

Висновок. Запропоновано новий підхід до проектування і оцінювання технічного стану шаруватих конструкцій біологічного захисту, який враховує вплив енергетичних параметрів радіоактивних вантажів та сприяє їх безпечному транспортуванню і зберіганню на спеціалізованих судах та плавучих спорудах.

Список використаної літератури

1. Luna, R. Development of international guidelines for shipment security of radioactive materials [Text] / R. Luna // Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material. – 2004. – № 15(1). – P. 15 –19.

2. Патент на винахід № 111654 Україна МПК В63В3/00. Спосіб захисту конструкцій суден і плавучих споруд від дії іонізуючих випромінювань / Ю. О. Казимиренко. – № а2014 09822; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; Заявл. 10.02.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.3. Казимиренко, Ю. А. Решение задач теплообмена при перевозке и хранении радиоактивных грузов на плавучих сооружениях [Текст] / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy: Baki: Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası – 2016. – № 2. – С. 20–26.

4. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo [Text] / Y. Kazymyrenko // The advanced science. – Publisher: Scireps Corporation : Torrance, United States. – 2016. – № 2. – P. 38 – 44.

5. Казимиренко, Ю. А. Оценка технического состояния композитных конструкций судов с использованием информационной обработки данных [Текст] / Ю. А. Казимиренко // Науковий журнал «ScienceRise». – Харьков : «Технологический центр». – 2015. – № 8(18). – С. 31–37.

УДК 629.5.015.4
Б28, У72

**Применение методов оптимизации в расчете изгиба судового
валопровода, подшипники которого работают
в режиме гидродинамической смазки**

Авторы: Урсолов А. И., Национальный университет кораблестроения имени адм. Макарова, Батрак Ю. А., ЧП «Интеллектуальные морские технологии»

Одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность вкладышей подшипников валопровода, особенно кормовых дейдвудных и подшипников кронштейнов, является режим смазки подшипника, определяющий коэффициент трения в паре и, как следствие, интенсивность износа.

На рис. 1 приведена кривая Герси–Штрибека, характеризующая зависимость величины коэффициента трения от числа Зоммерфельда. При граничном и полусухом трении вкладыш изнашивается наиболее интенсивно. Самым благоприятным, с точки зрения долговечности подшипника, является режим гидродинамической смазки.

Число Зоммерфельда определяется следующим выражением:

$$So = \frac{\nu L d^3 \omega}{F \Delta^2},$$

где ν – динамическая вязкость смазки, Па·с; L – длина вкладыша, м; d – диаметр вала, м; ω – частота вращения вала, с⁻¹; F – величина нагрузки на подшипник, Н; Δ – диаметральный зазор подшипника, м.

На стадии проектирования валопровода у проектанта есть свобода выбора материала, длины и диаметра вкладыша (диаметрального зазора), смазочного материала, расчетной скорости вращения.



Рисунок 1 – Кривая Герси–Штрибека

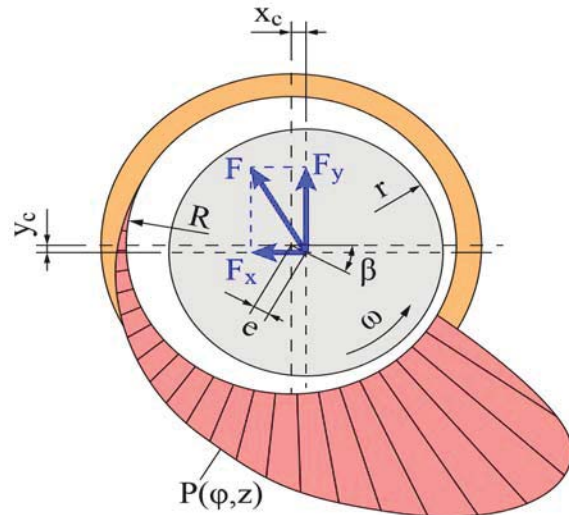


Рисунок 2 – Система координат

Однако нагрузка на подшипник F должна находиться из совместного решения двух задач: задачи об изгибе валопровода и задачи расчета гидродинамической смазки в соответствии с фактическим изгибом вала.

Нагрузка на подшипники зависит от параметров центровки (линейных и угловых смещений подшипников), которые влияют на перекося вала в подшипнике, а также от деформации материала вкладыша под действием гидродинамических давлений.

На данный момент не выработано однозначных рекомендаций по учету этих параметров, в силу разнообразия конкретных проектов и сложности общего решения задачи изгиба валопровода, с учётом всех эксплуатационных факторов, в том числе и износа втулки.

Гидродинамическая нагрузка в сечении вала, развиваемая смазкой, зависит от относительного эксцентриситета вала, который в полярных координатах (рис. 2) определяется по формулам:

$$\bar{e} = \frac{e}{0.5\Delta} = \frac{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}{R - r}, \quad \beta = \arctg \frac{x_c}{y_c},$$

где x_c , y_c – координаты вала в декартовой системе координат вкладыша, м; r , R – радиус вала и вкладыша соответственно, м.

Сложность решения задачи изгиба валопровода с учётом гидродинамической смазки заключается в том, что реакция в подшипнике зависит от эксцентриситета вала очень нелинейно. Чем больше эксцентриситет, тем меньше число Зоммерфельда и тем ближе режим смазки к полусухому трению.

Кроме того, большинство исследователей, как правило, ограничиваются расчетом смазки только одного подшипника, в то время как практические задачи требуют расчета смазки во всех подшипниках одновременно.

В данной работе задача определения гидродинамических давлений смазки при заданном распределении толщины смазочной плёнки в пределах вкладыша решалась методом конечных элементов на основании уравнения Рейнольдса [1]. Задача об изгибе валопровода на фиксированных опорах также решалась методом конечных элементов с применением матрицы жесткости балки Тимошенко. На первом этапе исследований совместное решение двух указанных выше задач решалось простыми итерациями. Расчеты показали, что применение метода последовательных приближений для нахождения равновесного положения валопровода, поддерживаемого гидродинамическими силами смазки, оказывается неэффективным - процесс закичивается. Для выяснения причины отдельно была рассчитана зависимость составляющих нагрузки на подшипник (вертикальной и горизонтальной) от величины относительного эксцентриситета. Оказалось, что при значениях относительного эксцентриситета примерно до 0,85 зависимость имеет практически линейный характер, однако при дальнейшем росте эксцентриситета наблюдается значительное нелинейное возрастание нагрузок на вкладыш. В таких условиях итеративная схема расчета перестает работать.

Дополнение итеративного алгоритма специальными методами релаксации, такими как, например [2], хотя и позволило находить решение для относительно жестких валов, тем не менее, не дало удовлетворительных результатов для всех случаев тестируемых моделей валопроводов.

Поэтому для решения данной нелинейной задачи было решено использовать подход, основанный на применении методов оптимизации. Такой подход применялся для расчета смазки в случае одного подшипника [3]. В данной же работе описывается способ применения метода оптимизации для расчёта изгиба валопровода с учётом гидродинамической смазки во всех подшипниках одновременно.

С целью применения метода оптимизации в схему валопровода посередине длины втулок были введены фиктивные точечные жесткие опоры. В качестве переменных оптимизации были приняты полярные координаты указанных опор (относительный эксцентриситет опоры относительно оси вкладыша и угол направления эксцентриситета относительно вертикальной плоскости), а целевой функцией, которая минимизируется – сумма абсолютных значений реакций точечных опор. Достижение целевой функцией нулевого значения будет означать, что нагрузка на подшипник полностью воспринимается смазочной пленкой.

Для вычисления значения целевой функции при нахождении равновесия между валом и гидродинамическими силами от смазки при фиксированных значениях переменных был применен гибридный метод последовательных приближений. На первом этапе расчета результат каждой предыдущей итерации используется в качестве исходных данных для следующей итерации (простые итерации). Если процесс сошелся, то процесс приближений заканчивается.

Если же алгоритм определяет, что процесс закичился, то происходит переход на следующий этап, в котором применяется метод релаксации, описанный в [2]. Данный гибридный метод обеспечивает одновременно высокую вычислительную эффективность и результативность алгоритма расчета целевой функции во всех возможных ситуациях.

Для нахождения оптимальных значений переменных, т.е. для решения задачи изгиба вала с учетом смазки, был испытан ряд различных методов оптимизации (метод внутренней точки, метод последовательного квадратичного программирования, симплекс метод, метод Хука-Дживса, метод роя частиц, генетический алгоритм, метод отжига и некоторые другие).

Наиболее эффективными методами для решения данной задачи оказались метод внутренней точки и метод роя частиц. Метод внутренней точки достаточно хорошо работает для одного подшипника, поскольку в оптимизации всего две переменные. Однако, при увеличении количества подшипников n , количество переменных также увеличивается до $2 \cdot n$. Уже при двух подшипниках с помощью метода внутренней точки оптимальное решение может быть найдено не во всех случаях, не говоря уже о том, что время расчёта значительно увеличивается.

Для метода роя частиц опытным путём были установлены оптимальные настройки, с точки зрения минимизации времени расчёта и повышения эффективности нахождения решения (количество частиц, инерционность частиц, коэффициенты индивидуального и группового влияния).

Данный метод достаточно быстро находит область оптимального решения, однако его применение для достижения окончательного результата приводит к неприемлемому увеличению времени расчёта.

Оптимальным решением оказалось применение метода внутренней точки, если гидродинамика считается только в одном подшипнике, и комбинации метода роя частиц и метода внутренней точки в случае двух и более подшипников. При этом вначале с помощью метода роя частиц выполняется поиск области глобального минимума при фиксированном числе итераций, после чего решение уточняется с помощью метода внутренней точки. Данная схема расчёта позволила добиться сходимости на всех тестируемых моделях валопроводов.

Выводы. Применение изложенного алгоритма расчёта изгиба валопровода позволит эффективно оценивать проектные характеристики валопровода, такие как диаметральные зазоры в подшипниках, длины подшипников, параметры центровки. Данный подход предполагается к внедрению в специализированное программное обеспечение ShaftDesigner [4, 5] для расчёта судовых валопроводов.

Следующим этапом работы в данном направлении станет учёт деформации материала вкладышей подшипников под действием гидродинамических давлений, вызванных смазкой.

Список использованной литературы

1. **Коровчинский, М. В.** Теоретические основы работы подшипников скольжения [Текст] / М. – Машгиз, 1959. – 403 с.
2. **Урсолов, А. И.** Расчёт изгиба вала, лежащего на подшипниках, представленных нелинейным односторонним упругим основанием конечной длины [Текст] / А. И. Урсолов, Ю. А. Батрак // «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції / НУК – Миколаїв. – 2016
3. **Mourelatos, Z. P.** Finite-Element Analysis of Elastohydrodynamic Stern Bearings [Текст] / Z. P. Mourelatos, M. G. Parsons // SNAME Transactions – 1985. – Vol. 93. – P. 225-259
4. **Batrak, Y.A.** High-end Software for Propulsion Shaft Calculation. SNAME Propellers / Y.A Batrak., Van Leest M.//Shafting 2009 Symposium Papers, Williamsburg VA, P. 11-1 - 11-4.
5. ShaftDesigner – The Shaft Calculation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.shaftdesigner.com/>