

Отзыв официального оппонента

Родионова Александра Александровича

на диссертацию Коваля Кирилла Алексеевича на тему «Взаимодействие упругих конструкций с потоком жидкости», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность избранной темы исследования

В современных условиях активного освоения Мирового океана вопросы эффективности работы подводных объектов вызывают значительный интерес исследователей. К подводным техническим средствам предъявляются все более жесткие требования по обеспечению надежности, скрытности и автономности, что приводит к необходимости понимания проблем взаимодействия упругих конструкций и потока жидкости. Диссертационная работа Коваля К.А. посвящена разработке математических моделей и численных методов для решения задач о взаимодействии с потоком жидкости таких классов упругих конструкций, как выдвижные устройства и составной плавниковый движитель.

Вихревая вибрация выдвижных устройств является достаточно неприятным, а порой и опасным явлением при эксплуатации подводных объектов. Она может стать причиной сбоев в работе систем, функционирование которых жизненно важно для корабля, различных механических повреждений выдвижных устройств, а также потери скрытности подводного объекта, что, зачастую, равносильно срыву выполняемой задачи.

В последнее время, особенно в условиях интенсификации работ по созданию малых подводных аппаратов, для которых очень важна энергетическая эффективность, большой интерес вызывают движительные комплексы, основанные на бионических принципах. Учитывая такие достоинства плавниковых движителей, как малозумность, отсутствие кавитации и возможность совмещения ролей движителя и органов управления движением, можно сделать вывод, что разработка таких движительных комплексов является перспективным направлением.

Таким образом, разработка численных методов и моделей для решения задач о вихревой вибрации выдвижных устройств и колебаниях составного плавникового движителя в потоке жидкости является востребованной, а тема исследования представляется чрезвычайно актуальной.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Ковалёва К.А. состоит из введения, основной части из восьми глав, заключения, списка литературы из 112 источников и приложения.

Соискатель проводит подробный обзор современного состояния исследуемых проблем, приводит ссылки на основные работы по теме диссертации, критически оценивает достоинства и недостатки результатов, полученных другими авторами.

Разработанный метод определения вибрации выдвижных устройств предполагает использование численного моделирования турбулентного течения для вычисления гидродинамических характеристик обтекателя. При этом используется подход, основанный на решении уравнений Рейнольдса с применением модели турбулентности SAS. Основным достоинством именно такого подхода является возможность моделирования отрыва вихрей с поверхности обтекателя – причины возникновения колебаний выдвижного устройства. В то же время, используемый численный метод достаточно экономичен с вычислительной точки зрения и требует для реализации гораздо меньше ресурсов по сравнению с другими вихреразрешающими подходами. Автор проводит валидацию метода на основе сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными и получает хорошее согласование, что подтверждает возможность использования такого подхода для определения действующих гидродинамических сил.

В работе приводится подробное описание математической модели колебаний выдвижного устройства в потоке жидкости. Она основана на дифференциальном уравнении колебаний стержня переменного сечения, который схематизирует в первом приближении реальную конструкцию. Особенностью данной математической модели, выгодно отличающей ее от существующих, является учет реакции промежуточной опорной связи на

основе аналогии конструктивных схем современных выдвижных устройств и крыла с подкосом. Метод определения вибрационных характеристик, основанный на разработанных аналитических соотношениях, позволяет вычислять значения собственных частот таких конструкций, а также максимальные значения линейных и угловых перемещений, изгибающего момента и перерезывающей силы, нормальных и касательных напряжений. Метод был реализован в виде программного комплекса, который представляется весьма удобным для проведения инженерных расчетов.

Также автором подробно рассмотрен механизм гашения вибраций при помощи внесения стабилизирующей струи в след за обтекателем. Преимущество такого способа было наглядно продемонстрировано при помощи сравнения характеристик колебаний упругого стержня с гасителем и без него. Конструкция гасителя, предложенная соискателем, показала значительную эффективность за счет уменьшения характеристик вибрации приблизительно в 3 раза.

Для решения задачи об определении гидродинамических и пропульсивных характеристик составного плавникового движителя автор использует численное интегрирование уравнений динамики вязкой жидкости с применением изменяющихся во времени (динамических) расчетных сеток. Для каждого временного шага сетка перестраивается с учетом текущего положения колеблющегося тела. С точки зрения оппонента автор достаточно удачно обосновал адекватность применения подобного подхода к расчету гидродинамических характеристик колеблющегося тела, сравнивая результаты численного расчета как с экспериментальными данными, так и с результатами, полученными по теории квазиустановившегося обтекания и теории нестационарного обтекания тонкого крыла.

Численный метод определения гидродинамических и пропульсивных характеристик составного плавникового движителя, разработанный автором, предполагает совместное численное интегрирование уравнений динамики вязкой жидкости и уравнений движения зависимых машущих элементов. При этом уравнения связаны друг с другом через значения действующих на крыловые поверхности гидродинамических сил. Автор предлагает использовать мгновенные значения сил, полученные при интегрировании уравнений Рейнольдса, для интегрирования уравнений движения элементов и вычисления их перемещений на следующем

временном шаге. Для данной задачи такой подход стоит признать удачным. Таким образом, соискатель решает полноценную междисциплинарную задачу в сопряженной постановке, что является, безусловно, сильной стороной работы.

С помощью данного метода было проведено моделирование движения простейшего составного плавникового движителя, определены его гидродинамические и пропульсивные характеристики, выбран наиболее эффективный режим. Для дальнейшего усовершенствования метода автор предлагает использовать подход Виттенбурга при выводе уравнений движения элементов, который позволяет по заранее известным правилам определить вид уравнения для любой конфигурации системы. Преимущество такого способа по сравнению с классическим подходом Лагранжа было наглядно продемонстрировано.

На основе линеаризованных уравнений движения системы из четырех крыловых элементов была построена математическая модель, описывающая движение данной конфигурации составного плавникового движителя. С ее помощью был проведен анализ устойчивости движения системы. При варьировании значениями скорости потока, жесткости пружин и демпфирования в шарнирах были получены критические значения этих параметров и диапазоны устойчивости движения механической системы. Моделирование различных режимов работы составного плавникового движителя показало, что наибольшие амплитуды зависимых крыловых поверхностей соответствуют режиму, при котором частота колебаний ведущего элемента совпадает с собственной частотой механической системы. Этот факт хорошо согласуется с изначально выдвинутой соискателем гипотезой об эффективности резонансных режимов работы составного плавникового движителя.

В заключении автор грамотно и логично формулирует выводы по результатам своей диссертационной работы и демонстрирует их соответствие цели исследования.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Соискатель корректно использует известные методы вычислительной гидродинамики, теории упругости, теории ориентированных графов, на

которой основан подход Виттенбурга. Все подходы, применяемые автором, подвергаются критическому анализу и проходят процесс валидации для определения возможности использования для конкретного типа рассматриваемых задач. Научные выводы строго сформулированы и четко аргументированы.

Достоверность полученных автором научных результатов подтверждается хорошим согласованием с данными физического эксперимента, с результатами других аналитических и численных методов, а также тем фактом, что результаты диссертационной работы не противоречат выводам других исследователей. В частности, наблюдается хорошее согласование значения коэффициента стационарной силы сопротивления цилиндра с соответствующими экспериментальными данными; кривая изгиба стержня, полученная авторским методом, хорошо согласуется с кривой изгиба, полученной на основе метода конечных элементов. Результаты численного расчета нестационарных колебаний крыла в потоке сопоставляются с результатами двух теорий колебаний крыльев и показывают физическую обоснованность получаемых расчетных результатов.

4. Новизна научных результатов

В результате выполнения диссертационной работы автором разработаны **новые** численные методы и математические модели для решения задач о взаимодействии упругих конструкций с потоком жидкости.

Была создана математическая модель колебаний непроникающего выдвижного устройства, учитывающая влияние промежуточной опоры. Как следствие, получены **оригинальные** выражения, которые совместно с численным определением гидродинамических характеристик обтекателей являются основой **нового** метода расчета вихревой вибрации. Разработан **новый** способ оценки эффективности гидродинамического гасителя вибраций выдвижного устройства, который основан сопоставлении результатов расчетов вибрационных характеристик выдвижного устройства с гасителем и без него.

Отличие разработанного метода расчета гидродинамических характеристик составного плавникового движителя **от существующих** заключается в применении совместного интегрирования уравнений движения конструкции и уравнений динамики вязкой жидкости.

Применимость данного метода существенно расширяет использование подхода Виттенбурга к выводу уравнений движения механической системы. Использование таких уравнений и учет гидродинамических сил **отличают** созданную автором математическую модель динамики составного плавникового движителя **от применяемых в настоящее время.**

5. Теоретическая и практическая значимость научных результатов диссертации

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработанных аналитических соотношениях, описывающих колебания в потоке жидкости выдвижных устройств непроникающего типа с промежуточной опорой; в определении диапазона рабочих скоростей струй, при которых работа гидродинамического гасителя эффективна; в получении обоснованных оценок гидродинамических характеристик колеблющегося в потоке крыла, а также зависимостей гидродинамических и пропульсивных характеристик такого движительного комплекса от частоты колебаний ведущего элемента; в получении критических значений параметров задачи о колебаниях составного плавникового движителя, в том числе характеристик жесткости и демпфирования в шарнирах. Указанные результаты имеют существенное значение для развития методов численного моделирования гидроупругих явлений.

Практическая значимость полученных научных результатов заключается в разработке инструментов в виде математических моделей, численных методов и комплекса программ, которые позволяют определять характеристики вибрации выдвижных устройств, гидродинамические и пропульсивные характеристики составного плавникового движителя. Также автором предложена конструктивная схема исполнения гасителя вибраций гидродинамического типа, применение которого способно значительно улучшить эксплуатационные качества выдвижных устройств. Созданная математическая модель динамики составного плавникового движителя позволяет на основе анализа результатов расчетов выбирать наиболее перспективные с точки зрения энергетической эффективности режимы движения и конструктивные схемы исполнения такого движительного комплекса. Результаты работы внедрены в проектную деятельность ведущего предприятия в области судостроения – АО «ЦКБ МТ «Рубин», и

могут быть использованы в ряде других предприятий судостроительной отрасли (АО «СПМБМ «Малахит», АО «ЦКБ «Лазурит» и т.д.).

6. Полнота публикации научных результатов диссертации

Все научные результаты, полученные Ковалем К.А. в рамках диссертационной работы, достаточно подробно опубликованы в 12 научных работах, 5 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на изобретение. Результаты диссертации прошли апробацию на представительных всероссийских и международных конференциях.

7. Личный вклад автора

Основные научные результаты, выносимые на защиту, получены автором диссертационного исследования самостоятельно.

8. Общая оценка диссертационной работы

По мнению оппонента, диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, структура диссертации продумана и логична, исследования обладают внутренним единством. Диссертация и автореферат качественно оформлены, содержание автореферата корректно отражает основные идеи и результаты диссертационного исследования.

9. Замечания по диссертационной работе

Следует отметить следующие замечания к диссертационной работе:

1. Из текста диссертации трудно оценить, какой режим обтекания рассматривается для обтекателя измененной формы (параграф 2.4), поскольку характерные размеры сечения не представлены ни на рисунке 8, ни в тексте работы. Без этой информации сложно сделать вывод, насколько подходит применяемый численный

метод, описанный в главе 2, для определения гидродинамических характеристик обтекателя измененной формы.

2. При оценке эффективности работы гасителя вибраций выдвижных устройств не обоснован выбор скорости стабилизирующей струи. Полезно было бы провести подобные расчеты для различных скоростей струй и выявить зависимость значений максимальной амплитуды колебаний от скорости струи.
3. Судя по графикам, представленным на рисунках 53 – 55, ведущий элемент при колебаниях не создает тяги, а лишь вносит вклад в общее сопротивление механической системы. По всей видимости, это связано с выбором закона движения ведущего элемента. Неясно, почему автор не использовал для моделирования режим, при котором ведущий элемент также вносит вклад в создании тяги.
4. На рисунке 85 представлена зависимость максимальных амплитуд машущих элементов от частоты колебаний ведущего крыла. Некоторые части представленных кривых выходят за рамки линейной области (пиковые значения 35 градусов, амплитуда элемента 3 после частоты 1 Гц превышает значение 10 градусов), хотя моделирование проводится на основе линеаризованных уравнений движения.

Приведенные замечания не носят принципиального характера, общая оценка работы положительная, а результаты имеют значительную ценность для науки и практики.

10. Заключение

Диссертация Коваля Кирилла Алексеевича «Взаимодействие упругих конструкций с потоком жидкости» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, направленной на разработку и развитие численных методов и математических моделей, позволяющих моделировать процессы взаимодействия упругих конструкций, входящих в состав подводного объекта, с потоком жидкости и имеющей существенное значение для развития расчетных методов изучения явлений и процессов, относящихся к области гидроупругости. Полученные научные результаты обладают новизной, теоретической и практической значимостью, а содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Основываясь на

вышесказанном, можно сделать вывод, что диссертационная работа «Взаимодействие упругих конструкций с потоком жидкости» отвечает требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пункт 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор Коваль Кирилл Алексеевич достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

Д.т.н., профессор кафедры

«Строительной механики корабля»

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

Тел. (812) 714-07-61;

e-mail: office@smtu.ru

Родионов А.А.

10.02.2022

Подпись Родионова Александра Александровича удостоверяю

Проректор по Н
Никунженко

