

Отзыв официального оппонента
на диссертацию **Коваля Кирилла Алексеевича «Взаимодействие упругих
конструкций с потоком жидкости»,**

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Диссертация посвящена разработке математических моделей и программных инструментов для численного моделирования взаимодействия упругих конструкций – составных частей подводных объектов с потоками жидкости. **Актуальность** данного исследования связана с растущим интересом к освоению Мирового океана, требованиями к проектированию подводных аппаратов повышенной надежности и автономности, необходимостью снижения шумности и улучшения энергетической эффективности движительных установок. В диссертации рассмотрены два класса объектов: выдвижные устройства подводных аппаратов и составные плавниковые движители. Выдвижные устройства обеспечивают работу систем навигации, наблюдения, связи; негативные воздействия вибраций могут приводить к разрушению выдвижных устройств и отказу соответствующих систем. Разработка плавниковых движителей – перспективное направление в усовершенствовании малых подводных робототехнических средств; улучшение пропульсивных характеристик движителя и определение устойчивых режимов обтекания необходимы при проектировании подводных аппаратов. Таким образом, оба направления исследований диссертационной работы относятся к актуальным задачам современной гидроупругости, имеющим большую практическую значимость.

Основные результаты.

К основным результатам, прежде всего, следует отнести аналитический метод вычисления перемещений и напряжений, возникающих в процессе взаимодействия выдвижного устройства с потоком жидкости. На основе характеристик стержня переменного сечения и гидродинамических

характеристик обтекателей выдвижного устройства определяются собственные частоты поперечных и продольных колебаний. С помощью предложенного метода создан удобный программный инструмент для быстрого определения напряженно-деформируемого состояния выдвижных устройств при различных скоростях подводного объекта.

Разработан подход к проведению расчета колебаний выдвижного устройства в потоке жидкости; выполнена верификация метода гидродинамического расчета. Проведен расчет колебаний цилиндрического прямого однородного стержня в потоке жидкости, определены гидродинамические и динамические характеристики. Исследованы перспективы применения гидродинамических гасителей вибрации, показана возможность значительного снижения максимальных значений перемещений и напряжений, возникающих при вибрации стержня.

Рассмотрена связанная задача гидроупругости для моделирования составного плавникового движителя. Предложена методика расчета, основанная на совместном численном решении уравнений движения машущих элементов и уравнений динамики вязкой жидкости. Угловая скорость вращательных колебаний на каждом временном шаге вычисляется на основе мгновенных значений гидродинамических сил; после перемещений крыловых поверхностей расчетная сетка перестраивается. Для плавникового движителя, содержащего один зависимый элемент, рассчитана собственная частота, проведен анализ гидродинамических и пропульсивных характеристик, найдены диапазоны частот, обеспечивающие оптимальные режимы работы.

Проведено сравнение подходов Лагранжа и Виттенбурга к выводу уравнений движения в системе многих тел. Показана эффективность подхода, основанного на ориентированных графах, предложен формальный метод вывода уравнений движения, позволяющий учитывать произвольное количество элементов в системе; с точки зрения оппонента, это один из наиболее сильных результатов работы. Для конструкции плавникового движителя, содержащей один ведущий и три зависимых элемента, получена

система уравнений и исследованы режимы устойчивости в зависимости от различных параметров: скорости потока, коэффициентов жесткости и демпфирования.

Перечисленные выше результаты являются **новыми**. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подтверждены подробным анализом результатов и являются **обоснованными**. **Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием современных методов теоретического и численного исследования, предварительной валидацией математических моделей с использованием экспериментальных данных, сравнением с результатами, полученными с помощью альтернативных методов.

Теоретическая значимость диссертации состоит в разработке математических моделей вибрации выдвижных устройств и колебаний плавниковых движителей, создании аналитических методов расчета собственных частот и напряженно-деформированного состояния при взаимодействии выдвижного устройства с потоком жидкости. Теоретической ценностью также обладает использование подхода ориентированных графов для вывода уравнений движения в задаче многих тел; решение связанной задачи динамики вязкой жидкости и колебаний машущих элементов; анализ устойчивости режимов работы составного плавникового движителя. **Практическая ценность** заключается в создании расчетных методик и программных инструментов для расчета вибраций выдвижных устройств, обосновании перспектив использования гидродинамических гасителей вихревых вибраций, рекомендациях по повышению тяги и КПД составного плавникового движителя. Практическая значимость подтверждается внедрением полученных результатов в проектно-конструкторскую деятельность АО «ЦКБ МТ «Рубин».

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Есть вопросы по тестовой задаче в параграфе 2.3. Почему для расчета выбраны число Рейнольдса $Re=5.5 \cdot 10^6$ и интенсивность турбулентности 0.5%? Такая интенсивность соответствует

эксперименту? На Рис. 2 коэффициент нестационарной боковой силы приводится для чисел Рейнольдса до $1.6 \cdot 10^6$, а в расчете Re – больше. Нужен комментарий, почему $C_{y\ vibr}$ не изменяется с ростом Re выше $1.6 \cdot 10^6$. Главный вопрос: для выбранного числа Рейнольдса совпадение по $C_{y\ vibr}$ получилось не слишком хорошее, почему было не сделать дополнительный расчет с другими Re ?

2. В обзоре указано, что теоретические соотношения, описывающие колебания упругой конструкции в потоке жидкости, зачастую не учитывают вязкость жидкости. В диссертации вязкость учтена, но нет анализа ее влияния, есть только замечания о влиянии пограничного слоя в области заделки. Каков, по мнению автора, вклад вязкости в решение рассмотренных задач? Можно ли сделать приближенные количественные оценки?
3. В задаче о выдвижных устройствах не учитывается обратное влияние деформации на поток. В общем случае это оправдано и не вызывает возражений. Но при использовании гасителей, как мне кажется, требуется дополнительное обоснование такой постановки, поскольку поле течения заметно меняется, и возможно, что даже малые перемещения могут влиять на эффективность работы гасителя.
4. В Главе 8 в уравнениях движения появляются члены, связанные с коэффициентами демпфирования. Почему данные члены не включены в общий вывод уравнений в Главе 7?

Перечисленные недостатки не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей заметный вклад в развитие аналитических и численных методов решения задач гидроупругости подводных объектов, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа хорошо оформлена, имеет продуманную структуру, представлен подробный

обзор литературы по современному состоянию вопроса. Исследования обладают внутренним единством и выполнены на высоком уровне.

Основные результаты, выносимые на защиту, прошли серьезную апробацию на международных и всероссийских конференциях и полностью опубликованы. Всего по результатам исследования опубликовано 12 работ, из них 5 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Имеются свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании сказанного считаю, что диссертация «Взаимодействие упругих конструкций с потоком жидкости» полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор диссертации, Коваль Кирилл Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
Кустова Елена Владимировна
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры гидроаэромеханики
математико-механического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета
198504, Санкт-Петербург
Университетский пр., д. 28
(812) 428 42 10
spbu@spbu.ru

Е.В. Кустова

08.02.2022

Личную подпись

заверяю

Заместитель научного

Управления кад

Кустова Е.В.

08.02.2022

