

*На правах рукописи*



Дарчиев Георгий Константинович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ  
ЛЕДОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ С УЛУЧШЕННЫМИ  
КАВИТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ  
В СВОБОДНОЙ ВОДЕ**

Специальность: 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена во 2 отделении Федерального государственного унитарного предприятия «Крыловский государственный научный центр».

Научный руководитель: **Пустошный Александр Владимирович,**  
доктор технических наук, член корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник–консультант ФГУП  
«Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты: **Андрюшин Александр Владиславович,**  
доктор технических наук, начальник лаборатории  
пропульсивных комплексов судов АО «Центральный  
научно-исследовательский институт морского флота»

**Тогуняц Анатолий Радиславович,**  
кандидат технических наук, инженер АО «Научно-  
производственное предприятие «Морская техника»

Ведущая организация: АО «Центральное морское конструкторское бюро  
«Алмаз»

Защита состоится «01» октября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 411.004.02 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 411.004.02  
кандидат технических наук, доцент

О.В. Малышев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

В последние годы для круглогодичной транспортировки ресурсов из Арктики в страны Европы и Азии строятся крупнотоннажные суда высоких ледовых классов. Их маршруты включают сотни миль во льдах и тысячи миль в открытой воде, свободной ото льда. Поэтому их движители должны удовлетворять требованиям, выдвигаемым как для гребных винтов транспортных судов, работающих в открытой воде (высокий КПД и кавитационные характеристики, определяющие вибрацию на судне), так и для ледовых винтов (обеспечение упора вблизи швартового режима, прочность при контактах со льдом). Необходимость одновременно и в равной степени учитывать обе эти группы требований значительно усложнило процесс проектирования.

Важной составной частью отечественной технологии проектирования гребных винтов являются испытания моделей в опытовых бассейнах и кавитационных трубах. До настоящего времени модельный эксперимент обеспечивает проверку и прогнозирование пропульсивных и кавитационных характеристик с точностью, превышающей точность компьютерных расчетов. Однако из-за наличия масштабного эффекта невозможно добиться полного соответствия модельных и натуральных данных.

Ряд обстоятельств указывает на необходимость корректировки отечественного методического подхода. В конце XX века проведенный в России цикл натуральных наблюдений за кавитацией гребных винтов показал отличия в преобладающих формах кавитации на лопастях – на модели наблюдался только концевой вихрь, в натуральных условиях – только кромочная кавитация. Тогда проблема не была решена.

Особенно обострился вопрос при работе по проектированию ледовых гребных винтов транспортных судов арктического плавания. Сопоставительные кавитационные испытания, проводившиеся одновременно в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) на гладких моделях и в ряде зарубежных

центров при наличии в качестве искусственного турбулизатора шероховатости, показали принципиальное различие результатов. Натурные наблюдения кавитации показали третий результат, но размер кавитации был ближе к картине кавитации на шероховатых моделях.

Таким образом, стала крайне актуальной потребность провести научный анализ существующих в мире методик испытаний моделей гребных винтов, включая, в частности, вопросы применения искусственной шероховатости, и предложить корректировку отечественных методик модельных испытаний для качественного улучшения прогнозирования кавитационных процессов в натуральных условиях, а также модификации технологии проектирования гребных винтов с учетом откорректированных методик эксперимента. Этой работе посвящена настоящая диссертация. В свете указанных обстоятельств, связанных с разработкой ледовых гребных винтов для новых арктических транспортных судов, данная тема является актуальной.

### **Степень разработанности темы**

Теоретические основы практического проектирования гребных винтов в России заложены в работах А.М. Басина, И.Я. Миниовича, А.А. Русецкого. С появлением компьютерной техники методы и программы расчета винтов, основанные на вихревой теории, были разработаны В.Г. Мишкевичем, Н.Ю. Завадовским, позже методики и программы проектирования гребных винтов, основанные на панельных методах, развиты А.Ш. Ачкинадзе и В.И. Красильниковым. Эти программы до настоящего времени являются основой применяемых в России технологий проектирования гребных винтов. Расчеты винтов по программам, реализующим RANS методы, активно развивались в работах М.П. Лобачева и А.Е. Таранова.

Методики испытаний моделей гребных винтов в кавитационной трубе, входящие составной частью в технологии проектирования гребных винтов, разрабатывались специалистами КГНЦ. Впервые в современном виде эти методики

описаны А.С. Горшковым, А.А. Русецким и В.О. Борусевичем.

Методики применения шероховатости для турбулизации при испытаниях моделей гребных винтов разработаны и описаны в работах Куипера применительно к кавитационному бассейну голландского исследовательского центра MARIN.

Вопросы улучшения кавитационных характеристик винтовых профилей с использованием аппарата потенциальных и вихревых течений рассматривались в работах К.В. Александра и Е.Я. Семионичевой.

Все указанные выше разработки проводились применительно к хорошо обтекаемым гидродинамическим профилям сечений лопастей. Вопрос развития частичной кавитации на ледовых гребных винтах с ледовыми профилями до настоящего времени не обследовался. Также в отечественной практике не обследовался вопрос о влиянии искусственной шероховатости на начальные стадии кавитации.

### **Цели и задачи**

Целью настоящей работы является получение комплекса материалов для оценки целесообразности применения искусственной шероховатости при модельных испытаниях гребных винтов, разработка скорректированной методики испытаний моделей гребных винтов с искусственной шероховатостью входящей кромки, а также разработка технологии проектирования гребных с улучшенными кавитационными характеристиками на режиме движения в свободной воде.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ методик, применяемых в различных исследовательских центрах мира при изучении кавитации и оценка (на базе сопоставления полученных результатов с данными как натуральных испытаний, так и модельных испытаний в зарубежных исследовательских центрах), целесообразности их применения в отечественной практике проектирования гребных винтов;
- экспериментальная проверка влияния искусственной шероховатости входящей кромки на течение при ламинарном обтекании ледовых и не ледовых профилей,

применяемых при проектировании гребных винтов;

- экспериментальная проверка на моделях ледовых и не ледовых гребных винтов влияния размера полоски искусственной шероховатости входящей кромки и высоты элементов шероховатости на кавитационные характеристики и выбор характеристик шероховатости для использования на отечественных установках;
- обоснование целесообразности применения искусственной шероховатости входящей кромки при прогнозировании характеристик натуральных гребных винтов и при их проектировании с учетом оптимизации кавитационных характеристик;
- разработка скорректированной методики кавитационных испытаний моделей гребных винтов с использованием искусственной шероховатости входящей кромки для отечественных кавитационных труб;
- разработка метода расчетного проектирования лопастей с улучшенными кавитационными качествами при применении контроля в ходе модельных испытаний лопастей с искусственной шероховатостью входящей кромки и без нее;
- разработка технологии проектирования гребных винтов с учетом результатов испытаний моделей с искусственной шероховатостью входящей кромки.

### **Научная новизна**

1. Впервые получены результаты оценки влияния искусственной шероховатости входящей кромки при модельных испытаниях ледовых профилей и гребных винтов.
2. Разработан новый метод проектирования профилей цилиндрических сечений лопастей с учетом режимов работы гребного винта в неоднородном поле скоростей в диске гребного винта.
3. Разработана технология проектирования ледовых гребных винтов транспортных судов с не единой профилировкой с улучшенными кавитационными характеристиками на режимах движения в свободной воде.

## **Методы исследования**

В диссертации для изучения влияния искусственной шероховатости входящей кромки на характеристики гребных винтов и профилей применялись экспериментальные методы исследования.

Расчетными методами исследовались режимы работы лопастей в неоднородном поле скоростей по программам, реализующим панельные методы вихревой теории винта. Также с помощью компьютерных расчетов выполнялось проектирование профилей с улучшенными кавитационными характеристиками (в программном комплексе Star-CCM+) и проектирование лопастей с использованием указанных спроектированных профилей с не единой геометрией по радиусу гребного винта.

## **Практическая ценность работы**

Разработанные методики и технология, научные подходы и полученные результаты исследований позволяют обоснованно осуществлять проектирование ледовых гребных винтов транспортных судов с улучшенными кавитационными характеристиками на ходовых режимах в чистой воде и осуществлять модельную проверку их кавитационных характеристик для режимов частичной кавитации.

Результаты диссертационного исследования были использованы в рамках государственных контрактов № 16411.1810190019.09.016 от 14 ноября 2016 г и № 17411.1810990019.09.001 от 14 августа 2017 г.

## **Положения, выносимые на защиту**

- результаты исследования влияния искусственной шероховатости входящей кромки на обтекание ледовых винтовых профилей и кавитацию гребных винтов;
- технология проектирования ледовых гребных винтов с улучшенными кавитационными характеристиками на режимах движения в свободной воде включающая:
  - корректированную методику кавитационных испытаний моделей гребных винтов с искусственной шероховатостью входящей кромки;

- метод расчетного проектирования профилей гребных винтов, в том числе ледовых, с улучшенными характеристиками по частичной кавитации.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Результаты исследований кавитационных характеристик моделей гребных винтов с искусственной шероховатостью сопоставлялись с данными испытаний в ведущих судостроительных исследовательских центрах мира в Нидерландах и Швеции, а также с результатами натуральных наблюдений кавитации.

Результаты работы докладывались на 5-й Международной конференции по движителям SMP'17 (Эспоо, Финляндия, 2017 год).

Основные разделы диссертационной работы опубликованы в двух статьях в журнале «Труды Крыловского государственного научного центра», который включен в перечень ВАК, доля автора в работах составляет 40 % и 30 %, а также в одной статье в журнале «Морские интеллектуальные технологии», включенном в реферативную базу данных Web of Science (доля автора 50 %).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 94 наименований. Работа содержит 131 страницу основного текста, включая 18 таблиц и 65 рисунков.

### **Содержание работы**

**Во введении** указаны цели и задачи диссертационного исследования, их актуальность, структура работы, объект исследования, методы решения задачи, практическая ценность работы и достоверность результатов исследования.

**В первой главе** проведен анализ методик кавитационных испытаний моделей гребных винтов, применяемых в России и за рубежом.

Также в главе приведен анализ результатов кавитационных испытаний гребного винта, спроектированного в КГНЦ, полученных в кавитационной трубе КГНЦ и с искусственной шероховатостью в двух европейских центрах, а также сопоставление с результатами наблюдений кавитации на натурном гребном винте.

Результаты на рисунке 1 соответствуют следующим испытаниям:

А) контур максимальной каверны в положении лопасти «12 часов» при испытаниях модели за корпусом в кавитационной трубе при полном покрытии модели шероховатой краской; зарегистрирована каверна практически на всех радиусах, максимальная длина близка к половине длины хорды, имеет место концевой вихрь;

Б) контур максимальной каверны в положении лопасти «12 часов», полученной в кавитационном бассейне за корпусом при установке полосы шероховатости на лопасти; каверна начинается с радиуса 0.6 и распространяется до концевых радиусов, максимальная длина составляет ~50 % длины хорды; имеет место концевой вихрь;

В) вид кавитации при испытаниях в кавитационной трубе КГНЦ без применения шероховатости на поступи, соответствующей мгновенной поступи лопасти в положении «12 часов» в натурном поле скоростей; кромочная кавитация практически отсутствует, имеет место сильный концевой вихрь, начинающийся с  $r/R = 0.7$ ;

Г) вид кавитации в натуральных условиях в положении лопасти около «12 часов»; кромочная кавитация имеет место на радиусах 0.6 – 1.0, ее максимальная длина составляет 60 % от длины хорды, примерно на радиусе 0.7 из кромочной пленки формируется сильный поток пузырьков.

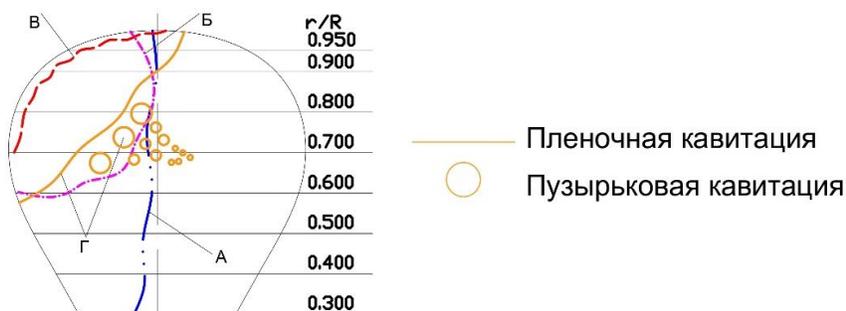


Рисунок 1 – Сравнение картин кавитации: А – испытание с применением шероховатой краски; Б – испытание с применением полосы шероховатости у входящей кромки; В – результаты испытаний в средней кавитационной трубе КГНЦ; Г – картина кавитации при натуральных испытаниях

Представленные материалы позволили сделать вывод о том, что испытания с полоской шероховатости входящей кромки (Б) позволяют прогнозировать картины кавитации, близкие по размеру каверн к натурным условиям, хотя и отличающиеся по форме кавитации (натурная кавитация характеризовалась наличием мощного потока пузырьков, образующихся за каверной и сносимых вдоль лопасти, чего не было зафиксировано при испытаниях модели с полоской шероховатости). Поскольку в отечественной практике испытания проводятся без применения шероховатости, был сделан вывод о необходимости корректировки отечественной методики, дополнив ее испытаниями с искусственной шероховатостью, позволяющими прогнозировать размеры развитой частичной кавитации на различных режимах хода судов.

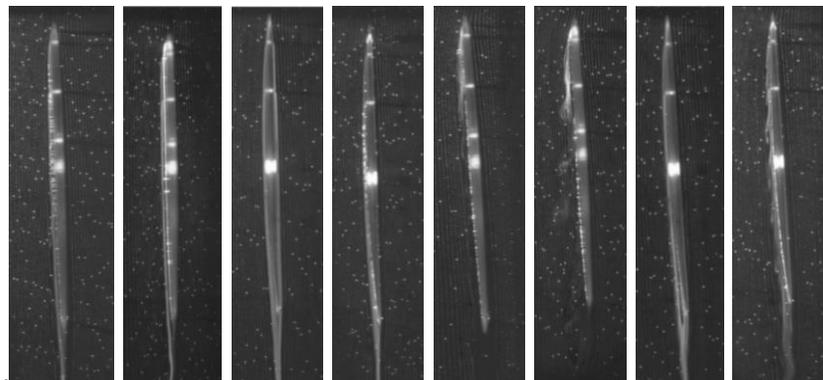
**Во второй главе** представлен анализ опубликованных данных о методах искусственной турбулизации потока на лопастях моделей для снижения масштабного эффекта. Несмотря на разнообразие методов турбулизации, применение искусственной шероховатости имеет место в практике крайне ограниченного числа зарубежных лабораторий. При этом технологии включают установку полоски шероховатости входящей кромки или покраску лопастей шероховатой краской.

Влияние искусственной шероховатости входящей кромки на ламинарный поток изучено в ходе экспериментов по визуализации обтекания как ледовых (профиля ИК82), так и хорошо обтекаемых гидродинамических профилей типа NASA 66-mod, применение которых характерно для не ледовых гребных винтов. Результаты испытаний, представленные на рисунке 2, позволили сделать важные выводы относительно работы искусственной шероховатости, в частности:

1. Для профилей типа NASA 66-mod наличие искусственной шероховатости входящей кромки не вносит существенного изменения в структуру потока.
2. Влияние шероховатости на поток вблизи входящей кромки ледовых

профилей при малых углах атаки также невелико и сводится к турбулизации потока.

3. При больших углах атаки, характерных для работы гребного винта в существенно неоднородном потоке, применение шероховатости приводит различному влиянию: если для *NACA 66-mod* характер потока изменяется с образованием более крупных вихревых структур в турбулизированном пограничном слое, то для ледовых профилей при наличии шероховатости проявляются крупные отрывные структуры, которые могут существенно исказить результаты кавитационных испытаний. В этом случае полоска шероховатости играет роль не столько турбулизатора, сколько интерцептора, способствующего отрыву потока.



(1А) (2А) (1Б) (2Б) (1В) (2В) (1Г) (2Г)

Рисунок 2 – Результаты испытания профилей  $r/R = 0.9$ ;

(1А), (2А) – ледовый профиль (угол атаки  $2^\circ$ ) с шероховатостью входящей кромки и без нее; (1Б), (2Б) – профиль *NACA 66-mod* (угол атаки  $2^\circ$ ) с шероховатостью входящей кромки и без нее; (1В), (2В) – ледовый профиль (угол атаки  $4^\circ$ ) с шероховатостью входящей кромки и без нее; (1Г), (2Г) – профиль *NACA 66-mod* (угол атаки  $4^\circ$ ) с шероховатостью входящей кромки и без нее

Таким образом, эффект использования шероховатости существенно зависит от конфигурации профиля и угла атаки, что вызывает необходимость осторожно подходить к ее применению на ледовых гребных винтах. Проведенный эксперимент позволяет объяснить картины кавитации, полученные на различных установках для среднего гребного винта арктического транспортного судна, работающего в существенно неоднородном поле скоростей.

**В третьей главе** приводятся результаты испытаний с применением искусственной шероховатости входящей кромки моделей гребных винтов двух типов:

- модель ледового гребного винта транспортного судна с симметричным контуром лопасти и ледовыми профилями;

- модель гребного винта, характерного для быстроходных транспортных судов с саблевидным контуром и профилями сечений лопастей *NACA 66-mod*.

Изначально для изучения влияния шероховатости на поток были выполнены испытания методом красок двух моделей гребных винтов, описанных выше. Испытания проводились с шероховатостью 3 мкм на полоске длиной 2.5 % от длины хорды и с шероховатостью 30 мкм на полосках длиной 2.5 % и 3.5 %.

На рисунке 3, в качестве примера показаны результаты визуализации потока методом красок на лопастях модели ледового гребного винта.



Рисунок 3 – Линии тока на лопасти модели ледового гребного винта: без применения шероховатости входящей кромки (1А – засасывающая, 1Б – нагнетающая сторона); шероховатость 30 мкм, длина области 2.5 % (2А – засасывающая, 2Б – нагнетающая сторона)

Испытания ледового гребного винта показали, что с нагнетающей стороны образуется явно выраженный ламинарно-турбулентный переход. С засасывающей стороны – небольшие участки ламинарного течения в области корневых сечений. Шероховатость 3 мкм не позволяет полностью турбулизовать поток с нагнетающей стороны. При высоте турбулизатора 30 мкм весь поток становится турбулентным.

Испытания гребного винта быстроходного судна показали, что с нагнетающей стороны ламинарные участки наблюдаются до  $r/R \leq 0.7$ . При шероховатости 3 мкм остались ламинарные участки на внутренних радиусах. Шероховатость 30 мкм полностью устраняет участки с ламинарным течением. Увеличение полосы шероховатости до 3.5 % приводит к возникновению вихря на конце лопасти.

Таким образом наиболее оптимальными являются частицы, создающие шероховатость величиной 30 мкм на полоске длиной 2.5 %.

Гидродинамические испытания проводились в опытовом бассейне КГНЦ с шероховатостью 3 мкм при плотности заполнения 100 %, а также с шероховатостью 30 мкм при двух вариантах плотности заполнения – 50 % и 100 %.

Результаты испытаний показали, что шероховатость оказывает влияние как на коэффициент упора, так и (в существенно большей степени) на коэффициент момента, что приводит к падению КПД. Влияние определяется не только калибром шероховатости, но и плотностью заполнения. В соответствии с рекомендациями, разработанными MARIN с тем, чтобы максимально унифицировать применяемые параметры шероховатости с зарубежной практикой, рекомендовано в дальнейшем обеспечивать плотность заполнения полоски шероховатости корундом около 50 %.

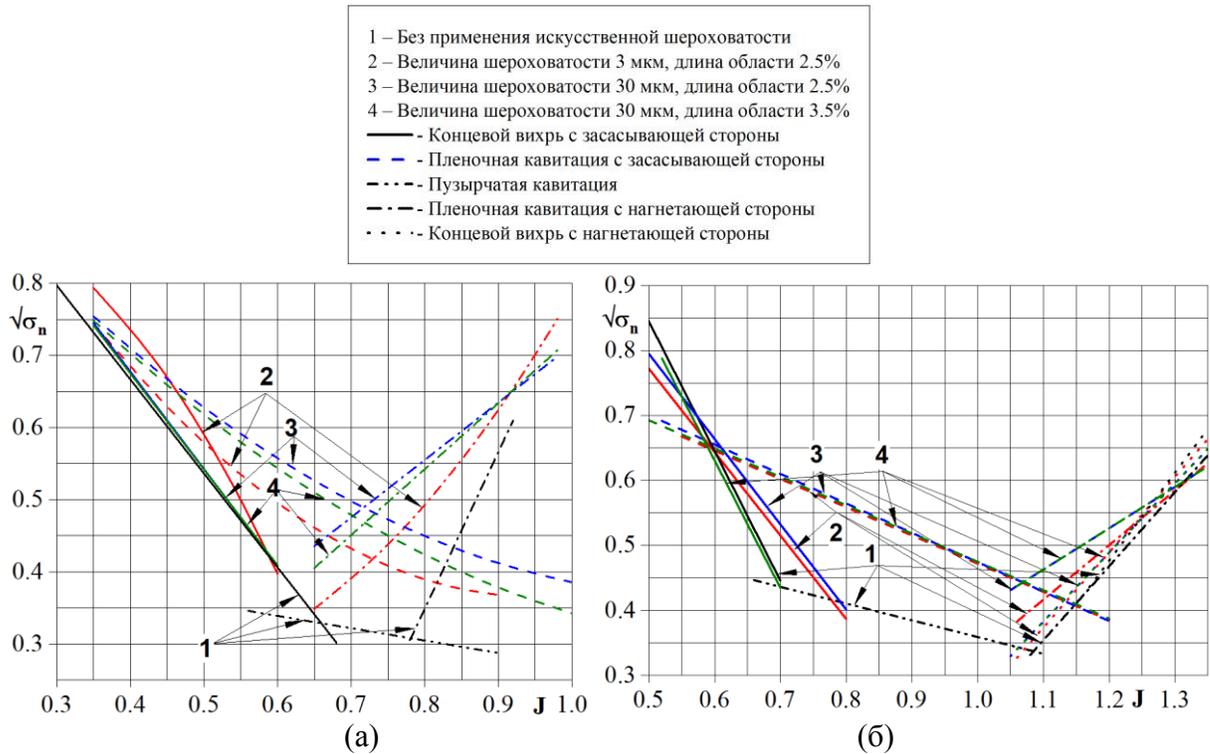
Результаты испытаний и основанный на них прогноз гидродинамических характеристик натуральных гребных винтов, будет зависеть от характеристик искусственной шероховатости. Таким образом, применение искусственной шероховатости при гидродинамических испытаниях не может быть рекомендовано.

Кавитационные испытания проходили без нанесения корундовых частиц на входящую кромку, с нанесением корундовых частиц размером 3 мкм на область 2.5 % длины хорды и 30 мкм на область 2.5 % и 3.5 % длины хорды.

Полученные кавитационные диаграммы и фото кавитации для гребного винта ледового и быстроходного судна представлены на рисунках 4 и 5.

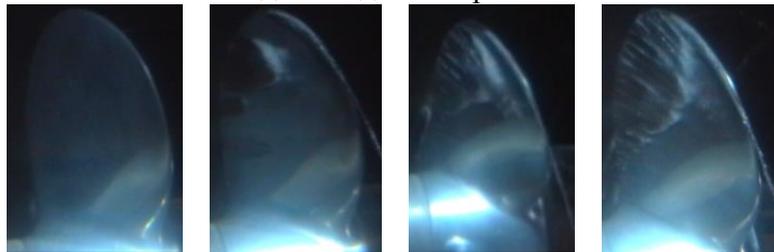
Как видно из диаграмм, левая ветвь кавитационных корзин, соответствующая кавитации засасывающей стороны лопасти, для обоих гребных винтов при наличии шероховатости существенно отличается от левой ветви, полученной при испытаниях без шероховатости. Если левая ветвь гладких винтов характеризует начало кавитации концевого вихря с засасывающей стороны, то левая ветвь гребного винта с шероховатостью соответствует, в традиционных терминах, возникновению «пленочной» кавитации. Также стоит отметить, что форма полученной каверны на

модели ледового гребного винта близка к полученной при натуральных испытаниях, описанных в первой главе.



Рисунков 4 – Результаты квазиакустических испытаний с различными вариантами искусственной шероховатости входящей кромки: (а) – модель ледового гребного винта; (б) – модель гребного винта быстроходного судна

Модель ледового гребного винта



(а1) (б1) (в1) (г1)

Модель гребного винта быстроходного судна



(а2) (б2) (в2) (г2)

Рисунок 5 – Кавитация на лопастях моделей гребного винта при  $J = 0,512$   $\sqrt{\sigma_n} = 0,409$ .  
 (а1), (а2) – без шероховатости; (б1), (б2) – с шероховатостью 3 мкм, длина области 2.5 %; (в1), (в2) – с шероховатостью  $\mu = 30$  мкм, длина области 2.5 %; (г1), (г2) – с шероховатостью  $\mu=30$  мкм, длина области 3.5 %

В ходе испытаний отмечено, что шероховатость 30 мкм вне зависимости от размеров полосы приводит к примерно одинаковой. Это подтверждает, что такой размер шероховатости является достаточно универсальным и может быть рекомендован для использования в ходе кавитационных испытаний.

Таким образом, изучение кавитации при наличии шероховатости дает важную информацию о возможной картине развитой частичной кавитации на лопастях.

Анализ результатов проведенных испытаний позволяет рекомендовать испытания с искусственной шероховатостью входящей кромки как дополнительные к испытаниям гладких винтов и направленные на изучение развитой частичной кавитации на ходовых режимах. Рекомендованная высота шероховатости – 30 мкм на полоске 2.5 % от длины хорды. Результат таких испытаний, характеризующих кавитационные качества гребного винта – левая ветвь кавитационной диаграммы «кавитации за шероховатостью». Далее эта ветвь должна быть сопоставлена с

зависимостью мгновенной поступи лопасти ( $J = \frac{J_V \cdot \bar{V}_x(\bar{r}, \theta)}{1 - \frac{J_V \cdot \bar{V}_t(\bar{r}, \theta)}{\pi \cdot \bar{r}}}$ , где  $\bar{V}_x(\bar{r}, \theta)$  и  $J_V \cdot \bar{V}_t(\bar{r}, \theta)$  – осевая и тангенциальная компоненты поля скоростей в диске гребного винта для каждого положении лопасти) и числа кавитации ( $\sigma_n = \frac{P - P_V}{\rho \cdot (\pi \cdot n \cdot D_P)^2}$ ) для различных

положений лопасти при вращении гребного винта, как это показано на рисунке 6.

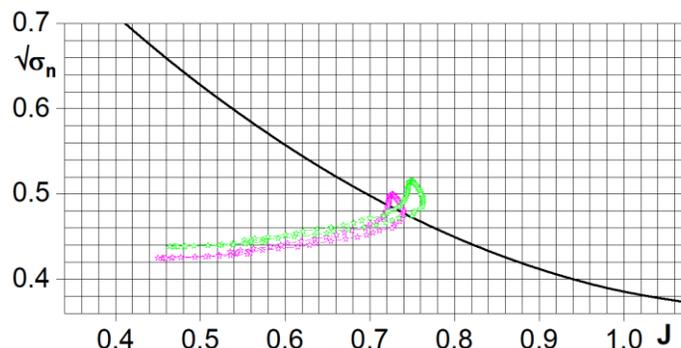


Рисунок 6 – Пленочная кавитация за шероховатостью для ледового гребного винта

Испытания по этой методике позволяют сопоставить гребные винты по кромочной кавитации с засасывающей стороны и, следовательно, при проектировании выбрать, какой из вариантов лучше с точки зрения развитой

частичной кавитации на ходовом режиме.

Таким образом, для отечественной практики выявлена целесообразность дополнить методику «квазиакустических» кавитационных испытаний обязательными испытаниями гребных винтов с искусственной шероховатостью входящей кромки.

**В четвертой главе** разработана технология проектирования гребных винтов с улучшенными характеристиками по развитой кавитации на ходовых режимах.

Существует два традиционных способа борьбы с кавитацией при проектировании гребных винтов:

- 1) Увеличение дискового отношения и, как следствие, возможность уменьшения толщины сечений при сохранении прочности лопасти за счет сохранения отношения квадрата толщины к длине хорды.
- 2) Изменение шага и кривизны, которое позволяет обеспечить положение кавитационной «корзины» более точно относительно диапазона изменения мгновенной поступи за оборот.

Эти два способа были заложены при проектировании гребного винта № 2 (за модель гребного винта № 1 принята модель ледового гребного винта, описанная в предыдущих главах). Гребной винт № 2 был спроектирован так, чтобы обеспечить упор, равный упору гребного винта № 1 на спецификационных режимах. Результаты кавитационных испытаний представлены на рисунке 7.

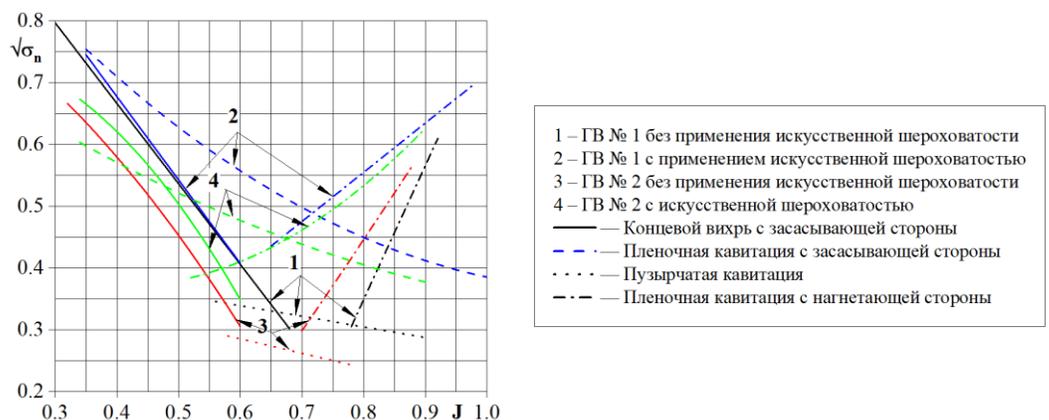


Рисунок 7 – Результаты кавитационных испытаний моделей гребных винтов № 1 и № 2 с применения искусственной шероховатости входящей кромки и без нее

Как видно из рисунка, традиционные подходы позволяют обеспечить запас по кавитации с засасывающей стороны. Однако, как показали гидродинамические испытания, данный подход приводит к снижению КПД в районе ходового режима на ~4 %. Такое падение КПД является недопустимым.

Однако в 80-х годах XX века появился ряд работ, в которых рассматривалась возможность оптимизации профиля для снижения кавитации путем изменения кривизны в области входящей кромки, снизив углы натекания потока. Принципиально важным при таком методе является обеспечение точного соответствия направления носика профиля и натекающего потока на заданном режиме.

Решение данной задачи компьютерными методами должно включать определение углов атаки профиля в составе лопасти с учетом неоднородного поля скоростей в диске винта и последующий оптимизационный расчет профилей.

Данный подход позволяет уйти от понятия «стандартная» профилировка и разрабатывать улучшенные профили для каждого проекта гребного винта.

Работа по развитию метода проводилась для гребного винта с основными геометрическими элементами ледового гребного винта №1.

Разработанный метод проектирования лопастей предусматривал следующее.

На первой стадии проводился расчет углов атаки профилей в составе лопасти гребного винта в неоднородном поле скоростей. Для расчета использовалась программа SPA2000, разработанная А.Ш. Ачкинадзе и В.И. Красильниковым.

В результате расчетов при работе винта на рабочей поступи  $J = 0.6$  были получены следующие величины углов атаки для  $r/R = 0.5$ :  $3.71^\circ - 6.05^\circ$ ;  $r/R = 0.7$ :  $-0.52^\circ - 3.28^\circ$ ;  $r/R = 0.9$ :  $-1.21^\circ - 1.71^\circ$ . Максимальные значения соответствуют верхнему положению лопасти. Минимальные соответствуют крайне ограниченным зонам с минимальной подторможенностью и максимальным тангенциальным скосом потока и используются для проверки кавитации с нагнетающей стороны.

На второй стадии проводился расчет распределения давления на поверхности профилей при максимальных углах атаки.

Расчеты выполнялись с профилями, соответствующим радиусам  $r/R = 0.5; 0.7; 0.9$  гребного винта № 1. Алгоритм расчетов предусматривал снижение окружающего давления, аналогично процессу испытаний в кавитационной трубе. Снижение проводилось пока на профиле не появлялась область длиной 2 % от длины хорды с давлением ниже давления парообразования. Принятый критерий в 2 % является достаточно мягким, что позволяет избежать излишнего изменения кривизны.

Расчеты проводились в программном пакете STAR-CCM+.

Далее проводилась корректировка кривизны в области носика профиля до тех пор, пока минимальное давление не становилось равным давлению парообразования.

Некорректное распределение кривизны может привести к образованию «волн» на поверхности. Для сглаживания распределения кривизны профилей каждого расчетного радиуса использовался программный комплекс InpGeom, который применялся для описания геометрии гребных винтов в КГНЦ.

Следующий шаг – проецирование нового распределения кривизны на остальные радиусы. Выполнялось путем вычисления среднего арифметического через кривизну сглаженных профилей. В связи с возможным образованием «загиба» из-за слишком большой величины кривизны, кривизна для всех радиусов ниже  $r/R = 0.5$  была принята как на  $r/R = 0.5$ .

Последним этапом является согласование распределения кривизны по всей лопасти для каждого значения  $\xi$  (безразмерная координата профиля,  $\xi = 1$  и  $-1$  соответствует входящей и выходящей кромке соответственно).

Таким образом, при проектировании профилей добавляется еще один шаг – сглаживание распределения кривизны и ее согласование между всеми радиусами.

В результате по данному алгоритму, используя в качестве прототипа гребной винт № 1, был спроектирован гребной винт № 3. На рисунке 8 представлено новое распределение кривизны.

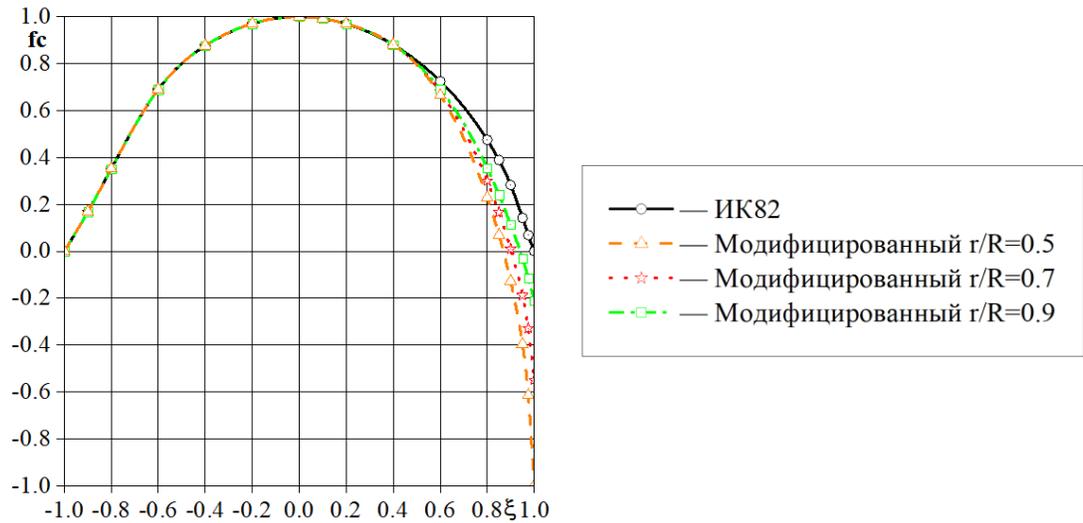


Рисунок 8 – Распределение кривизны модифицированных профилей

Для проверки гидродинамических и кавитационных характеристик модифицированных профилей была изготовлена модель гребного винта № 3, которая прошла цикл испытаний, аналогичный моделям гребных винтов № 1 и № 2.

Результаты гидродинамических испытаний модели показали, что внесенные в профилировку изменения не оказывают влияния на кривые действия гребного винта.

Квазиакустические испытания на рисунке 9 продемонстрировали, что модификация профилей позволяет сдвинуть всю корзину влево и опустить горизонтальную ветвь. Сопоставление результатов с применением шероховатости входящей кромки показали, что данный подход обеспечивает значительное снижение ветви соответствующей пленочной кавитации с засасывающей стороны.

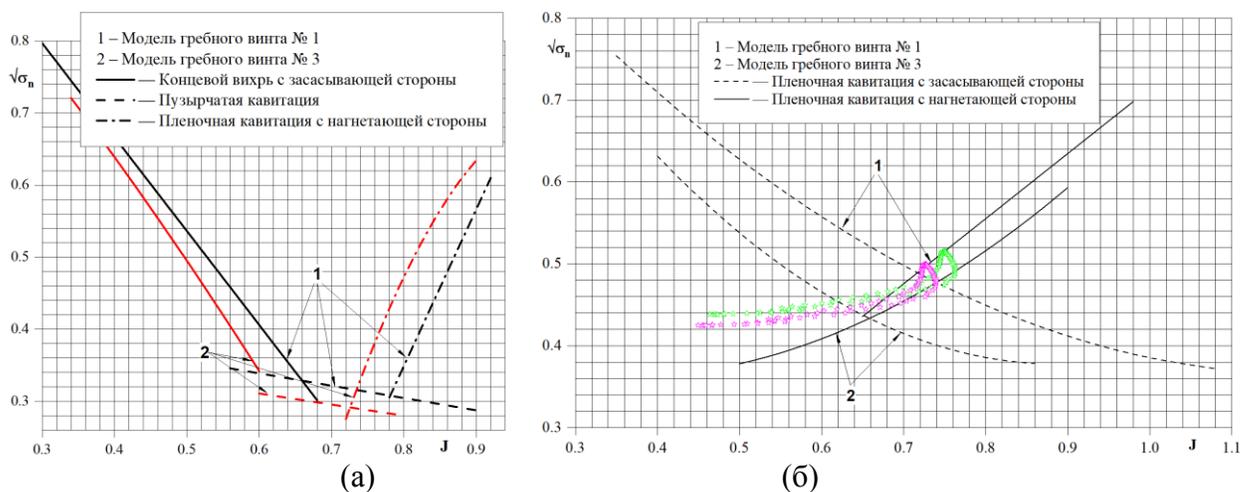


Рисунок 9 – Результаты квазиакустических испытаний моделей ГВ № 3:  
(а) – без шероховатости; (б) – с применением искусственной шероховатости

Модифицированные профили позволяют убрать кавитацию с нижних радиусов и сократить длину каверны на верхних (рисунок 10). Модификация улучшает кавитационные характеристики без влияния на гидродинамику.

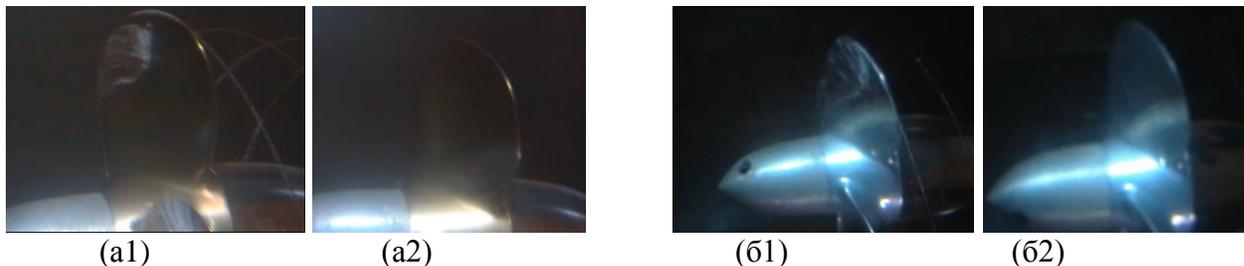


Рисунок 10 – Кавитация с засасывающей стороны лопасти  $J = 0.409$ ,  $\sqrt{\sigma_n} = 0.512$ :  
 (a1) – гребной винт № 3 с шероховатостью; (a2) – гребной винт № 3 без шероховатости;  
 (б1) – гребной винт № 1 с шероховатостью; (б2) – гребной винт № 1 без шероховатости

Такое изменение кавитации по проведенным расчетным оценкам позволит снизить пульсации на корпусе на 25 – 30 %, что существенно сказывается на санитарных условиях обитаемости. Уменьшение максимальной длины каверны и снижение диапазона угловых положений лопасти, на которых существует кавитация, способствует снижению риска кавитационной эрозии. Результаты проектирования новых гребных винтов позволяют улучшить конкурентоспособность отечественных гребных винтов по кавитационным качествам без потери КПД на экспортном рынке.

Дополнительно были выполнены расчеты прочности лопастей гребных винтов № 1 и № 3 под действием ледовой блочной нагрузки.

Для расчетов прочности лопастей гребного винта РМРС определяют две силы –  $F_b$  и  $F_f$ , возникающие при взаимодействии гребного винта со льдом, включающие в себя гидродинамическую нагрузку:

Сила  $F_b$  – максимальная за весь срок службы сила на лопасти гребного винта, изгибающая лопасть назад.

Сила  $F_f$  – максимальная за весь срок службы сила на лопасти гребного винта, изгибающая лопасть вперед.

В результате расчета по формулам для категории ледовых усилений РСЗ получены величины сил  $F_b = 2284.314$  кН;  $F_f = 1575.0$  кН.

Для гребных винтов должны быть рассмотрены 5 сценариев нагружения:

1. LoadCase 1 (сила  $F_b$ ) – равномерное давление на засасывающей стороне лопасти в зоне от  $0.6R$  до конца и на  $0.2$  длины хорды от входящей кромки.
2. LoadCase 2 (сила  $0.5F_b$ ) – равномерное давление на засасывающей стороне лопасти на конце выше радиуса  $0.9R$ .
3. LoadCase 3 (сила  $F_f$ ) – равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти в зоне от  $0.6R$  до конца и на  $0.2$  длины хорды от входящей кромки.
4. LoadCase 4 (сила  $0.5F_f$ ) – равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти на конце выше радиуса  $0.9R$ .
5. LoadCase 5 (сила  $0.6\max\{F_b, F_f\}$ ) – равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти в зоне от  $0.6R$  до конца и на  $0.2$  длины хорды от выходящей кромки.

Расчет напряжений в лопасти гребного винта выполнен по методу конечных элементов с использованием программного комплекса Siemens FEMAP.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ напряжений винтов № 1 и № 3.

Таблица 1 – Анализ влияния модифицированной профилировки на прочностные характеристики гребного винта

Сценарий нагрузки	Гребной винт № 1	Гребной винт № 3	
	Эквивалентные напряжения, МПа	Эквивалентные напряжения, МПа	Изменение в %
Load Case 1	341.0	351.8	3.17
Load Case 2	216.9	215.7	-0.55
Load Case 3	231.1	239.8	3.76
Load Case 4	150.1	149.2	-0.60
Load Case 5	278.3	278.3	0.00

Таким образом, изменения напряжений в лопастях при модификации профилей крайне незначительны и не влияют на соответствие ледовых винтов требованиям класса Регистра.

Ниже в качестве итога всей работы представлена технология проектирования гребных винтов с улучшенными кавитационными характеристиками. Технология представляет собой следующую последовательность действий:

1. Проектирование гребного винта по «классической» схеме.
2. Определение углов атаки и скоростей набегающего потока на профили в

составе лопасти гребного винта по данным поля скоростей в диске гребного винта, которые входят в комплект стандартной информации для проектирования гребного винта с использованием программного комплекса SPA2000.

3. Корректирование профилей гребного винта по методике, разработанной и описанной в главе 4, с использованием программ, основанных на RANS методах:

3.1. Корректировка кривизны в носике профиля для нескольких радиусов (рекомендовано проводить расчеты для радиусов  $r/R = 0.5; 0.7; 0.9$ ), с целью согласования профиля и натекающего потока.

3.2. Сглаживание распределения кривизны вдоль профиля и последующее проецирование на остальные радиусы по методике, описанной в главе 4.

3.3. Согласование кривизны между всеми радиусами гребного винта по методике, описанной в главе 4.

3.4. Контрольные расчеты профилей, а также расчеты при отрицательных углах атаки.

4. Квазиакустические испытания как «чистого» гребного винта, так и с применением искусственной шероховатости входящей кромке с определением кавитационных диаграмм как для лопастей без шероховатости (стандартные квазиакустические испытания), так и характеризующих «кавитацию за шероховатостью», как это предложено в параграфе 3. Рекомендованная по результатам исследований параграфа 3 высота шероховатости – 30 мкм на полоске 2.5 % длины хорды.

5. Сопоставление полученных в результате выполнения квазиакустических испытаний с расчетными значениями мгновенной поступи лопастей в различном их положении при вращении винта, прогнозирование угловых положений лопасти, на которых будет проявляться кавитация на лопастях, а также прогнозирование картины кавитации, соответствующей картине кавитации за шероховатостью.

6. При необходимости – дополнительная корректировка лопасти.

## **Заключение**

В рамках настоящей работы получены следующие основные результаты:

- проанализированы, а также сопоставлены с результатами натурных наблюдений, результаты кавитационных испытаний ледового гребного винта в различных исследовательских центрах;

- выявлено существенное влияние использования искусственной шероховатости входящей кромки на результаты кавитационных испытаний, показано, что при применении различных размеров шероховатости результаты кавитационных испытаний могут значительно различаться;

- по результатам испытаний ледовых и не ледовых винтовых профилей с визуализацией потока, выявлено значительное различие влияния искусственной шероховатости входящей кромки на поток, особенно при увеличении угла атаки ледовых профилей, эквивалентном увеличению нагрузки лопасти в подторможенном потоке за корпусом;

- на основании комплексных исследований гребных винтов с применением искусственной шероховатости входящей кромки были выбраны характеристики шероховатости для испытаний на установках КГНЦ;

- предложена технология проектирования гребных винтов, включающая:

- скорректированную методику кавитационных испытаний моделей гребных винтов с искусственной шероховатостью входящей кромки;
- расчетное проектирование профилей сечений лопастей, позволившее существенно снизить проявления кавитации на ледовом гребном винте для транзитных режимов его работы в открытой (свободной ото льда) воде.

Указанная технология проектирования гребных винтов рекомендована к использованию при проектировании гребных винтов, работающих в существенно неоднородном потоке за корпусом.

В качестве перспективы дальнейших исследований следует назвать необходимость накопления материала по развитой кавитации на лопастях с

помощью натуральных наблюдений за кавитацией гребных винтов, с соответствующей корректировкой методов моделирования кавитации за корпусом модели в отечественных кавитационных трубах и уточнением методов прогнозирования натуральных характеристик кавитации по данным модельных и натуральных испытаний и расчетов.

### **Публикации автора**

В рецензируемых изданиях и изданиях входящих в базу в Web of Science:

1) Дарчиев Г.К., Пустошный А.В. Особенности технологии проектирования гребных винтов транспортных судов ледового плавания. Санкт-Петербург, Морские интеллектуальные технологии, №4, т.4, стр. 16 – 22

В рецензируемых изданиях:

2) Дарчиев Г.К., Пустошный А.В., Фролова И.Г. Влияние дискового отношения гребного винта на распределение давления по его поверхности. Труды ЦНИИ им. А.Н. Крылова вып.91(375) 2016. стр. 5 – 16.

3) Дарчиев Г.К., Пустошный А.В., Фролова И.Г. Орлов П.М. Анализ влияния шероховатости входящей кромки профилей на структуру потока. Санкт Петербург, Труды Крыловского Государственного Научного Центра, №1(383) 2018 стр. 60 – 66.

4) Пустошный А.В., Дарчиев Г.К., Фролова И.Г. Развитие научной базы проектирования гребных винтов для транспортных судов ледовых классов. Труды Крыловского Государственного Научного Центра вып. 387 2019. стр. 7 – 19.

В материалах конференций:

5) Pustoshny A.V., Darchiey G.K., Frolova I.G. The problem of propeller design for high ice class transportation ships // Proceedings of the fifth international symposium on marine propulsors, SMP'17, V.3, 12 – 15, Espoo, Finland, June, 2017, pp. 390 – 397.