

## ОТЗЫВ

Официального оппонента доктора технических наук Ярисова Владимира Владимировича на диссертационную работу Соловьева Сергея Юрьевича на тему «Аэродинамика судов и морских сооружений с учетом пограничного слоя атмосферы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика»

### Актуальность темы

В последние годы в судостроении и смежных областях проектируется большое количество уникальных судов и морских сооружений. Корректное определение ветрового воздействия на эти объекты становится важной задачей. Для точного определения ветрового воздействия необходимо проведение экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях с учетом пограничного слоя атмосферы. Этому требуют большинство руководящих документов по проектированию. В России исследованиями аэродинамики судов и морских сооружений с учетом пограничного слоя атмосферы занимались крайне мало. В первую очередь это связано с проблемой отсутствия аэродинамических труб с длинной и широкой закрытой рабочей частью, в которых возможно проводить соответствующие исследования, а также с отсутствием технологии моделирования пограничного слоя атмосферы. По этим причинам основные исследования проводились в авиационных аэродинамических трубах в равномерном потоке. В этой связи тема и цель настоящей диссертационной работы – разработка, апробация и внедрение новых экспериментальных средств и методов, позволяющих определять аэродинамические характеристики судов и морских сооружений с учетом пограничного слоя атмосферы, несомненно, является актуальной.

### Краткое содержание работы

Диссертационная работа Соловьева Сергея Юрьевича состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 239 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 375 страницах текста, содержит 190 рисунков и 12 таблиц. **Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, обоснованы цели и задачи исследования, новизна и практическое значение результатов, показаны основные положения, выносимые на защиту.

#### Целью работы является:

- исследование закономерностей влияния пограничного слоя атмосферы (ПСА) на аэродинамические характеристики (АДХ) судов и морских сооружений с использованием специализированной аэродинамической трубы;
- разработка требований и создание специализированной аэродинамической трубы, которая обеспечивает выполнение исследований с учетом ПСА на крупных моделях;

- разработка технологии моделирования ПСА в рабочей части специализированной аэродинамической трубы.

Для достижения цели работы решались следующие задачи:

- разработка и обоснование технических требований к новой экспериментальной установке, обеспечивающей проведение исследований на крупномасштабных моделях судов и морских сооружений с учетом основных характеристик ПСА;

- создание ландшафтной аэродинамической трубы, обеспечивающей проведение исследований на крупномасштабных моделях судов и морских сооружений с учетом основных характеристик ПСА;

- изучение особенностей и определение закономерностей воздействия ПСА на надводную часть судов и морских сооружений;

- разработка новых алгоритмов и математической модели для получения оценок аэродинамических характеристик судов с учетом ПСА для прогноза маневренных характеристик и выбора средств управления на ранних стадиях проектирования судов;

- разработка метода определения ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты морской инфраструктуры, расположенные в районах с развитым рельефом местности.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы аэродинамики судов и морских сооружений. Проведен аналитический обзор российских и зарубежных норм по определению ветрового воздействия на сооружения. Выполнен анализ и классификация современных специализированных аэродинамических труб. В результате анализа особенностей и недостатков, существующих в мире аэродинамических труб ландшафтного типа впервые разработаны требования к параметрам современной аэродинамической трубы ландшафтного типа, при помощи которой возможно проводить исследования ветрового воздействия на уникальные сооружения с учетом ПСА.

**Во второй главе** представлено описание и обоснование выбора параметров основных элементов конструкции и вспомогательного инженерного оборудования ландшафтной аэродинамической трубы (ЛАТ). Разработана конструкция ЛАТ и ее элементов. Определены оптимальные размерности рабочей части, поворотных лопаток и других основных элементов экспериментальной установки.

В результате проектирования и строительства создана первая в России ландшафтная аэродинамическая труба со следующими элементами:

- закрытая рабочая часть с поперечными размерами 11 x 2,3 метра и длиной 18 метров. Обоснованная размерность позволяет моделировать ПСА и исследовать модели крупного масштаба с высокой детализацией;

- поворотный круг диаметром 10 метров способен нести нагрузку до 4 тонн и при этом сохраняет плоскостность в пределах 1,5 мм в любой точке на своей поверхности. Поворот на любой заданный угол осуществляется с погрешностью не более 0,1 градус. За счет поворота круга относительно потока моделируются все возможные направления ветра;

- координатное устройство с областью перемещения 10 x 10 x 2 метра и погрешностью позиционирования не более 0,5 мм позволяет в автоматическом режиме перемещать измерительные зонды для исследования характеристик потока;

- система климатического контроля, которая позволяет сохранять постоянную температуру потока в рабочей части ЛАТ с колебаниями порядка  $\pm 1$  град.

- система регулировки скорости потока до 14 м/с с шагом регулировки 0,1 м/с.

Разработанные конструктивные элементы и мероприятия, позволили создать в рабочей части ЛАТ достаточно равномерный для подобных установок поток.

**В третьей главе** приведены результаты исследований, направленные на разработку и верификацию технологии моделирования основных характеристик ПСА в рабочей части ЛАТ. В диссертации использован один из возможных подходов к оценке погрешности воспроизведения заданного профиля средней скорости ПСА. Данный подход заключается в выборе алгоритма определения систематической и случайной погрешности измерения скорости в рабочей части ЛАТ. Используя предложенный подход, проведена оценка относительной погрешности измерений профиля средней скорости в ЛАТ. Ее величина для  $H = 0,1 - 1,8$  м не превышает значение 4,3 %.

Проведена верификация разработанной технологии моделирования ПСА. Для верификации выбрана тестовая задача обтекания куба.

Полученные в результате исследований экспериментальные данные по распределению давления по вертикальной и горизонтальной линии симметрии хорошо согласуются с экспериментальными данными других работ, а также результатами натурных измерений. Наблюдается небольшое количественное расхождение лишь в узкой области в отрывных зонах вблизи кромок куба, что может быть объяснено расхождением в интенсивности турбулентности исходного набегающего потока.

**В четвертой главе** изложены новые результаты экспериментальных исследований влияния ПСА на интегральные аэродинамические характеристики морских судов, а также новые алгоритмы и математические модели получения безразмерных аэродинамических коэффициентов для морских судов. Результаты исследований позволили установить степень влияния ПСА на геометрические размеры и интенсивность отрывных зон, образующихся на элементах надводной части морских судов.

Проведенные для 26 типов судов различные исследования позволили сформировать новую базу данных для безразмерных аэродинамических коэффициентов в зависимости от угла дрейфа с учетом физических особенностей взаимодействия ПСА с надводной частью судна.

Особого внимания заслуживают результаты исследований ПСА на параметры потока над взлетно-посадочной площадкой ледокола Лидер. Выявлено влияние ПСА на поле скорости, которое заключается в

уменьшении интенсивности и размеров отрывных зон вблизи взлетно-посадочной площадки для всех основных направлений ветра. Результатом этих исследований является обоснованное снижение скорости на использование вертолетной техники на судне в форме круговых диаграмм для вертолета Ка-32.

**В пятой главе** приведены обзор современного состояния аэродинамики ландшафтных объектов, результаты исследования ветровых нагрузок на пришвартованные морские объекты с учетом сложного рельефа местности. Также предложено уточнение подхода из СП 38.13330.2012 по определению ветровых нагрузок на гидротехнические сооружения и пришвартованные суда, позволяющие экономически обосновывать стоимости систем швартовки и крепления понтонов.

Установлено, что для удержания яхт длиной 20 и 40 метров в яхтенной марине бухты г. Геленджик несущей способности стандартных швартованных устройств достаточно. Для мега-яхт 60 и 80 метров, предполагаемый в проекте тип швартовки к мурингам («мертвым» якорям и цепям на дне) не может быть использован. Для обеспечения безопасной стоянки мега-яхт рекомендуется применить швартовку лагом.

**В шестой главе** приводятся результаты исследований аэродинамической устойчивости арок Крымского моста, а также результаты моделирования морской операции по транспортировке арок к месту их установки на фарватерные опоры.

Целями исследования были проверка аэродинамической устойчивости а/д арки и оценка амплитуды колебаний а/д арки моста с учетом различных факторов: угла натекания ветра, наличия снежных заносов, наличия а/д и ж/д траффика и т.д.

Впервые получена взаимосвязь вихревых структур, возникающих при обтекании пролетного строения а/д арки морского моста на разных режимах эксплуатации моста, с критической скоростью возникновения колебаний и их амплитудой.

Для уменьшения колебания пролетного строения а/д арки Крымского моста разработаны технические решения по пассивным аэродинамическим гасителям: обтекатели и аэродинамическое оребрение, которые способны качественно изменить структуру обтекания пролетного строения и тем самым устранить причину возникновения аэродинамической неустойчивости.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы и выводы.

**Практическое значение** состоит в следующем:

– Автором разработаны требования и технические решения, на основе которых создана первая в России ландшафтная аэродинамическая труба, технические параметры которой обеспечивают выполнение исследований в области аэродинамики для широкого класса объектов.

– Разработана и экспериментально обоснована технология моделирования в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы

основных характеристик ПСА. Указанная технология внедрена и широко применяется при выполнении аэродинамических исследований, проводимых в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

– Создана база экспериментальных данных по аэродинамическим характеристикам судов с учетом физических особенностей воздействия ПСА, которая может быть использована для тестирования различных расчетных математических моделей и методов численного моделирования.

– Разработанной математической модели создана программа ЭВМ, позволяющая получать априорные оценки безразмерных аэродинамических коэффициентов судна с учетом ПСА, которые необходимы для прогнозирования маневренных характеристик и выбора средств управления на ранних стадиях проектирования новых судов.

– Разработаны конструкции различных аэродинамических гасителей, которые в отличие от массовых демпферов качественно изменяют структуру обтекания пролетного строения и тем самым устраняют причину возникновения аэродинамической неустойчивости, а также способствуют снижению знакопеременных ветровых нагрузок. Новизна и оригинальность решений подтверждена патентами.

– Результаты диссертационной работы получили широкое внедрение и использованы при проектировании 52 судов и различных сооружений конструкторскими бюро и проектными институтами из России и зарубежных стран. Реализация результатов научных исследований подтверждена 11 актами о внедрении.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– Разработана технология моделирования, которая позволяет воспроизводить основные характеристики пограничного слоя атмосферы рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы

– Создана математическая модель, основанная на использовании методов множественной линейной регрессии, которая позволяет получать оценки аэродинамических характеристик с учетом физических особенностей процесса взаимодействия ПСА с надводной частью судна.

– Получены новые результаты экспериментальных исследований влияния ПСА на параметры потока в области взлетно-посадочной площадки и закономерности взаимодействия ПСА с надводной частью судов и сооружений.

– Изучено влияние вихревых структур, возникающих при обтекании пролетного строения морского моста, на параметры, характеризующие процессы возникновения и развития аэродинамической неустойчивости для различных режимов его эксплуатации. Показана трансформация структуры обтекания при изменении эффективной высоты балки жесткости пролетного строения, как одного из определяющих параметров процесса, а также взаимосвязь структуры течения с критической скоростью возникновения явления аэродинамической неустойчивости типа вихревое возбуждение.

– Разработан метод оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты морской инфраструктуры, расположенные в областях со сложным рельефом местности.

**Апробация результатов.** Результаты исследования доложены на 26 международных и российских конференциях. По материалам диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 1 монография, 14 статей в рецензируемых изданиях и международных базах данных Web of Science и Scopus, 4 патента, 2 свидетельства программ для ЭВМ.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением во всех экспериментальных исследованиях современных средств измерений с действующей метрологической аттестацией. Верификация разработанной технологии моделирования ПСА показала согласование полученных результатов с имеющимися натурными данными. Результаты оценок аэродинамических характеристик судов, полученных с использованием разработанной математической модели, согласуются с экспериментальными данными. Эффективность разработанных технических решений и конструкций пассивных гасителей колебаний подтверждена их успешной эксплуатацией на мостовых сооружениях.

**Автореферат.** Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, дает четкое представление о диссертации и в полной мере отражает ее содержание. Сама диссертация хорошо оформлена, написано понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций.

#### **Замечания**

1. Диссертация содержит большой перечень аббревиатур, в числе нерасшифрованных ПСА, АДХ, ЛАТ, ВПП судна, СПГ и др.

2. Некоторые формулы не объяснены, например, индекс EEDI.

3. В диссертации рассмотрен пограничный слой атмосферы высотой до нескольких сотен метров, что на первый взгляд кажется излишним, поскольку для решения большинства судостроительных задач достаточно рассматривать слой порядка 50 метров.

4. В натуральных условиях в море существуют волнение, вызванное ветром. В работе явно не указано, как происходит моделирование раздела сред вода/воздух и каким образом происходит учет волнового слоя.

Сделанные замечания либо носят характер пожеланий, либо относятся к оформлению работы и не изменяют общую положительную оценку диссертации.

#### **Выводы**

1. Диссертация Соловьева Сергея Юрьевича представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области аэродинамики судов и морских сооружений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие методов и средств проведения экспериментальных исследований кораблей, судов и морских сооружений, а также способов и средств улучшения их полезных качеств.

2. Диссертация соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», (утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор Соловьев Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика».

Официальный оппонент,  
д-р, техн. наук (специальности: 05.08.01 – Теория корабля  
и строительная механика; 05.08.03 – Проектирование  
и конструкция судов), доцент,  
профессор кафедры «Машиноведения  
и технических систем» инженерно-технического  
института ФГАОУ ВО «Балтийский  
федеральный университет им. И. Канта»  
«*08*» *апреля* 2021 г.

 В.В. Ярисов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Балтийский федеральный университет им. И. Канта».  
Адрес: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, 14, Тел. +7 (4012) 59-55-95,  
e-mail: [VYarisov@kantiana.ru](mailto:VYarisov@kantiana.ru)

