ими решений является не обобщенное уравнение Рейнольдса, описывающее распределение давлений в смазочном слое опоры, шип которой совершает произвольные движения, а его частные аналоги. Разрабатывая некоторое время различные версии метода Д.Холланда, мы пришли к выводу, что наряду с достоинствами, он обладает и принципиальными недостатками из-за которых достоверность количественных, а в ряде случаев качественных результатов, получаемых с его помощью, не гарантирована. Концепция, которой придерживаются сторонники второй школы - необходимость и возможность решения нелинейных задач динамики опор жидкостного трения на основе обобщенного уравнения Рейнольдса для гидродинамических давлений, нелинейных уравнений движения шипа в пространстве зазора, уравнения энергии и для нежестких (упругоподатливых опор) систем уравнений для расчета упругих деформаций поверхностей трения.

В отечественной литературе направление, избранное этой школой, развивается с 1970 г. в основном работами, выполняемыми в Челябинском государственном техническом университете (кафедра "Автомобильный транспорт", вузовско-академическая лаборатория "Триботехника").

Поэтому авторы сочли возможным ограничиться ссылками только на собственные публикации, хотя отдают отчет о фундаментальном вкладе в решение различных задач, касающихся моделирования сложнонагруженных трибосопряжений зарубежных исследователей: Аллэра, Блока, Букера, Генки, Камерона, Керка, Конвея, Ланга, Ли, Ллойда, Макколина, Моеса, Мартина, Отта, Роде, Фантино, Хаана, Хейса, Чайлдса, Шавки.

За истекший более чем двадцатилетний период решались различные задачи трибоанализа шатунных и коренных опор коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания, поршневых компрессоров, задачи устойчивости ротора быстроходных турбомашин. Этому предшествовали теоретические исследования, на основе которых созданы высокоэффективные быстросходящиеся методы интегрирования уравнения Рейнольдса для давлений в смазочном слое, базирующиеся на малораспространенных идеях Федоренко-Брандта интегрирования уравнений второго порядка в частных производных на последовательности сетей. Эти методы обеспечили повышение скорости решения системы уравнений в десятки раз по сравнению с традиционными, что позволило впервые объединить методы нелинейного анализа динамики сложнонагруженных опор с задачами их теплового расчета и получить результаты без

различных упрощающих допущений, влияющих на точность полученных результатов [1-4].

Проведенные исследования позволили обосновать границы применимости гипотезы об изотермичности теплового режима смазки сложнонагруженных опор. В разработанном методе термогидродинамического расчета наличие на поверхностях шипа и подшипника источников смазки, в том числе подвижных, учитывается при интегрировании обобщенного уравнения Рейнольдса в граничных условиях для давлений. Достаточная точность, возможность учета большинства важных в практическом отношении конструктивных и режимных параметров опор, позволили использовать метод для решения задач оптимального проектирования опор поршневых машин [5].

Разработан метод анализа динамики и расчета усилий в элементах многоопорных валов, позволяющий наряду с их конструктивными особенностями и жесткостными характеристиками, податливостью упругого основания подшипников, смещений подшипников и шеек вала от номинального расположения, учитывать взаимосвязь внешних нагрузок, действующих на шейки, с векторами их скоростей и перемещений на смазочном слое [6].

Задачи расчета колебаний уравновешенного ротора, опирающегося на подшипники жидкостного трения конечной длины, рассмотрены на основе нелинейных уравнений движения шипа. Для обеспечения устойчивости численного интегрирования системы уравнений использованы методы, ориентированные на решение жестких систем и, в частности, эффективный и устойчивый алгоритм неявного метода, основанного на применении формул дифференцирования назад. В последнее время разработаны методы анализа динамики роторов на опорах с промежуточными элементами в виде плавающих невращающихся и вращающихся втулок [7].

На основе предложенных методов решения задач динамики опор с некруглоцилиндрическими, в том числе сегментными подшипниками, показано, что профилирование подшипника сложнонагруженной опоры является эффективным средством воздействия на параметры колебаний шипа и характеристики смазочного слоя. Рекомендованы, как перспективные, нетрадиционные конструкции шатунного подшипника с разностенными вкладышами, заметно снижающие максимальные гидродинамические давления в опоре [8].

Перспективными являются задачи расчета и оптимизации профиля направляющей части поршня в трибосопряжении "поршень-цилиндр", а также динамики поршня на смазочном слое в цилиндре двигателя внутреннего сгорания [9,10]. Авторами детально исследован способ многокритериальной оптимизации на основе метода ЛП-поиска для поршней дизельных двигателей автомобилей и тракторов.

Разработанная модель сложнонагруженной опоры поршневой машины, смазываемой микрополярными жидкостями, позволила дать объяснение новым эффектам, имеющим место в системе "шип-смазочный слой-подшипник", при использовании моторных масел, загущенных полимерными присадками - эффективного средства повышения износостойкости поверхностей трения [11].

Основные теоретические положения подтверждены и дополнены комплексными экспериментальными исследованиями, включавшими измерение траектории движения шипа, гидродинамических давлений и температур в смазочном слое сложнонагруженных опор, в том числе опор коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания [12].

Полученные теоретически и подтвержденные экспериментально результаты позволили разработать проблемно - ориентированный пакет прикладных программ "Орбита", и ряд других программных комплексов, предназначенных для анализа динамики, гидродинамического и теплового расчета сложнонагруженных опор [13]. Использование созданного методического, алгоритмического и программного обеспечения позволило решить ряд практических задач, связанных с оптимизацией конструктивных и режимных параметров двигателей внутреннего сгорания, поршневых компрессоров, шестеренных гидромашин, турбокомпрессоров, повысить эксплуатационную надежность машин, сократить время на их проектирование и доводку [14-18].

Авторы считают, что теоретический и прикладной уровень отечественных и зарубежных исследований в области моделирования сложнонагруженных трибосопряжений достаточен для решения большинства задач, потребность в которых возникает при проектировании гидродинамических опор поршневых и роторных машин, в том числе, задач оптимизации их конструктивных параметров. Ближайшие перспективы развития исследований просматриваются прежде всего в решении проблемы учета деформаций поверхностей трения, величина которых соизмерима с характерными зазорами. Отметим существенное отставание в решении этой проблемы отечественной науки от зарубежных достижений. Внимание специалистов привлекают задачи трибоанализа сопряжений, работающих в режиме "масляного голодания", смазываемых неньютоновскими маслами, применения теоретически более обоснованных моделей расчета расходов смазки, потерь мощности на трение, использования результатов трибоанализа для разработки методик расчета износостойкости и усталостной долговечности сопряжений. При оптимизации конструктивных параметров механизмов, передающих на опоры внешние нагрузки, перспективным направлением в исследованиях является разработка методов решения обратной задачи динамики сложнонагруженной опоры (задачи синтеза), суть которой сводится к восстановлению годографа нагрузок, действующих на шип, по заданной траектории движения его центра, удовлетворяющей каким-либо критериям оптимальности. Отметим, что практически все работы, посвященные нелинейной динамике валов на подшипниках скольжения, ориентированы на идеализированную модель системы "шип-подшипник", либо "многоопорный вал - подшипники". Реальные машины и механизмы представляют собой сложную трибосистему с источниками и потребителями смазки, объединенные единой сетью. Авторы имеют опыт решения таких задач на примере системы смазки двигателей внутреннего сгорания.

Актуальными продолжают оставаться задачи нелинейной динамики гидродинамических опор с промежуточными элементами, применение которых кардинально решает проблему устойчивости сверхбыстроходных роторов и обеспечивает снижение почти на треть мощности на трение.

## Литература

1. Прокопьев В.Н. К расчету опорных подшипников, нагруженных силами, переменными по величине и направлению // Машиноведение. 1978, N 5. С.105-111.
2. Прокопьев В.Н. Расчет динамически нагруженных подшипников скольжения с кольцевой канавкой // Вестник машиностроения. 1979, N 5. С.26-30.
3. Прокопьев В.Н., Анисимов В.Н. Решение разностного уравнения Рейнольдса для давлений в смазочном слое на последовательности сеток // Науч. тр. / Челяб. политех. ин-т. 1980, N 248. С.59-74.
4. Прокопьев В.Н. Динамика сложнонагруженных подшипников скольжения // Трение и износ в машинах: Доклады Всесоюзной конф. - Челябинск, 1980. С.134-149.
5. Прокопьев В.Н., Маляр Н.С. Оптимальное проектирование динамически нагруженных подшипников скольжения // Науч.тр./ Челяб.политех. ин-т, 1974, N 144. С.43-51.
6. Прокопьев В.Н., Ветров М.К. Сложнонагруженные опоры скольжения многоопорных валов // Трение и износ в машинах: Тезисы докладов Всесоюзной конф. - Челябинск, 1979. С.194.
7. Бояршинова А.К., Прокопьев В.Н., Смирнов В.В. Динамика высокоскоростных роторов на подшипниках с плавающими невращающимися втулками // Проблемы машиностроения и надежности машин. В печати.
8. Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В., Гончаренко И.И., Маляр Н.С. Расчет сложнонагруженных подшипников с профилированной поверхностью вкладышей // Науч.тр./ Челяб.политех.ин-т. 1980, N 248. С. 74-87.

9. Рождественский Ю.В. Оптимизация профиля юбки поршня двигателя внутреннего сгорания. Челябин.госуд.техн.ун-т.-Челябинск, 1994. - 19 с. - Деп. в НИИЭУАВТОПРОМ, 07.09.94, N 9 - ап.94.
10. Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В., Караваев В.Г. Динамика поршня на смазочном слое в цилиндре двигателя - Челябин.госуд.техн. ун-т - Челябинск, 1994. - 22 с. -Деп. в НИИЭУАВТОПРОМ, 07.09.94, N 10 - ап.94.
11. Прокопьев В.Н., Анисимова Н.В. Динамика радиальных опор скольжения смазываемых микрополярными жидкостями // Науч.тр./ Челябин.политех.ин-т. 1982, N 276. С.48-56.
12. Прокопьев В.Н.,Иванов В.В., Рунг Э.Р., Волченко Г.Н. Исследование погрешностей измерения: траектории центра шеек коленчатого вала подшипников двигателей внутреннего сгорания // Науч.тр./ Челябин.политех.ин-т. 1972, N 119.С.39-51.
13. Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В., Маляр Н.С., Анисимов В.Н., Ветров М.К. Проблемно-ориентированный пакет прикладных программ для расчета подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания // Науч. тр. / Челябин. политех. ин-т. 1982, N 276. С. 3-11.
14. Прокопьев В.Н., Рудич И.Г., Маркелов Е.В., Коломак М.Я., Анисимов В.Н. К оптимизации подачи смазки в шатунные подшипники двигателей ДМ-21 // Научн. тр. / Челябин. политех. ин-т. 1976, N 179. С.55-67.
15. Туровский А.М ., Рождественский Ю.В. Исследование надежности сложнонагруженных опор шестеренных гидромашин // Трение и смазка в машинах: Тезисы докладов Всесоюзной конф. - Челябинск, 1983. С. 73-74.
16. Балюк Б.К., Рождественский Ю.В., Ветров М.К., Фадеев Л.И. Пути повышения несущей способности коренных опор тракторного дизеля // Двигателестроение. 1989, N 2. С. 47-48, 54.
17. Рождественский Ю.В. К разработке метода расчета усталостного разрушения антифрикционного слоя подшипников автомобильных двигателей // Техническая эксплуатация, надежность и совершенствование автомобилей: Темат. сб. науч. тр. - Челябинск: ЧПИ, 1984. С.48-56.
18. Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В., Анисимов В.Н. Упругогидродинамическая задача смазки сложнонагруженной опоры с податливым подшипником // Контактная гидродинамика: Тезисы докладов Пятой Всесоюзной конференции.- Самара, 1991. С.63.