



С. В. ЕВДОКИМОВ
А. А. ОРЛОВА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА ПОСРЕДСТВОМ ЗАКОНОВ КОНТАКТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

ENSURING RELIABLE OPERATION OF THE HYDRAULIC UNIT
THROUGH THE LAWS OF CONTACT HYDRODYNAMICS

Рассмотрены основные законы контактной гидродинамики, которая изучает сложные явления, возникающие в смазочном слое, разделяющем упруго-деформирующиеся поверхности разнообразных деталей, и, таким образом, решает комплексную задачу гидродинамики, теории упругости, термодинамики, реологии смазочного материала и материаловедения. Долгое время контактная гидродинамика считалась второстепенным направлением в гидротехническом строительстве, однако основные аспекты контактной гидродинамики позволяют определять толщины смазочного слоя в эластичных металлопластмассовых сегментах подшипников гидроагрегата, обеспечивающих надежность и долговечность их работы. Таким образом, контактная гидродинамика позволила получить положительный опыт многолетних эксплуатационных испытаний эластичных металлопластмассовых сегментов в подшипниках гидроагрегатов крупнейших ГЭС. Кроме этого, контактная гидродинамика решила проблему перевода всех гидроагрегатов крупных ГЭС страны с жестких баббитовых подшипников на эластичные композитные, а все вновь строящиеся гидрогенераторы оборудовать эластичными сегментами новой конструкции.

Ключевые слова: контактная гидродинамика, гидротехническое строительство, смазочные материалы, подшипник гидроагрегата, надежность работы

The article discusses the basic laws of contact hydrodynamics, which studies complex phenomena occurring in the lubricating layer separating the elastically deformable surfaces of various parts, and thus solves the complex problem of hydrodynamics, elasticity theory, thermodynamics, rheology of lubricants and materials science. For a long time, contact hydrodynamics was considered a secondary direction in hydraulic engineering, however, the main aspects of contact hydrodynamics allow determining the thickness of the lubricating layer in the elastic metal-plastic segments of the hydraulic unit bearings, ensuring the reliability and durability of their operation. Thus, contact hydrodynamics allowed us to gain a positive experience of long-term operational tests of elastic metal-plastic segments in the supports of hydraulic units of the largest hydroelectric power plants. In addition, contact hydrodynamics solved the problem of transferring all hydraulic units of large hydroelectric power plants of the country from rigid babbit supports to elastic composite ones; and all newly built hydro generators should be equipped with elastic segments of a new design.

Keywords: contact hydrodynamics, hydraulic engineering, lubricants, hydraulic unit support, reliability of operation

Экспериментальными исследованиями деталей машин в гидротехническом строительстве установлено, что умелым выбором смазочного материала можно во много раз повысить

долговечность и надежность их работы. Однако общепринятые методы расчета этих деталей учитывают лишь контактные напряжения и совершенно не учитывают влияние смазочного

материала. В связи с этим на практике обращаются к эмпирическим изысканиям, требующим значительных затрат средств и времени и во многих случаях все же не дающим возможности найти оптимальные значения конструктивных и эксплуатационных параметров.

Вместе с тем в настоящее время существует и широко используется в гидротехническом строительстве наука, способная дать ответы на поставленные вопросы и изыскать оптимальные параметры. Это – контактная гидродинамика, или, как ее часто называют, контактно-гидродинамическая теория смазки. Она изучает сложные явления, возникающие в смазочном слое, разделяющем упруго-деформирующиеся поверхности разнообразных деталей, и, таким образом, решает комплексную задачу гидродинамики, теории упругости, термодинамики, реологии смазочного материала и материаловедения [1, 2].

Контактная гидродинамика фактически определяет теорию и метод расчета эластичных подшипников и подпятников скольжения (металлических и из композиционных материалов), подшипников качения, зубчатых, червячных, глобоидных и гипоидных передач, упорных гребней, фрикционных передач, работающих в масле, подвижных шлицевых соединений, а также ряда технологических процессов – прокатки, гидроэкструзии и др.

Контактная гидродинамика рассматривает явления, возникающие в смазочном слое, т. е. условия лишь жидкостного трения.

Вместе с тем в ряде случаев имеет место не жидкостное, а граничное и смешанное трение. При этом поверхности трения не полностью разделены слоем смазочного материала; происходит изнашивание, изменение структуры поверхностных слоев и другие механистические процессы.

Долгое время контактная гидродинамика считалась второстепенным направлением в гидротехническом строительстве.

В контактной гидродинамике существует две тесно связанные задачи: задача гидродинамики для движущегося смазочного слоя; смешанная задача теории упругости для определения деформации поверхности под действием давления [3].

При проскальзывании поверхностей трения вследствие диссипации механической энергии иногда происходит местное повышение температуры до сотен градусов по Цельсию, что вызывает резкое снижение вязкости, а также уменьшение зависимости вязкости от давления.

Следует учесть, что поверхности трения имеют обычно некоторую шероховатость, которая существенно влияет на гидродинамиче-

ские характеристики потока и на толщину смазочного слоя. Кроме того, нагрузки, скорости движения и температуры поверхностей трения изменяются во времени; при этом в смазочном слое могут возникнуть вибрационные явления.

Если учесть, что толщина смазочного слоя измеряется долями и иногда единицами микрометра, а длина зоны контакта сотнями и тысячами микрометров, станет очевидной трудность не только теоретического, но и экспериментального исследования.

Все вышеуказанные явления относятся к единичному контакту. Однако в практике гидротехнического строительства чаще всего сталкиваются с одновременной взаимозависимой работой сложной системы контактов.

Современные теоретические работы в области контактной гидродинамики можно разделить на три группы:

- решение простейшей контактно-гидродинамической задачи;
- решение более сложных современных задач;
- применение контактной гидродинамики для повышения работоспособности и оптимизации конструкций различных деталей машин, а также для создания новых конструкций [4].

В данной статье рассмотрим основные аспекты контактной гидродинамики, использованные при определении толщины смазочного слоя в эластичных металлопластмассовых сегментах подпятников гидроагрегата.

Толщина смазочного слоя в эластичных подшипниках и подпятниках скольжения обычно меньше упругих перемещений поверхностного слоя. Следствием этого является замыкание торцовых кромок и практическое прекращение торцового истечения. Таким образом, пространственная гидродинамическая задача превращается в плоскую задачу.

Как показывает опыт авиастроения, если подпятник изготовлен в виде простой наклонной площадки (с линейной зависимостью толщины смазочного слоя от координаты), то в результате упругих деформаций поверхности образующийся профиль зазора снижает несущую способность и препятствует реализации жидкостного трения. В связи с этим требуется отыскать такой профиль зазора при изготовлении подпятника, чтобы в результате деформаций он обладал значительной грузоподъемностью. Данную задачу можно решить прямым или обратным методами.

При прямом методе следует, задавшись конфигурацией подпятника при изготовлении, определить, что с ним произойдет в результате деформации и будет ли обеспечена необходимая несущая способность.

При обратном методе, задавшись профилем зазора, который он будет иметь в результате деформации, нужно определить несущую способность подпятника, деформации в каждой точке и, наконец, найти конфигурацию подпятника до деформации, т. е. при изготовлении.

Многими учеными, такими как Д.С. Коднир, Е.П. Жильников, Ю.И. Байбородов, были исследованы различные профили зазоров подпятника без учета деформации поверхности с целью найти оптимальную конфигурацию, обеспечивающую максимальную гидродинамическую грузоподъемность. Было обнаружено, что зазор с простейшим профилем в виде наклонной площадки обладает несущей способностью не ниже 80 % от оптимального значения [5].

В связи с этим был предложен элементарный метод расчета и проектирования упруго-деформирующегося сегмента, заключающийся в следующем. Выбирались геометрические размеры подпятника; задавались эксцентриситет и наименьшая толщина смазочного слоя. Далее для заданной скорости движения, выбранной марки масла и рабочей температуры рассчитывались гидродинамическое давление и несущая способность.

В результате получалось значение нагрузки, равное или несколько большее заданного при наименьшей толщине смазочного слоя. Применив гипотезу Винклера, находились деформации поверхности в каждой точке (эпюра деформации); затем, накладывая на линейный профиль зазора деформации во всех точках, получали конфигурацию подпятника до деформации (при изготовлении) [5].

Однако изготовление сегментов с полученной геометрией оказалось крайне затруднительным по технологическим причинам, поэтому криволинейный профиль сегмента был заменен неравнобокой трапецией.

Такой профиль начальной геометрии эластичного сегмента, т. е. с входным и выходным скосами, получают на шлифовальном станке.

При этом замена нелинейного профиля, отличающегося от профиля, образованного тремя линейными участками, на 15–20 мкм, не приводит к существенному снижению надежности и несущей способности подпятника.

Целесообразность и допустимость такой простой методики расчета и проектирования подтверждается тем, что ее применение для подпятников более чем 100 гидротурбин (40 различных типоразмеров) ни разу не привело к аварийному состоянию или к реализации смешанного трения [6].

Прямой метод расчета, разработанный Д.С. Кодниром и А.В. Терещенко, предусматривает решение контактно-гидродинамической

задачи для самоустанавливающегося эластичного сегмента подпятника с композиционным покрытием при следующих предположениях:

- рассматривается плоская неизотермическая стационарная задача для ньютоновской жидкости;

- деформация слоя из упругого композиционного материала определяется по гипотезе Винклера;

- поверхность трения сегмента при изготовлении (до деформации) состоит из трех плоских участков, т. е. имеются скосы на входе и выходе;

- вся теплота из области трения отводится конвективным потоком в направлении движения, так как коэффициент, равный отношению конвективного потока вдоль слоя к кондуктивному потоку поперек слоя, значителен (эксперименты с натурными сегментами подтвердили чрезвычайно малый теплоотвод поперек слоя) [7].

При этом следует учитывать гидродинамические и тепловые явления в смазочном слое; зависимость динамической вязкости масла от давления и температуры; контактные деформации неметаллического покрытия сегмента, а также основы (спрессованных проволочек) в виде линейной и нелинейной функции давления; температурные деформации неметаллического покрытия; изменение толщины слоя фторопласта вследствие шлифования входного и выходного скосов; изменение податливости вкладыша (модуля упругости) вдоль направления движения, которое может быть задано конструктором для повышения несущей способности либо быть следствием технологических погрешностей изготовления вкладыша из композиционного материала [8].

Исследуемый сегмент представлял собой трехслойную систему: нижний слой – массивная стальная основа, деформации которой не учитываются; средний слой, состоящий из спрессованных проволочек, припаянных к стальной основе. Верхний слой из фторопласта спрессован с промежуточным слоем; его свободная поверхность, являющаяся поверхностью трения, подверглась шлифовке.

При этом податливый слой в сечении, перпендикулярном к смазочному слою, в тангенциальном направлении представлял собой трапецию (с учетом срезов на входной и выходной кромке).

Профиль зазора состоит из трех участков, тем самым общая деформация зависела от деформации фторопласта, деформации спиралей и термического утолщения фторопласта.

В результате экспериментов по определению податливости сегмента подпятника гидроагрегата было установлено, что деформация

упругого слоя в месте минимума толщины масляной пленки превосходит ее почти в два раза [9].

Таким образом, можно заключить, что основные законы контактной гидродинамики лежат в положительном опыте многолетних эксплуатационных испытаний эластичных металлопластмассовых сегментов в подпятниках гидроагрегатов крупнейших ГЭС страны. Кроме этого, контактная гидродинамика позволила в настоящее время все гидроагрегаты крупных ГЭС страны перевести с жестких баббитовых подпятников на эластичные композитные; а все вновь строящиеся гидрогенераторы оборудуются эластичными сегментами новой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Издательский дом «Агни», 2010. 360 с. Кн. I.
2. Романов А.А. Куйбышевский гидроузел. История и жизнь. Самара: Арт-Лайт, 2018. 272 с.
3. Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС имени В.И. Ленина: в 2 т. 1950–1958 гг.
4. Кондратенко П.С. Теоретические основы гидродинамики и теплопереноса. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2003. 68 с.
5. Найденко В.В. Великая Волга на рубеже тысячелетий. От экологического кризиса к устойчивому развитию. Нижний-Новгород: Промграфика, 2003. 432 с. Кн. I.
6. Балзаников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.
7. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2012. № 1. С. 49–53. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.12.
8. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Критерии оценки надежности и технического состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 105–109. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.02.23.
9. Balzannikov M.I., Rodionov M.V. Extending the operating life of low embankment dams in Russia // International journal on Hydropower and Dams. 2013. № 6. Pp. 60–63.
2. Romanov A.A. *Kuibyshevskij gidrouzel. Istoriya i zhizn'* [Kuibyshev hydroelectric complex. History and life]. Samara, Art-Layt, 2018. 272 p.
3. *Tekhnicheskij otchet o proektirovanii i stroitel'stve Volzhskoj GES imeni V.I. Lenina: v 2 t. 1950–1958 gg.* [Technical report on the design and construction of the Volzhskaya HPP named after V.I. Lenin: in 2 volumes, 1950–1958].
4. Kondratenko P.S. *Teoreticheskie osnovy gidrodinamiki i teploperenosa* [Theoretical foundations of hydrodynamics and heat transfer]. M.: Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy of the Russian Academy of Sciences, 2003. 68 p.
5. Naydenko V.V. *Velikaya Volga na rubezhe tysyachetij. Ot ekologicheskogo krizisa k ustojchivomu razvitiyu* [The Great Volga at the turn of the millennium. From ecological crisis to sustainable development]. Book I. Nizhny Novgorod, Promgrafika, 2003. 432 p.
6. Bal'zannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive survey of the technical condition of the building structures of the Zhigulevskaya HPP. // *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)
7. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Reliability estimation of hydraulic engineering constructions. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2012, no. 1, pp. 49–53. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.12. (in Russian)
8. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Estimation criteria of reliability and technical condition of hydraulic engineering constructions. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2011, no. 2, pp. 105–109. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.02.23. (in Russian)
9. Balzannikov M.I., Rodionov M.V. Extending the operating life of low embankment dams in Russia. *International journal on Hydropower and Dams*, 2013, no. 6, pp. 60–63.

REFERENCES

1. Romanov A.A. ZHigulevskaya GES. *Ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Zhigulevskaya HPP. Operation of hydraulic structures]. Part I. Samara, Agni Publ., 2010. 360 p.

Об авторах:

ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sali5@mail.ru

EVDOKIMOV Sergey V.

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Environmental and Hydrotechnical Engineering Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: sali5@mail.ru

ОРЛОВА Алла Алексеевна

старший преподаватель кафедры природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: allaorlova5@mail.ru

ORLOVA Alla A.

Senior Lecturer of the Environmental and Hydrotechnical Engineering Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: allaorlova5@mail.ru

Для цитирования: *Евдокимов С.В., Орлова А.А. Обеспечение надежной работы гидроагрегата посредством законов контактной гидродинамики // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 2. С. 29–33. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.02.5.*

For citation: *Evdokimov S.V., Orlova A.A. Ensuring Reliable Operation of the Hydraulic Unit Through the Laws of Contact Hydrodynamics. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 2, pp. 29–33. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.02.5.*

**ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР
«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭНЕРГОАУДИТ»**

**Направления
деятельности**



Внедрение компьютерных моделей энергетических процессов и систем, позволяющих с высокой достоверностью моделировать температурные и гидравлические режимы работы энергетических объектов, определять оптимальные направления их реконструкции, проектировать новые сложные энергетические системы (теплосети крупных городов, водопроводные сети, системы нефти и газопроводов, циркуляционные системы тепловых электрических станций), проведение качественного и эффективного энергоаудита

Руководитель



Василий Александрович КУДИНОВ
доктор физико-математических наук, профессор

Контакты



443010, Самара, ул. Галактионовская, 141
(846) 332-42-35, 332-42-44
totig@yandex.ru