

*На правах рукописи*



Соловьев Сергей Юрьевич

Аэродинамика судов и морских сооружений с учетом пограничного слоя атмосферы

Специальность 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Санкт – Петербург - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный научный центр»

Научный консультант: Половинкин Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», научный руководитель предприятия.

Официальные оппоненты: Гайкович Александр Иосифович, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», профессор кафедры проектирования судов.

Рябинин Анатолий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», профессор кафедры гидроаэромеханики.

Ярисов Владимир Владимирович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», профессор кафедры машиноведения и технических систем.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита состоится «21» мая 2021 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 411.004.02 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<https://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «16» февраля 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 411.004.02  
кандидат технических наук, доцент



О.В. Малышев

## Общая характеристика работы

*Актуальность и степень разработанности темы исследования.* В настоящее время в судостроении и смежных областях наметился рост числа проектируемых уникальных судов и морских сооружений, для которых ветровое воздействие выходит на первый план. Для этих объектов особую значимость приобретают задачи определения ветровой нагрузки, исследование структуры потока над взлетно-посадочными площадками, обеспечение аэродинамической устойчивости. Для точного определения ветрового воздействия необходимо проведение экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях с учетом пограничного слоя атмосферы (ПСА).

Накопленный в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» опыт показывает, что определение аэродинамических характеристик судов и морских сооружений без учета ПСА может привести к существенному завышению ветровой нагрузки для отдельных направлений ветра. Иногда подобное завышение оправданно для относительно простых с точки зрения аэродинамики проектов. Но в ряде встречавшихся в практике ФГУП «Крыловский государственный научный центр» уникальных объектов такой «запас» мог привести к неоправданному завышению прочности, а, следовательно, массы и материалоемкости.

Анализ открытых источников показал отсутствие подробных исследований по влиянию ПСА на структуру потока над взлетно-посадочными площадками судов и морских платформ. В настоящее время определение расположения взлетно-посадочной площадки при проектировании, а также оценка ограничений и рекомендации для безопасного взлета, посадки и маневрирования вертолетной техники разрабатываются с использованием измерений в аэродинамических трубах в равномерном потоке без учета влияния ПСА. Поскольку, по-прежнему, происходят нештатные ситуации и аварии вертолетов, связанные с воздействием ветра, указанная проблема требует изучения. По мнению автора, задачи обеспечения безопасности использования вертолетной техники, в том числе беспилотных летательных аппаратов, на

судах и морских платформах должны решаться на ранних стадиях проектирования судов и платформ с учетом воздействия ПСА.

Не менее важными являются проблемы связанные с корректным определением ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты прибрежной инфраструктуры, расположенные в районах с развитым рельефом местности. В данном случае необходимо учитывать не только воздействие ПСА, но и существенную пространственную и временную неоднородность ветрового потока, созданного окружающим рельефом. От точности определения ветровых нагрузок зависит не только стоимость проектных решений по причалам и швартовым устройствам, но и сохранность самих пришвартованных судов.

Следует отметить, что современные руководящие документы по проектированию судов (Правила Российского морского регистра судоходства), вертолетных площадок на судах и морских платформах (DOC 9261–AN/903 International Civil Aviation Organization), гидротехнических сооружений (СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения») содержат требования и рекомендации по учету влияния основных характеристик ПСА при определении ветровых нагрузок. В частности, необходимо учитывать изменение средней и пульсационной составляющих ветра по высоте, а также спектральные свойства пульсаций ветра. Несмотря на это в России исследованиями аэродинамики судов и морских сооружений с учетом ПСА 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 ПСА. По этим причинам основные исследования проводились в авиационных аэродинамических трубах в равномерном потоке. В нашей стране этими исследованиями занимались Л.Д. Волков, С.М. Ганин, С.И. Девнин, А.И. Короткин, В.Н. Трещевский, В.А. Тюшкевич и другие. Некоторые эксперименты по определению влияния ПСА на суда проводили А.И. Короткин

и А.О. Лебедев в аэродинамической трубе авиационного типа, где за счет использования сеток удавалось воспроизвести лишь профиль средней скорости натурального ветра.

Приведенные выше обстоятельства показывают актуальность создания новой аэродинамической трубы и технологии моделирования ПСА, позволяющих воспроизводить основные характеристики ПСА. Становятся актуальными разработка методов, подходов и математической модели для исследования воздействия ветра на суда и морские сооружения с учетом физических особенностей ПСА, а для отдельных задач и с учетом моделирования окружающего ландшафта.

***Целью настоящей работы являлась*** разработка, апробация и внедрение новых экспериментальных средств и методов, позволяющих определять аэродинамические характеристики судов и морских сооружений с учетом ПСА. Работа носит комплексный характер, так как определение аэродинамических характеристик с учетом физических особенностей воздействия ПСА требует рассмотрения совокупности проблем, которые могут быть сформулированы как ***задачи исследования:***

- 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.
- Разработка технологии моделирования 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 судна с учетом ПСА,

которые необходимы для прогнозирования маневренных характеристик и выбора средств управления на ранних стадиях проектирования судна.

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

***Научная новизна работы:***

1. Разработана технология моделирования основных характеристик ПСА в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы, основанная на принципах совместного моделирования по толщине пограничного слоя за счет использования элементов дискретной шероховатости и трапециевидных вихрегенераторов. Нижняя часть ПСА моделируется элементами дискретной шероховатости, которые предварительно подбираются при помощи эмпирической зависимости, с последующим уточнением на основе базы экспериментальных данных, полученных автором. Верхняя часть ПСА моделируется в соответствии с предложенным автором подходом, основанным на использовании коэффициента загромождения рабочей части, который в отличие от существующих подходов устанавливает однозначную взаимосвязь между геометрией трапециевидных вихрегенераторов, геометрическими параметрами рабочей части и характеристиками ПСА.

2. Создана новая база данных, которая в отличие от существующей содержит экспериментальные данные аэродинамических характеристик судов, полученных с учетом физических особенностей процесса взаимодействия ПСА с надводной частью судна. Предложены новые алгоритмы и соотношения для аналитической аппроксимации аэродинамических характеристик судов из базы данных.

3. На основе предложенных алгоритмов, соотношений и новой базы данных с применением методов регрессионного анализа разработана новая математическая модель, которая позволяет получать значения аэродинамических характеристик судна с учетом физических особенностей воздействия ПСА.

4. Впервые экспериментально подробно исследовано влияние ПСА на структуру потока над взлетно-посадочной площадкой судна. В результате исследований установлено уменьшение интенсивности и геометрических размеров отрывных и рециркуляционных зон вблизи взлетно-посадочной площадки для всех основных направлений ветра.

5. Предложен и апробирован метод оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты прибрежной инфраструктуры, расположенные в районах с развитым рельефом местности. В отличие от существующих способов оценки рассматривается не среднее, а эффективное значение компонент вектора скорости ветра. Предложенный подход позволяет при определении ветровой нагрузки учесть пространственно-временную неоднородность поля скорости, созданную сложным рельефом местности и окружающей застройкой, а также получить ее пульсационное значение для использования в расчетных моделях.

6. Изучено влияние вихревых структур, возникающих при обтекании пролетного строения мостов (в том числе 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.

#### ***Практическая значимость.***

1. Разработаны и обоснованы требования и технические решения, на основе которых создана ландшафтная аэродинамическая труба для проведения исследований ветрового воздействия на суда и сооружения с использованием крупномасштабных моделей и учетом ПСА.

2. Технические параметры созданной ландшафтной аэродинамической трубы обеспечивают выполнение исследований в области аэродинамики для

широкого класса объектов судостроительной, градостроительной и мостостроительной отраслей.

3. Разработана и экспериментально обоснована технология моделирования в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы основных характеристик ПСА, включая профиль средней и пульсационной составляющей скорости, а также энергетические характеристики потока. Указанная технология внедрена и широко применяется при выполнении аэродинамических исследований, проводимых в ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

4. 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.

5. На основе 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. Результаты проведенной верификации позволяют сделать вывод о согласовании результатов, получаемых посредством разработанной программы для ЭВМ с данными экспериментальных исследований.

6. На основе изученной взаимосвязи вихревых структур, возникающих при обтекании пролетного строения моста, с параметрами, характеризующими процесс аэродинамической неустойчивости, предложены новые технические решения для уменьшения амплитуды колебаний. 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.



7. 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.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

1. Требования и технические решения для создания ландшафтной аэродинамической трубы, предназначенной для проведения исследований ветрового воздействия на суда и сооружения с использованием крупномасштабных моделей и учетом ПСА.

2. Технология моделирования основных характеристик ПСА в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы и результаты ее верификации.

3. 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.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния ПСА на параметры потока в области взлетно-посадочной площадки и закономерности взаимодействия ПСА с надводной частью судов и сооружений.

5. Метод оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты морской инфраструктуры, расположенные в областях со сложным рельефом местности и результаты его апробации.

6. Технические и конструктивные решения по аэродинамическим гасителям колебаний и обоснованные рекомендации по назначению их основных геометрических параметров, позволяющие обеспечить аэродинамическую устойчивость пролетных строений мостовых сооружений, в том числе морских мостов, испытывающих воздействие морского ПСА.

7. Внедрение ландшафтной аэродинамической трубы и технологии моделирования основных характеристик ПСА в исследовательскую деятельность ФГУП «Крыловский государственный научный центр» – ведущей

научной организации судостроительной отрасли, а также внедрение основных результатов настоящей работы при проектировании судов и сооружений различных типов.

***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.

***Личное участие*** автора состоит в определении цели и задач исследования; разработке ландшафтной аэродинамической трубы; разработке метода моделирования основных параметров ПСА; разработке математической модели для определения аэродинамических характеристик судов с учетом ПСА; разработке метода определения ветровой нагрузки на объекты инфраструктуры и пришвартованные суда, а также в руководстве и участии в выполнении описанных в диссертационной работе экспериментальных исследований, анализе экспериментальных данных, формировании основных научных результатов и внедрении этих результатов в проектирование.

***Апробация работы.*** Основные результаты работы докладывались на 26 российских и международных конференциях, форумах, семинарах и симпозиумах: Конференция «Научно-практическое развитие судостроения» (г. Санкт-Петербург 2019); Форум «Высотное и уникальное строительство» (г. Екатеринбург 2019, 2018, 2017, 2016, 2015); Семинар секции РАН «Строительная механика и надежность конструкций» (г. Санкт-Петербург 2019); Конференция «Новые технологии в мостостроении» (г. Санкт-Петербург 2019, 2018); XII Всероссийской конференции «Актуальные проблемы

проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений» (г. Санкт-Петербург 2019); Международная выставка и научная конференция «Гидроавиасалон» (г. Геленджик 2018, 2016); XI научно-техническая конференции «Гидроэнергетика, гидротехника. Новые разработки и технологии» (г. Санкт-Петербург 2017); 40-й, 39-й, 38-й международный симпозиум International Association for Bridge and Structural Engineering (г. Нант 2018, г. Ванкувер 2017, г. Гуанчжоу 2016); Конференция «Проектирование транспортной инфраструктуры» (г. Санкт-Петербург 2016); Международная конференция «International Offshore and Polar Engineering Conference» 2015; 13-й Азиатский симпозиум по визуализации (ASV-13) (г. Новосибирск 2015); XIII международная конференции «Оптические методы исследования потоков» (г. Москва 2015); III научно-техническая конференция «Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы» (г. Москва 2015); Международная конференции по механике «Поляховские чтения» (г. Санкт-Петербург 2015); Международная конференция по подводным технологиям «SubSeaTECH» (г. Санкт-Петербург 2014); Международная конференция «Мостостроение Европы и России» (г. Бордо 2014); 10-я международная конференция «International Conference on Hydrodynamics» (г. Санкт-Петербург 2012).

**Публикации.** 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.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы получили широкое внедрение и использованы при проектировании 52 судов и сооружений различных типов. В частности:

- С использованием разработанной математической модели на ранних стадиях проектирования получены оценки аэродинамических характеристик судов, включая ледокол Лидер (проект 10510), Плавучая база

комплексного обеспечения буровых работ (проект 00803), Судно снабжения морских нефтегазовых сооружений (проект 22430).

- Метод оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты инфраструктуры использован при проектировании яхтенной марины в бухте г. Геленджик, а также Центра строительства крупнотоннажных морских сооружений на Кольском полуострове.

- Разработанные технические и конструктивные решения по гасителям колебаний внедрены при проектировании, установлены и успешно эксплуатируются на ряде мостовых сооружений, включая Крымский мост, Трансграничный мостовой переход Россия-Китай, мост на о. Сахалин.

Разработанная ландшафтная аэродинамическая труба и технология моделирования основных характеристик ПСА внедрены и используются в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» для проведения научных исследований для судостроительной, мостостроительной и градостроительной отраслей. Использование результатов диссертации в научной и проектной деятельности подтверждено 11 актами о внедрении.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 239 наименования и 1 приложения. Работа изложена на 385 страницах текста, содержит 173 рисунка и 12 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** показана актуальность развиваемого в диссертации направления по аэродинамике судов и морских сооружений с учетом ПСА. Формулируется цель и задачи исследования, приводится краткое изложение содержания работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проводится обзор наиболее активно исследуемых задач в области аэродинамики судов и морских сооружений, а также подробный анализ руководящих документов по проектированию судов и морских сооружений в части определения ветрового воздействия.

Также в первой главе систематизированы данные по характеристикам аэродинамических труб, которые используются для моделирования ПСА,

проведен анализ их особенностей и недостатков. Разработаны и обоснованы требования к параметрам ландшафтной аэродинамической трубы, при помощи которой возможно проводить исследования ветрового воздействия на уникальные суда и морские сооружения с учетом ПСА и окружающего ландшафта на крупномасштабных моделях. Эти требования могут быть сформулированы следующим образом:

*Длина рабочей части* должна составлять *более 15 метров*. Она определяется из необходимости соблюдения полуэмпирического критерия, устанавливающего соотношение между масштабом шероховатости подстилающей поверхности и характерным размером исследуемого объекта. При длине рабочей части менее 15 метров такие важные параметры ПСА как профиль пульсационной составляющей скорости, а также продольный интегральный масштаб турбулентности могут быть воспроизведены только за счет сложных механических систем, использование которых представляется экономически и технологически нецелесообразным.

*Ширина рабочей части* должна составлять *более 10 метров*. Данный параметр связан с необходимостью проводить исследования для уникальных объектов на крупномасштабных моделях с высокой детализацией. Например, характерный размер современных газозводов, контейнеровозов, трубоукладочных судов составляет порядка 300 метров. Для указанных судов размер модели в масштабе 1:100 составляет порядка 3 метров. При исследовании гидротехнических объектов и объектов прибрежной инфраструктуры, например Регазификационный терминал СПГ вблизи г. Калининград и Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений в Мурманской области, характерный размер модели в масштабе 1:100 составлял порядка 8 метров. Следует отдельно отметить задачи исследования ветровых режимов в акваториях бухт. Для этих задач необходимо воспроизводить бухту и окружающий ландшафт, характерный размер которых составляет 8 ÷ 12 км, таким образом, в масштабе 1:1000 размер модели составляет 8 ÷ 12 метров.

*Высота рабочей части* должна составлять более 1.8 метра. Данный параметр в меньшей степени зависит от характерного размера исследуемого объекта. Высота рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы определяется на основании расчетов коэффициентов запираания рабочей части моделью и спутной струей от модели, а также оценки влияния запираания рабочей части на измеряемые аэродинамические характеристики модели. При высоте рабочей части более 1.8 метра и ширине более 10 метров, поправки на запираание рабочей части составляют  $0,5 \div 1 \%$  от измеряемой на модели величины аэродинамической силы и момента.

*Поворотный круг* способный нести нагрузку более 2-х тонн и осуществлять поворот модели на заданный угол с погрешностью не более 0,1 градус. За счет поворота круга относительно потока обеспечивается моделирование всех возможных направлений ветра, воздействующих на судно и морские сооружения.

*Координатное устройство* с областью перемещения сопоставимой с габаритами рабочей части и погрешность позиционирования не более 0,5 мм. С помощью координатного устройства перемещается датчик для измерения полей скорости над взлетно-посадочными площадками и проводятся исследования ветровых режимов в акваториях бухт и т.д. Указанные требования к погрешности перемещения координатного устройства связаны с необходимостью обеспечивать соответствие позиционирования датчика скорости с заданными координатами контрольных точек.

*Система климатического контроля*, которая поддерживает постоянную температуру потока в рабочей части. Ландшафтные аэродинамические трубы имеют замкнутый контур и вентиляторные установки с осевыми двигателями, расположенными в проточной части обратного канала, которые нагревают поток во время работы. При проведении исследований поток в рабочей части за одну рабочую смену нагревается с 20-22 градусов до значения порядка 45 градусов. Существенное изменение температуры воздушного потока может послужить причиной недостоверных экспериментальных данных, особенно при

исследовании упруго-подобных моделей и использовании таких средств измерения как термоанемометры.

Во второй главе приведены характеристики и описание основных элементов конструкции и оборудования ландшафтной аэродинамической трубы. 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. Обоснованные габариты позволяют моделировать ПСА и проводить исследования на крупномасштабных моделях.
- Поворотный круг диаметром 10 метров способен нести нагрузку до 4 тонн и при этом сохранять плоскостность в пределах 1,5 мм в любой точке 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 регулировки скорости потока позволяет задавать стабильную во времени скорость потока до 14 м/с с шагом регулировки 0,1 м/с.
- Система климатического контроля, которая позволяет сохранять постоянную температуру потока в рабочей части ЛАТ с колебаниями порядка  $\pm 1$  градус.

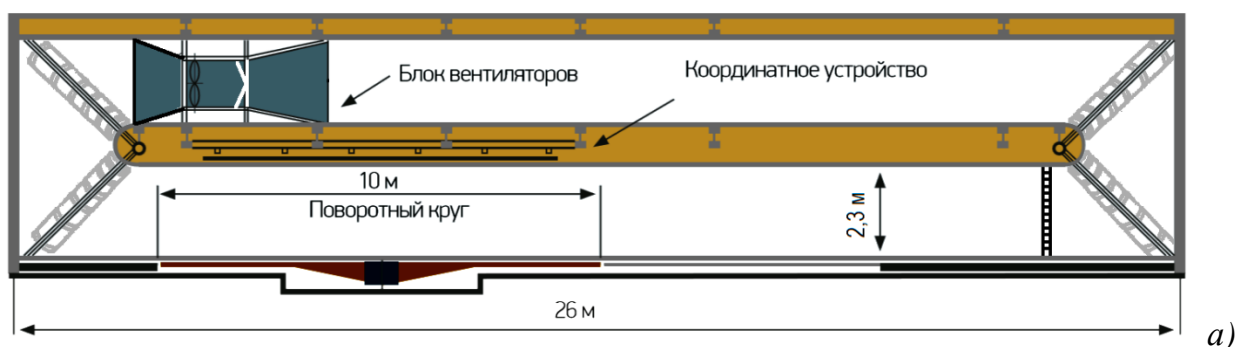




Рисунок 1 - Схема Ландшафтной аэродинамической трубы: а) продольный разрез, б) поперечный разрез

Для создания равномерного потока в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы автором были спроектированы следующие элементы: спрямляющие аппараты вентиляторной установки; коллекторы и диффузоры вентиляторной установки; поворотные лопатки; хонейкомб. Разработанные конструктивные элементы и мероприятия по выравниванию потока позволили создать в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы достаточно равномерный для подобных установок поток. В результате подробного измерения характеристик потока в рабочей части получено значение пространственной неравномерности поля скорости, которое для ядра потока составляет  $\mu = 1 \pm 0,02$  (рисунок 2). Степень турбулентности для ядра потока не превышает значения  $It_U = 2,6 \%$ .

$$\mu_i = 1 + \frac{(V_i - V_{cp})}{V_{cp}}, \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость в  $i$ -ой точке рабочей части,  $V_{cp}$  – средняя скорость потока в ядре рабочей части.

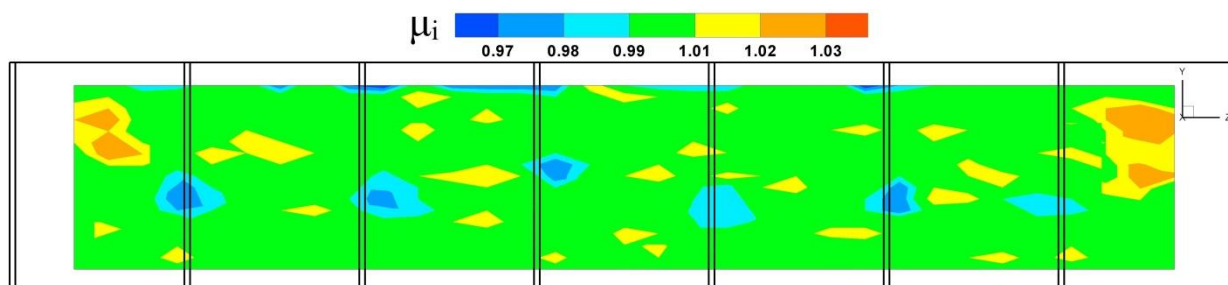


Рисунок 2 – Значение коэффициента поля в центральной плоскости после завершения мероприятий по выравниванию потока



Третья глава посвящена изложению результатов исследований, направленных на разработку и верификацию технологии моделирования основных характеристик ПСА в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы.

Анализ существующих подходов и способов моделирования ПСА в аэродинамических трубах разных типов позволил определить наиболее целесообразный способ моделирования ПСА в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы, который основан на использовании статичных заграждений. В специализированной литературе он хорошо описан применительно к стендам с малым размером рабочей части. Однако использование эмпирических зависимостей для подбора заграждений, полученных на стендах с малым размером рабочей части, для ландшафтной аэродинамической трубы с рабочей частью на порядок большего размера не дало ожидаемого результата. В связи с этим, потребовалось проведение разработки технологии моделирования ПСА в ландшафтной аэродинамической трубе, а указанный способ являлся начальным приближением для нее.

В основе разработанной технологии лежит гипотеза о том, что основные характеристики ПСА можно воспроизвести в рабочей части, если рассмотреть отдельно два участка по толщине пограничного слоя. Первый участок по высоте рабочей части  $H = 0 - 0,4$  метра воспроизводится за счет использования статичных элементов дискретной шероховатости, второй участок  $H = 0,4 - 1,8$  метра – за счет статичных вихрегенераторов трапециевидной формы.

Подбор дискретной шероховатости для моделирования первого участка профиля ПСА выполняется на основе базы данных, полученной автором в результате систематических исследований влияния габаритов, количества и расположения элементов дискретной шероховатости в виде призм на параметры ПСА по высоте рабочей части  $H = 0 - 0,4$  метра.

Подбор вихрегенераторов для моделирования второго участка ПСА выполнен в соответствии с предложенным автором подходом на основе коэффициента загромождения начального сечения рабочей части, который

однозначно определяется формой вихрегенераторов и расстоянием между ними. В результате проведенных многократных измерений впервые выявлена зависимость между коэффициентом загромождения начального сечения рабочей части и значением профиля скорости в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы для участка от 0,4 до 1,8 метра. Полученная зависимость позволяет рассчитывать геометрические параметры вихрегенераторов необходимых для моделирования характеристик ПСА морей, океанов и других типов местности.

В диссертации используется подход к оценке погрешности воспроизведения заданного профиля средней скорости ПСА, который основан на определении систематической и случайной погрешности измерения скорости в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы. Используя предложенный подход, проведена оценка относительной погрешности измерений профиля средней скорости в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы. Ее величина для  $H = 0,1 - 1,8$  м не превышает значение 5 %.

Для верификации разработанной технологии выбрана тестовая задача обтекания куба, имеющая обширные данные по исследованиям в аэродинамических трубах и данные натурных измерений на кубе с высотой грани 6 метров. При выполнении исследований для данной задачи в ландшафтной аэродинамической трубе были воспроизведены основные характеристики ПСА (рисунок 3), который согласно Еврокод соответствует типу местности «0» (степенной профиль с показателем  $\alpha = 0,11$ ). Полученные в результате исследований экспериментальные данные (рисунок 4) 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.

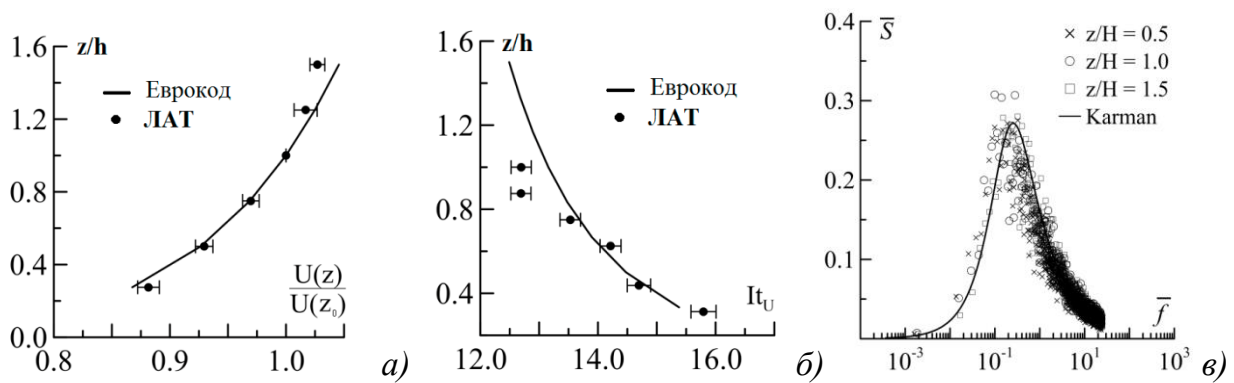


Рисунок 3 – Распределение характеристик потока по высоте рабочей части: а) средняя скорость; б) интенсивность турбулентности; в) безразмерная спектральная плотность

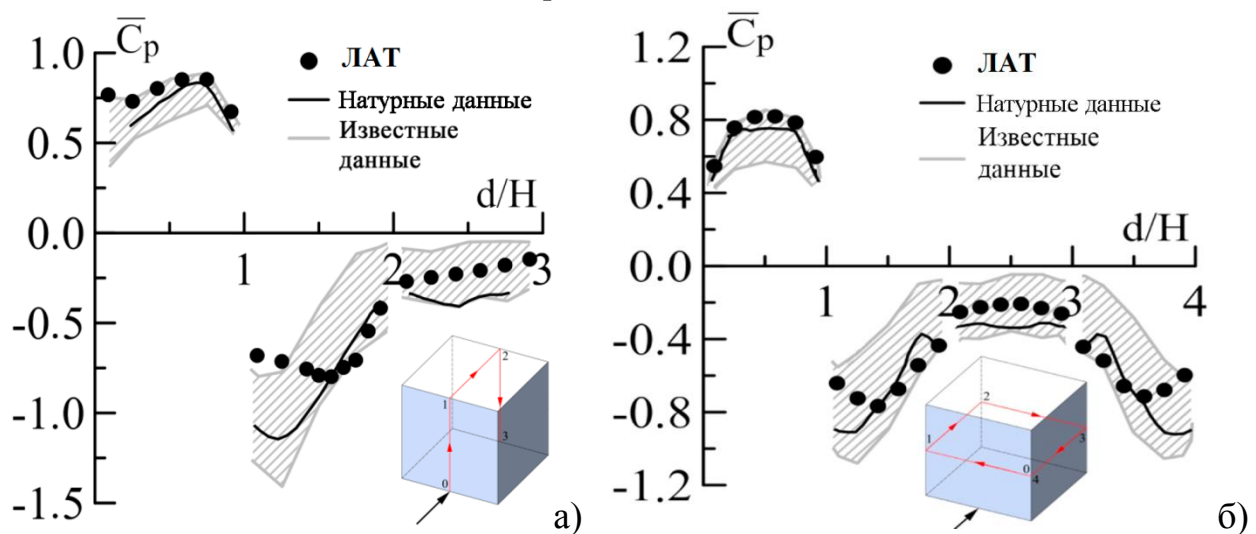


Рисунок 4 – Распределение коэффициента давления: а) по вертикальной линии симметрии, б) по горизонтальной линии симметрии

**Глава 4** посвящена изложению результатов исследования влияния ПСА на аэродинамические характеристики судов, а также разработке новых алгоритмов и математической модели для получения безразмерных аэродинамических коэффициентов судов.

Для изучения влияния ПСА на значения безразмерных аэродинамических коэффициентов судна и параметров потока над взлетно-посадочной площадкой проводились сравнительные модельные исследования в равномерном потоке и при условии моделирования ПСА.

Установлено, что зависимости аэродинамических коэффициентов продольной силы, боковой силы, момента крена и момента рысканья ( $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_{mx}$ ,  $C_{mz}$ ), полученные в равномерном потоке и ПСА, качественно имеют

схожий характер, однако количественно в ПСА они меньше (рисунок 5). Максимальная разница значений достигает 30 % для коэффициента  $C_y$  и 15 % для коэффициентов  $C_{mx}$ ,  $C_{mz}$ . Отличия в значениях коэффициентов получены для различных типов судов и обусловлены не только разной наполненностью профиля скорости, но и смещением центра давления. Результаты выполненных исследований позволяют установить степень влияния ПСА на геометрические размеры и интенсивность отрывных зон, образующихся на элементах надводной части судна.

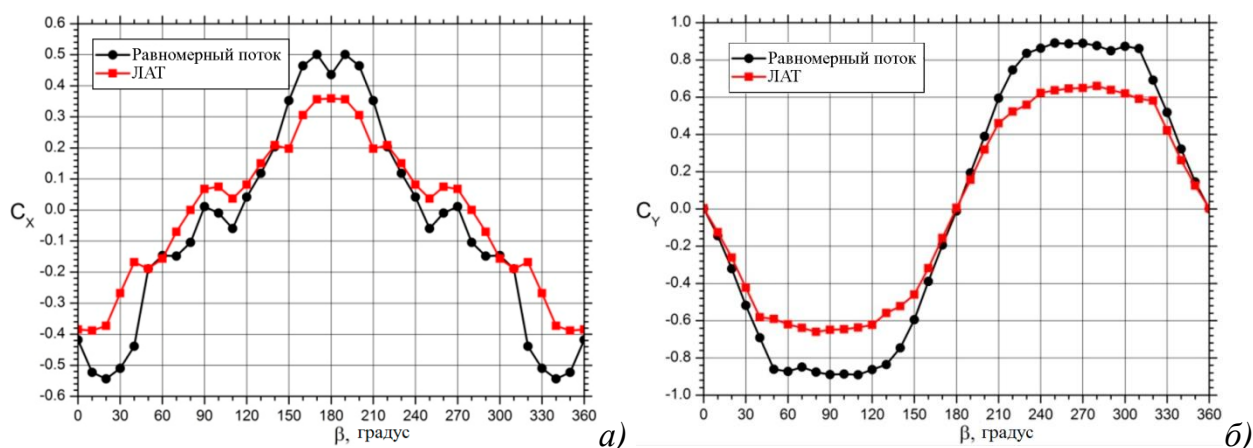


Рисунок 5 – Зависимости безразмерных аэродинамических коэффициентов от угла дрейфа ( $\beta$ ): а) коэффициент продольной силы; б) коэффициент поперечной силы

Проведенные для 26 судов различных типов исследования позволили составить новую базу данных по зависимостям безразмерных аэродинамических коэффициентов от угла дрейфа с учетом физических особенностей взаимодействия ПСА с надводной частью судна.

С использованием новой базы данных решена задача по разработке математической модели, позволяющей получать априорные оценки аэродинамических коэффициентов судна с учетом ПСА, которые необходимы для прогнозирования маневренных характеристик и выбора средств управления на ранних стадиях проектирования судна. На первом этапе решения задачи в работе обосновывается использование в виде аппроксимирующей функции тригонометрического многочлена с семью первыми членами ряда Фурье с учетом постоянного слагаемого (см. (2) и (3)), что позволяет достаточно точно

аппроксимировать уже существующие в базе\_экспериментальные зависимости аэродинамических коэффициентов судов от угла дрейфа (рисунок 6).

$$C_x(\gamma) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot \cos(i\beta) \quad (2)$$

$$C_y(\gamma) = \sum_{i=1}^7 b_i \cdot \sin(i\beta), \quad (3)$$

где  $a_i, b_i$  - коэффициенты аппроксимирующих функций. Преимуществом предложенного подхода является как его строгое математическое обоснование, так и возможность дальнейшего расширения величины ряда при включении новых типов судов и объектов морской техники в рассматриваемую базу данных.

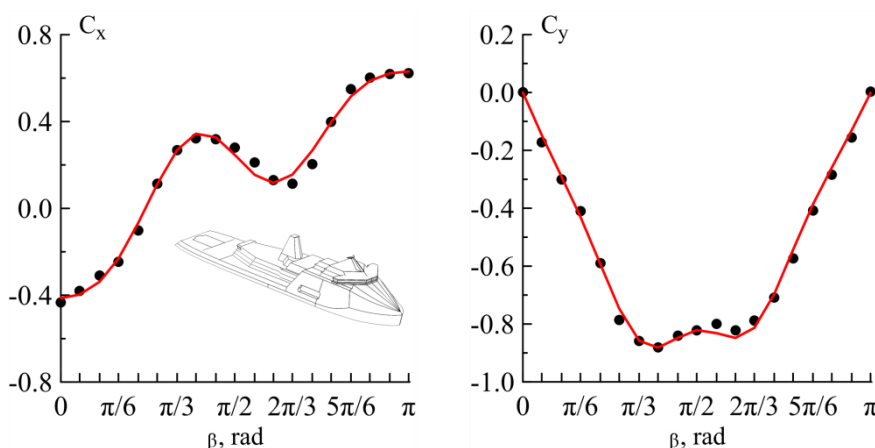


Рисунок 6 – Зависимости аэродинамических коэффициентов ледокола от угла дрейфа: а) коэффициент продольной силы, б) коэффициент поперечной силы

На втором этапе решения задачи осуществлен поиск зависимости коэффициентов аппроксимирующих функций  $a_i, b_i$  от геометрических параметров судна. Для этого данные экспериментальных исследований в ландшафтной аэродинамической трубе обрабатывались с использованием методов множественной линейной регрессии. В качестве основных параметров судна рассматриваются площадь миделя ( $S_m$ ), площадь транца ( $S_{tr}$ ), длина корпуса ( $L$ ), высота корпуса на миделе ( $H_m$ ), высота корпуса в носу ( $H_n$ ), высота корпуса в корме ( $H_k$ ), длина ( $L_n$ ) и ширина надстройки ( $B_n$ ), проекции площади надстройки на диаметральною плоскость ( $S^{nad}_d$ ) и плоскость миделя ( $S^{nad}_m$ ). Использование регрессионных методов основано на предположении о том, что коэффициенты сопротивления судна в целом можно представить в качестве

суммы сопротивления корпуса и надстроек. Это предположение позволяет использовать соотношения (2) для записи сопротивления корпуса и надстройки в виде:

$$C_x = \sum_i a_i \cdot \cos(i\beta) \quad (4)$$

$$C_x = \sum_i \hat{a}_i \cdot \cos(i\beta) \quad (5)$$

Коэффициенты  $a_i$  и  $\hat{a}_i$  являются в общем случае сложными функциями от перечисленных параметров судна  $a_i = F_i(S_m, S_{ir}, L, H_m, H_n, H_k, L_n, B_n, S_{na\delta}_d, S_{na\delta}_m)$ ,  $\hat{a}_i = F_i(S_m, S_{ir}, L, H_m, H_n, H_k, L_n, B_n, S_{na\delta}_d, S_{na\delta}_m)$ . Использование единой формы аппроксимирующей функции для описания  $C_x$ ,  $C_x$  и  $C_x$  позволяет перед каждым слагаемым  $\cos(i\beta)$  сформировать матрицы вида

$$\begin{cases} c_{11}x_1(S_m \dots S_{na\delta}_m) + \dots + c_{N1}x_N(S_m \dots S_{na\delta}_m) = a_{11} \\ \dots \\ c_{1N}x_1(S_m \dots S_{na\delta}_m) + \dots + c_{NN}x_N(S_m \dots S_{na\delta}_m) = a_{1N} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество рассматриваемых судов. Таким образом, для каждого коэффициента при  $\cos(i\beta)$  решается система линейных уравнений. Разработанная математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ. Проведенная верификация позволяет сделать вывод об удовлетворительном согласовании результатов, получаемых посредством разработанной программы для ЭВМ с данными экспериментальных исследований (рисунок 7).

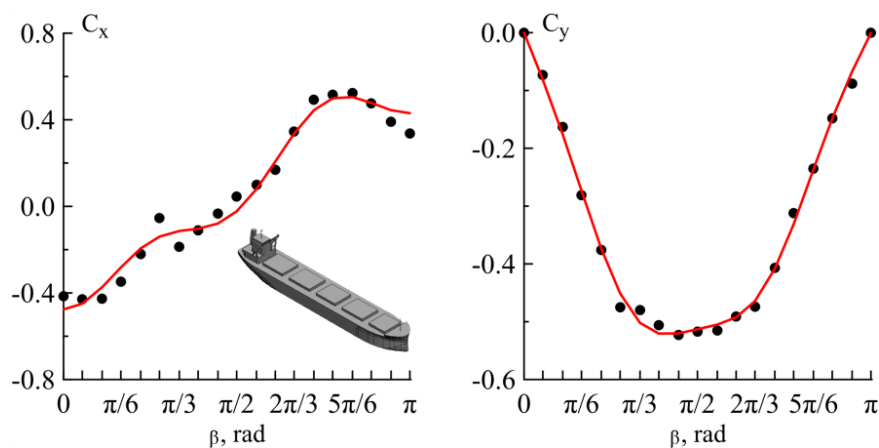


Рисунок 7 – Зависимости аэродинамических коэффициентов балкера от угла дрейфа:  
 а) коэффициент продольной силы, б) коэффициент поперечной силы

Четвертая глава также содержит описание и результаты впервые проведенных подробных исследований влияния ПСА на параметры потока над взлетно-посадочной площадкой судна. Выявлено существенное влияние ПСА на поле скорости, которое заключается в уменьшении интенсивности и размеров отрывных зон вблизи взлетно-посадочной площадки для всех основных направлений ветра. Этот факт связан с тем, что в градиентном турбулентном потоке потеря устойчивости границы зоны отрыва происходит гораздо раньше, точка присоединения отрыва потока также сдвигается вверх по течению. Практически значимым результатом исследований влияния ПСА на ВПП является обоснованное снижение ограничений на использование вертолетной техники на судне. В частности, сопоставление круговых диаграмм для вертолета Ка-32, полученных в равномерном потоке и с учетом ПСА, показывает существенное снижение ограничений на использование вертолета в случае учета воздействия ПСА на судно (рисунок 8).

В последней части главы приводится описание одного из примеров внедрения результатов исследований при выполнении испытаний в обеспечение проектирования ледокола Лидер.

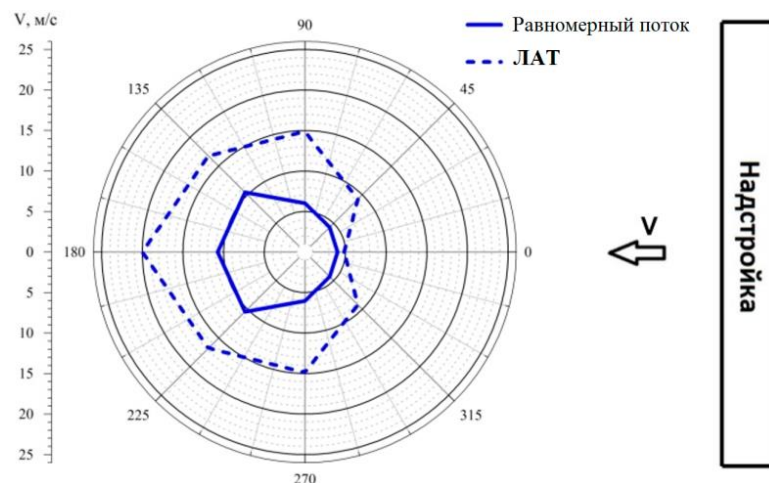


Рисунок 8 – Круговая диаграмма допустимых направлений и значений скорости ветра во время раскрутки винтов вертолета Ка-32

**Пятая глава** посвящена описанию предлагаемого автором метода оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты прибрежной инфраструктуры с учетом влияния развитого рельефа местности и окружающей застройки.

Согласно руководящему документу СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения» при проектировании гидротехнических сооружений воздействие ветра необходимо учитывать в виде поперечной и продольной составляющих аэродинамической силы, для определения которых необходимо использовать поперечную и продольную составляющие скорости ветра на месте строительства. До настоящего времени в подавляющем большинстве случаев, вместо поперечной и продольной составляющих скорости ветра на месте строительства, в том или ином виде, используется среднее значение модуля полного вектора скорости, полученное на ближайшей метеостанции. Данный подход имеет существенные недостатки:

- Штатные метеостанции находятся на значительном удалении (несколько километров и более) от места строительства, на существенно иной высоте, а также имеют отличную от площадки строительства топографию местности.
- Использование среднего значения модуля полного вектора скорости ветра со штатной метеостанции вместо поперечной и продольной



составляющих скорости ветра на месте строительства приводит к серьезному завышению ветровой нагрузки.

- Отсутствует возможность учета пространственно-временной неоднородности поля скорости, созданной сложным рельефом местности, следовательно, невозможно получить ее пульсационное значение и использовать в расчетных моделях.

- Отсутствует возможность проведения сравнительного анализа и выбора оптимального с точки зрения аэродинамики варианта компоновки порта, причальных сооружений, расположения и способов швартовки судов.

Основная суть предлагаемого автором метода состоит в нахождении и использовании для оценки ветровой нагрузки не среднего значения модуля полного вектора с ближайшей метеостанции, а эффективных значений компонент вектора скорости ветра непосредственно для площадки строительства, которые определяются на основе экспериментальных данных модельных исследований в ландшафтной аэродинамической трубе:

$$\left(V_i^{(q,n)}\right)^{\text{эфф}} = \overline{V}_i^{(q,n)} + \sigma_{V_i^{(q,n)}} \cdot \quad (7)$$

$\overline{V}_i^{(q,n)}$  - среднее значение компонент касательной ( $q$ ) и нормальной ( $n$ ) компонент вектора скорости в  $i$ -ой контрольной точки на площадке строительства;  $\sigma_{V_i^{(q,n)}}$  - среднеквадратическое отклонение компонент вектора скорости в  $i$ -ой контрольной точки на площадке строительства. Получение параметров  $\overline{V}_i^{(q,n)}$  и  $\sigma_{V_i^{(q,n)}}$  предусматривает выполнение обработки первичного сигнала с использованием математических методов теории вероятности. В процессе разработки метода автором проведены исследования и анализ, в результате которых определены рекомендации к масштабу модели, размеру области измерения и количеству контрольных точек измерений, определены требования к настройке средств измерений, включая подбор времени и частоты дискретизации сигнала. Разработаны рекомендации по обработке экспериментальных данных.

В качестве примера внедрения разработанного метода рассмотрено решение задачи по определению оптимального варианта расстановки яхт и компоновки причальных сооружений в проектируемой яхтенной марине бухты г. Геленджик. Применение метода включало в себя следующие этапы: проектирование и изготовление модели акватории бухты, окружающей застройки и ландшафта (рисунок 8а); измерение первичного сигнала в модельном эксперименте; обработке сигнала и определении параметров  $\overline{V}_i^{(q,n)}$  и  $\sigma_{V_i^{(q,n)}}$  в 264 контрольных точках на месте строительства яхтенной марины для каждого из 8 основных направлений природного ветра.

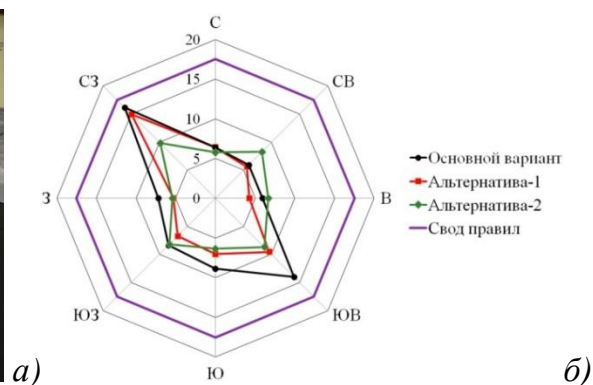
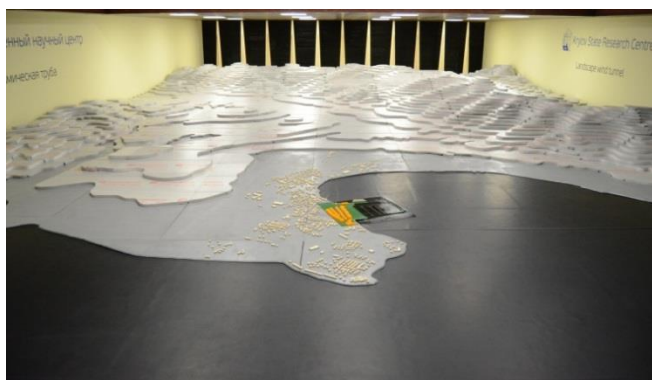


Рисунок 8 – а) модель яхтенной марины и окружающего ландшафта; б) сравнение полных аэродинамических нагрузок [кН] для яхт длиной 20 метров при различных вариантах компоновки

На основе полученных экспериментальных данных рассчитаны ветровые нагрузки на яхты и причальные сооружения для трех вариантов компоновки яхтенной марины (рисунок 8б) и выбран оптимальный вариант. Разница между ветровыми нагрузками, полученными с использованием разработанного метода и нагрузками, полученными с использованием модуля полного вектора с ближайшей метеостанции, достигает 45 % в зависимости от направления природного ветра.

**В шестой главе** приводятся результаты исследований по определению ветровой нагрузки и обеспечению аэродинамической устойчивости морского моста с учетом воздействия морского ПСА.

В 2014 году в России началось проектирование Крымского моста длиной 19 км через Керченский пролив. В месте пересечения моста с Керчь-Еникальским каналом проект предполагал строительство железнодорожной и автодорожной арки длиной 239 метров и высотой 45 метров каждая, которые расположены параллельно друг другу на фарватерных опорах на высоте 35 метров над уровнем моря. Из-за конструктивных, технологических особенностей и месторасположения арок в нескольких километрах от берега возник ряд проблем, связанных с воздействием морского ПСА. Наиболее остро стояли следующие задачи:

- Корректное определение ветровой нагрузки на арки моста в процессе выполнения морской транспортировки от места сборки арок на берегу до фарватерных опор.

- Обеспечение аэродинамической устойчивости автодорожной арки для различных погодных условий и режимов эксплуатации моста.

Для решения первой задачи, в ландшафтной аэродинамической трубе с использованием моделей с высокой детализацией, определены зависимости безразмерных аэродинамических коэффициентов транспортируемых арок от угла дрейфа, которые учитывают физические особенности воздействия морского ПСА. Использование указанных зависимостей в тренажерном комплексе позволило осуществить подбор состава и компоновки буксирного ордера, а также получить важный результат - выявить ограничения на выполнение операции по морской транспортировке. Во время выполнения транспортной операции во избежание аварийной ситуации скорость ветра не должна была превышать 10 м/с. На основе данной рекомендации выбиралось погодное окно для начала операции по транспортировке арок, что позволило успешно осуществить морскую транспортировку обеих арок.

Для решения второй задачи использовались результаты исследования взаимосвязи вихревых структур, возникающих при обтекании пролетных строений мостов различных типов (в том числе и морского моста), с параметрами, характеризующими процессы возникновения и развития

аэродинамической неустойчивости для различных режимов эксплуатации мостов (различные направления ветра, снеговые заносы перильных и барьерных ограждений, различная интенсивность автомобильного трафика). 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 вихревое возбуждение. В частности, при исследовании аэродинамической устойчивости пролетного строения автодорожной арки Крымского моста увеличение эффективной высоты балки жесткости за счет образования снеговых заносов привело к изменению структуры обтекания пролетного строения. Возросла частота срыва вихрей с пролетного строения и их интенсивность, вызвав для отдельных направлений ветра увеличение критической скорости возникновения колебаний на величину до 30%, при этом увеличив амплитуду колебаний пролетного строения автодорожной арки до опасных значений  $\approx 450$  мм.

На основе результатов изучения взаимосвязи вихревых структур, возникающих при обтекании пролетных строений мостов различных типов, с параметрами, характеризующими процесс аэродинамической неустойчивости, предложены новые технические решения для уменьшения амплитуды колебаний. На их основе разработаны конструкции различных аэродинамических гасителей, уменьшающих колебания, вызванные аэроупругой неустойчивостью, а также способствующих снижению знакопеременных ветровых нагрузок. Указанные технические решения в отличие от массовых демпферов относятся к средствам пассивного аэродинамического гашения колебаний, которые способны качественно изменить структуру обтекания пролетного строения и тем самым устранить причину возникновения аэродинамической неустойчивости. Новизна и оригинальность решений подтверждена патентами. В частности, для устранения опасных колебаний пролетного строения автодорожной арки Крымского моста предложено использование аэродинамических гасителей в

виде аэродинамического оребрения или обтекателей. Экспериментальная проверка показала, что за счет одиночного оребрения можно снизить максимальную амплитуду колебаний для отдельных направлений ветра на величину до 50 % по сравнению с исходным вариантом, за счет использования двойного оребрения или обтекателя – до 90 % (рисунок 9а). С учетом дополнительных требований по погонной массе, простоте монтажа и отсутствию необходимости дальнейшего обслуживания гасителей колебаний в проекте использованы обтекатели. Предложенное автором техническое решение использовано на автодорожной арке Крымского моста (рисунок 9б), что позволило предотвратить появление опасных колебаний и обеспечить ее аэродинамическую устойчивость.

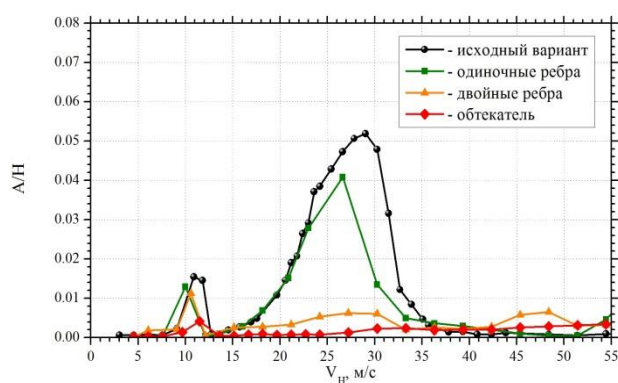


Рисунок 9 – а) зависимость амплитуды колебаний пролетного строения автодорожной арки Крымского моста от скорости ветра; б) монтаж разработанных обтекателей на автодорожную арку Крымского моста

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработаны и обоснованы требования к параметрам ландшафтной аэродинамической трубы, с помощью которой возможно проводить исследования ветрового воздействия на суда и сооружения с использованием крупномасштабных моделей и учетом ПСА.

2. Создана первая в России ландшафтная аэродинамическая труба, технические параметры которой обеспечивают выполнение исследований в области аэродинамики для широкого класса объектов судостроительной, градостроительной и мостостроительной отраслей.

3. Разработана технология моделирования основных характеристик ПСА в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы, основанная на

принципах совместного моделирования по толщине пограничного слоя за счет использования элементов дискретной шероховатости и трапециевидных вихрегенераторов.

4. На основе проведенных исследований 25 судов составлена новая база данных аэродинамических характеристик, которые учитывают физические особенности процесса взаимодействия ПСА с надводной частью судна. Предложены новые алгоритмы и соотношения для аналитической аппроксимации экспериментальных аэродинамических характеристик судов.

5. На основе предложенных алгоритмов аналитической аппроксимации и новой базы данных с применением методов регрессионного анализа разработана математическая модель и реализована в виде программы ЭВМ, которая позволяет получать априорные значения безразмерных аэродинамических коэффициентов судна с учетом ПСА. Проведенная верификация позволяет сделать вывод об удовлетворительном согласовании результатов с данными экспериментальных исследований, достаточном для их использования на ранних стадиях проектирования судов.

6. Впервые экспериментально исследовано влияние ПСА на структуру потока над взлетно-посадочной площадкой судна. В результате исследований установлено уменьшение интенсивности и геометрических размеров отрывных и рециркуляционных зон вблизи взлетно-посадочной площадки для всех основных направлений ветра. Показано, что учет влияния ПСА позволяет снизить ограничения на использование вертолетной техники на судне для всех основных направлений ветрового потока.

7. Предложен и апробирован метод оценки ветровой нагрузки на пришвартованные суда и объекты прибрежной инфраструктуры, расположенные в районах с развитым рельефом местности. В отличие от существующих способов оценки, приведенных в руководящих документах, рассматривается не среднее, а эффективное значение компонент вектора скорости ветра. Предложенный подход позволяет при определении ветровой нагрузки учесть пространственно-временную неоднородность поля скорости, созданную сложным рельефом местности, а также получить ее пульсационное значение для использования в расчетных моделях.

8. На основе изученной взаимосвязи вихревых структур, возникающих при обтекании пролетного строения морского моста с параметрами, характеризующими процесс аэродинамической неустойчивости, предложены новые технические решения, на основе которых разработаны конструкции различных аэродинамических гасителей, уменьшающих колебания, вызванные аэроупругой неустойчивостью, а также способствующих снижению знакопеременных ветровых нагрузок. Новизна и оригинальность решений подтверждена патентами.

9. Результаты диссертационной работы получили широкое внедрение и использованы при проектировании 52 судов и сооружений различных типов. Разработанная ландшафтная аэродинамическая труба и технология моделирования основных характеристик ПСА внедрены и используются в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» для проведения научных исследований.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в:**

##### **Монография:**

1. Соловьев С.Ю. Аэродинамика судов и морских сооружений. Разработка методов исследования с учетом пограничного слоя атмосферы. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – с. 216

##### **Статьи в рецензируемых изданиях и международных базах данных Web of Science и Scopus:**

2. Solovev S.Y., Modeling of the mean wind loads on structures / Khrapunov E.F. // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 04. Pages 42-51.

3. Solovev S.Yu. Landscape wind tunnel Krylov State Research Centre / Pustoshny A.V. // Marine Intellectual Technologies. – 2018. – № 3 (41). Vol.1. – Pages. 69-75.

4. Solovev S.Yu. Ensuring the aerodynamic stability of the long-span bridges through studies in the wind tunnel / Khrapunov E.F. // MATEC Web of Conferences 245, article № 02001. – 2018.

5. Solovev S.Yu. Investigation of long-span bridge stability in wind tunnel / Sokolov V.V., Novikov A.N. // 40-th IABSE Symposium in Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures. – 2018. – Pages. 34-58.
6. Solovev S.Yu. Advantages of modeling ABL properties to determine wind loads on structures / Khrapunov E.F. // MATEC Web of Conferences 245, article № 09007. – 2018.
7. Solovev S.Yu. «Aerodynamics challenges and solutions for structures of unique architecture». 39-th IABSE Symposium in Vancouver 2017: Engineering the Future. – 2017. Pages. 1569-1575.
8. Solovev S.Yu. Experimental Investigation of Aerodynamic Characteristics of the Above-Water Parts of Offshore Platforms / Sokolov V.V. // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. – 2015. – Pages. 27-30.
9. Solovev S.Yu. Vortex interaction engineering structures / Guzeev A.S. // Scientific Visualization Vol. 7, № 3. – 2015. – Pages. 25-29.
10. Соловьев С.Ю. Определение ветровой нагрузки на сооружения с использованием руководящих документов и физического эксперимента // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2019 (принято в печать)
11. Соловьев С.Ю. Ландшафтная аэродинамическая труба: технические особенности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 2(388). - С. 85-94.
12. Соловьев С.Ю. Моделирование энергетических характеристик пограничного слоя атмосферы / Храпунов Е.Ф. // Вестник СПбГУ Математика. Механика. Астрономия. – 2018. – Т.5. № 4. – С. 689-700.
13. Соловьев С.Ю. Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 5 (66). – С. 38-41.
14. Соловьев С.Ю. Об одном из методов определения числа Струхаля при обтекании контуров с фиксированными точками отрыва потока / Гузеев А.С., Короткин А.И. // Морской вестник. – 2012. – № 2. – С. 97-100.
15. Соловьев С.Ю. Распространение вихревых систем, возникающих на корпусе судна и его элементах / Воробьев А.В., Гузеев А.С. // Морской вестник № 4 (40). – СПб. 2011. – С. 82-85.



## **Патенты:**

16. Соловьев С.Ю. Устройство для формирования градиента скорости воздушного потока: пат. 2650429 Рос. Федерация: МПК G01M9/04 / Соколов В.В., Новиков А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Крыловский государственный научный центр". – № 2017102138; заявл. 23.01.17; опубл. 13.04.18, Бюл. № 11.

17. Соловьев С.Ю. Устройство для уменьшения колебаний мостовой конструкции, вызванных ветром: пат. 177392 Рос. Федерация: МПК E01D1/00, E01D19/00 / Гузеев А.С., Соколов В.В., Новиков А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Крыловский государственный научный центр". – № 2017127393; заявл. 31.07.17; опубл. 20.02.18, Бюл. № 5.

18. Соловьев С.Ю. Устройство для моделирования характеристик натуральных вант в упругоподобных моделях мостов: пат. 180016 Рос. Федерация: МПК E01D11/00, G01M9/00 / Соколов В.В., Корнилов Д.В., Можайский С.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Крыловский государственный научный центр". – № 2017146894; заявл. 28.12.17; опубл. 30.05.18, Бюл. № 16.

19. Соловьев С.Ю. Устройство для снижения поперечных колебаний пролетного строения мостов, вызванных ветровым воздействием: пат. 2500852 Рос. Федерация: МПК E01D1/00 / Гузеев А.С., Короткин А.И., Пашин В.М., Пустошный А.В., Роговой Ю.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Крыловский государственный научный центр". – № 2011141140; заявл. 11.10.11; опубл. 10.12.13, Бюл. №1.

## **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

20. Соловьев С.Ю. Программа аппроксимации экспериментально определенных аэродинамических характеристик судов с последующим вычислением аэродинамических характеристик для судов схожей формы / Е.Ф. Храпунов. – №2020660437; заявка 2020619194; регистр. 03.09.2020.

21. Соловьев С.Ю. Программа восстановления поля температуры на основании экспериментально определяемого поля скорости / Е.Ф. Храпунов. – №2020660161; заявка 2020619325; регистр. 28.08.2020.

### **Статьи, опубликованные в других изданиях:**

22. Solovev S.Yu. Improving the Aerodynamic Stability of Bridges. Wind Tunnel Tests / Khrapunov E.F. // Proc. of ARCH 2019. – vol. 11 – pp 509-515
23. Соловьев С.Ю. Влияние пограничного слоя атмосферы на поле скоростей над взлетно-посадочной площадкой схематизированного судна // Труды конференции «Научно-техническое развитие судостроения». – СПб.: 2019. – С. 56.
24. Соловьев С.Ю. Расчетно-экспериментальные исследования в обеспечение проектирования и безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений / Магаровский В.В., Кузнецов А.А., Курчуков К.В. // Гидротехника. – 2017. – № 2. – С. 27-31.
25. Соловьев С.Ю. Определение аэродинамической устойчивости уникальных мостов // Дороги. Инновации в строительстве. – 2017. – № 64. – С. 30-36.
26. Соловьев С.Ю. Выполнение экспериментального и математического моделирования в обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений / Магаровский В.В., Кузнецов А.А., Курчуков К.В. // Тезисы докладов XI научно-технической конференции «Гидроэнергетика, гидротехника. Новые разработки и технологии – 2017». – 2017. – С. 160.
27. Соловьев С.Ю. Взаимодействие вихревых систем при обтекании тел / Гузеев А.С.; Короткин А.И. // Труды 13-й Азиатский симпозиум по визуализации (ASV-13). – Новосибирск. 2015.
28. Соловьев С.Ю. Вихревое взаимодействие инженерных конструкций / Гузеев А.С. // Труды XIII международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». – М.: НИУ МЭИ. 2015. – С. 374-377.
29. Соловьев С.Ю. Аэродинамические испытания высотных зданий и сооружений / Гузеев А.С., Корнилов Д.В., Короткин А.И. // Высотные здания. – 2015. – № 1. – С. 102-105.
30. Solovev S.Yu. Krylov's tunnel vision // The Naval Architect. September. – 2015. – Pages. 80-82.

31. Соловьев С.Ю. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик упругоподобной модели мачты / Гузеев А.С., Соколов В.В. // Труды III научно-технической конференции «Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы». – М. 2015. – С. 15-16.
32. Соловьев С.Ю. Новые возможности в исследовании аэродинамики морских объектов // Оборонно-промышленный потенциал. 2015. – № 2. – С. 40-42.
33. Соловьев С.Ю. Разработка способов уменьшения аэроупругих колебаний элементов мостовых сооружений / Гузеев А.С., Соколов В.В. // Седьмые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной научной конференции по механике. – М.: Издатель И.В. Балабанов. 2015. – С. 96.
34. Solovev S.Yu. Hydrodynamic parameters of circular cylinder in proximity to solid boundary / Korotkin A.I., Rogovoy Yu.A., Tokarev O.K. // International Conference on Subsea Technologies. SubSeaTECH2014. – 2014.
35. Solovev S.Yu. Wind flowing around buildings and bridges / Guzeev A.S., Korotkin A.I. // 10-th International Conference on Hydrodynamics. – 2012.