

## ОТЗЫВ

на диссертацию Л.С. Лаврищевой «Численное моделирование обтекания объектов морской техники и разработка технологии оптимизации формы гребного винта», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация написана на 126 стр., она включает введение, пять глав, заключение, список библиографических источников из 50 наименований, четыре приложения (листинги компьютерных кодов и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ), содержит 66 рисунков и 39 таблиц.

**Актуальность темы.** Диссертационное исследование Л.С. Лаврищевой посвящено разработке технологии оптимизации формы гребного винта на основе численного моделирования его сложного трехмерного обтекания. Гребной винт – важная часть движителей речных и морских судов. Целью его оптимизации, как правило, многокритериальной, является улучшение гидродинамических характеристик за счет выбора формы при заданных характеристиках. В настоящее время имеется основанное на многолетней практике проектирования понимание, какие характеристики винта следует фиксировать или ограничивать, а какие и в каком диапазоне можно варьировать. В то же время формализация и реализация этого понимания и последующая оптимизация наталкивается на решение нескольких весьма трудных задач. Прежде всего, это математическое (параметрическое) описание сложной формы винта, обеспечивающее высокие гидродинамические характеристики (в частности, безотрывное обтекание лопастей) при варьировании множества параметров формы. Вторая, не менее важная задача, – это выбор численной модели обтекания винта, включающий обоснование допущений, составление замкнутой системы уравнений, формулировку граничных условий, выбор размеров и способа дискретизации расчетной области, выбор численного метода решения исходных уравнений. Наконец, третья задача – задача многокритериальной оптимизации – состоит в выборе целевых функций с возможностью варьирования большого числа параметров и с учетом требований и ограничений. Последние, как правило, диктуются разработчиками и включают, в частности, габаритные размеры, тягу, момент, минимальное давление в области течения для предотвращения кавитации, характеристики винта, связанные с прочностью и т.п. В настоящее время все перечисленные направления – параметризация формы винта, моделирование обтекания и многокритериальная оптимизация – интенсивно развиваются, и здесь пока нет единой общепринятой технологии гидродинамического проектирования винтов. В связи с изложенным тема диссертации, безусловно, **актуальна.**



**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации.** Численное исследование обтекания гребного винта основано на фундаментальных подходах теоретической и вычислительной гидродинамики (стационарных и нестационарных уравнениях Рейнольдса – RANS- и URANS-подходах, – *k-omega* SST модели турбулентности Ментера, методе моделирования отсоединенных вихрей IDDES), хорошо разработанных численных методах их решения и эффективной компьютерной реализации (в расчетах использовался пакет Star-CCM+). Исследована сходимость результатов при измельчении сетки в расчетной области (от 200 тыс. до 35 млн. при RANS-подходе в зависимости от исходной конфигурации винта). При расчетах методом IDDES общее количество ячеек сетки было равно 98 млн. ячеек со сгущением к поверхности так, чтобы обеспечить  $y^+ \sim 1$ . Данная сетка обеспечила корректное разрешение структуры течения в пристеночной области и турбулентных вихрей вне ее. Полученные результаты имеют ясную физическую интерпретацию. Они также сравнивались по интегральным характеристикам винта (коэффициенты упора, момента и полезного действия) с опытными данными и на достаточно мелкой сетке при соответствующем выборе модели течения было получено хорошее согласие. Все это позволяет заключить, что **основные результаты диссертации, включая научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации являются в должной мере обоснованными и заслуживающими доверия.**

**Оценка новизны и достоверности полученных результатов.** Достоверность результатов, как было отмечено выше, обоснована использованием фундаментальных подходов теоретической и вычислительной гидродинамики, верификацией и валидацией численных результатов путем сравнения важнейших функционалов решения с экспериментальными данными.

Что касается научной новизны, то здесь я бы частично не согласился с автором (см. стр. 6–7 диссертации). На мой взгляд, научную новизну представляют не разработка компьютерного кода, реализующего параметрическую модель гребного винта (см. п. 2), и не автоматизация расчетов обтекания гребного винта в однородном (п. 1) и неоднородном (п. 6) потоке с помощью программы на языке Java, и даже не разработка технологии оптимизации формы гребного винта (пп. 3 и 7), хотя это полностью соответствует названию диссертации. На мой взгляд, **основная научная новизна** выполненного диссертационного исследования состоит **в развитии комплексного подхода к гидродинамическому проектированию** гребных винтов, который включает (I) предложенный автором метод многопараметрического описания очень сложной трехмерной геометрической модели винта с учетом различных ограничений, (II) современные возможности вычислительной гидродинамики и (III) современные методы оптимизации. Предложенный метод параметризации является полностью оригинальным. Его существо заключается в аппроксимации исходных кривых,



задающих первоначальную конфигурацию поверхности и определяемых большим числом свободных параметров, кривыми, удовлетворяющими тем же ограничениям, но со значительно меньшим числом свободных параметров, что позволило существенно сократить время оптимизации. В процессе оптимизации формы винта его обтекание впервые моделировалось на основе полных уравнений вязкой гидродинамики. В диссертации данный подход был реализован на примере оптимизации коэффициента полезного действия (КПД) гребного винта. Было также показано, что для ускорения процесса оптимизации расчеты трехмерного нестационарного обтекания винта, требующие значительных ресурсов ЭВМ, можно на первом этапе выполнять на относительно грубых сетках с последующим уточнением решения на сетке, обеспечивающей сеточную сходимость.

**Таким образом, новизна и достоверность результатов диссертации не вызывают сомнений.**

Выполненное исследование имеет **реальное практическое значение**, которое заключается в разработке на основе решения гидродинамической задачи обтекания гребного винта технологии оптимизации его формы с помощью оригинальной параметризации и последующей процедуры оптимизации. Данная технология уже применяется в Суперкомпьютерном центре математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

**По тексту и содержанию диссертации необходимо сделать ряд замечаний:**

1. При определении поля течения в стационарной постановке задачи (RANS-подход), которая использовалась в диссертации, исходные уравнения необходимо было рассматривать во вращающейся неинерциальной системе координат, однако в такой системе координат уравнения в работе не приводятся.
2. При расчете обтекания винтов привлекалась модель ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) (п. 2.5 и 5.7), однако об этой модели в диссертации практически ничего не сказано. Желательно пояснить в докладе на защите, в чем заключалась модель ЛТП.
3. При использовании метода отсоединенных вихрей (п. 4.3.3) следовало бы подробно описать переход от решения в URANS-области вверх по потоку от винта к решению в IDDES-области около винта. Такой переход, как известно, нетривиален и является в значительной степени искусством.
4. Автор описывает общую идею метода суррогатной оптимизации, но не описывает его применение к рассматриваемой задаче. Желательно пояснить алгоритм оптимизации.
5. В процессе оптимизации следовало бы, помимо указания на изменение гидродинамической конфигурации лопастей винта, описать особенности



изменения течения, что позволило бы лучше понять, за счет чего получаются лучшие интегральные характеристики и, как следствие, КПД.

Подводя итог, отмечу, что перечисленные выше замечания не снижают достоинств диссертации и не влияют на ее высокую оценку. Автором предложен, реализован и обоснован новый комплексный подход к гидродинамическому проектированию гребных винтов. Полученные результаты, относящиеся к исследованию гидродинамики и полученным в процессе оптимизации конфигурациям гребных винтов представляют значительный научный и практический интерес. Разработанные компьютерные коды, согласованные с коммерческими пакетами, используются в Крыловском государственном научном центре

Диссертационная работа Л.С. Лаврицевой является законченным исследованием, которое обладает существенной научной новизной и характеризуется тщательностью и систематичностью результатов, и обоснованностью выводов.

Основные результаты докладывались на 6-ти международных и российских конференциях, они опубликованы в материалах этих конференций и в 3-х статьях из Перечня ВАК.

Таким образом, диссертация удовлетворяет требованиям, установленным Приказом № 6821/1 от 01.09.2016 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а ее автор Лаврицева Любовь Сергеевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук, профессор,  
лауреат Премии первой степени им. Н.Е. Жуковского

Профессор кафедры "Плазмогазодинамика и теплотехника"  
Балтийского государственного технического  
университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова  
190005 Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1  
тел. 8(812)4957763,  
E-mail: tsrknv@bstu.spb.su; Yury-Tsirkunov@rambler.ru



Циркунов Юрий Михайлович

Подпись Ю.М. Циркунова удостоверяю

31.01.2019 г.

ПОДПИСЬ  
УДОСТОВЕРЯЮ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА  
СЕРГЕЕВА О.А.

