

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

Департамент судостроительной промышленности и морской техники
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

На правах рукописи



Дарчиев Георгий Константинович

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

05.08.01 Теория корабля и строительная механика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН
Пустошный Александр Владимирович

Санкт-Петербург – 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ.....	13
1.1 Анализ методик, применяемых для изучения кавитации в различных исследовательских центрах мира.....	13
1.2 Анализ результатов сравнительных испытаний ледового гребного винта арктического транспортного судна.....	25
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКА НА ЛОПАСТЯХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ.....	32
2.1. Анализ физических аспектов формирования потока на лопастях в модельных и натуральных условиях.....	32
2.2 Современные взгляды на методику модельных испытаний гребных винтов при применении методики искусственной турбулизации.....	39
2.3. Обоснование выбора параметров искусственной шероховатости для испытаний моделей гребных винтов.....	50
2.4. Экспериментальное исследование влияния шероховатости на обтекание винтовых профилей различных типов.....	52
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И КАВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ.....	61
3.1 Постановка экспериментов по исследованию влияния шероховатости на характеристики гребных винтов. Результаты визуализации потока на лопастях.....	61
3.2. Влияние искусственной шероховатости на гидродинамические характеристики моделей гребных винтов.....	69
3.3 Влияние искусственной шероховатости на кавитационные характеристики моделей гребных винтов.....	72

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО РАЗВИТОЙ КАВИТАЦИИ НА ХОДОВЫХ РЕЖИМАХ	79
4.1. Анализ возможности снижения развитой кавитации на лопастях ледовых гребных винтов на ходовых режимах.....	79
4.2. Основные положения RANS метода расчета обтекания профилей.....	87
4.3 Расчетное проектирование гребного винта с улучшенными кавитационными характеристиками по развитой кавитации.....	92
4.4. Экспериментальная проверка кавитационных характеристик винта с корректированными профилями.....	97
4.5. Расчет прочности лопастей под действием ледовой блочной нагрузки.....	108
4.6. Технология проектирования гребных винтов с улучшенными кавитационными характеристиками по развитой кавитации на режимах движения в свободной воде.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

В последние годы для круглогодичной перевозки минеральных ресурсов из Арктики в страны Европы и Азии строятся крупнотоннажные транспортные суда высоких ледовых классов. Их маршруты включают сотни миль во льдах и тысячи миль в открытой воде. Поэтому их движители должны удовлетворять требованиям, выдвигаемым как для ледовых гребных винтов (обеспечение упора вблизи швартового режима и прочность при контактах со льдом), так и для гребных винтов транспортных судов, работающих на чистой ото льда воде (улучшенные по сравнению с традиционными ледовыми гребными винтами кавитационные характеристики, определяющие вибрацию на судне, а также высокий КПД). В качестве движителей крупнотоннажных судов высоких ледовых классов, как правило, применяются поворотные электрические колонки, которые позволяют решить задачу управляемости во льдах. Кроме того, они обеспечивают возможность преодоления льдов кормой вперед при развороте колонок на 180 градусов, что в ряде случаев облегчает движение во льдах.

Для двухвинтовых компоновок тянущие колонки расположены вблизи бортов, так что их гребные винты работают практически в однородном потоке, и кавитационные проблемы при проектировании решаются с помощью существующих технологий. Центральный гребной винт тянущей колонки одновинтовых и трехвинтовых ледовых судов работает в зоне существенно подторможенного потока в гидродинамическом следе за килевой коробкой корпуса. В этом случае, учитывая необходимость применения для лопастей специальной ледовой профилировки, борьба с кавитацией на ходовых режимах в чистой воде существенно осложняется.

Важной составной частью технологии проектирования гребных винтов являются испытания их моделей в опытовых бассейнах и кавитационных трубах. До настоящего времени модельный эксперимент обеспечивает проверку и

прогнозирование пропульсивных и кавитационных характеристик гребных винтов с точностью, превышающей точность компьютерных расчетов. В рамках модельных испытаний гребных винтов принципиально невозможно обеспечить подобие по числу Рейнольдса – критерию, отражающему соотношение сил трения и инерционных сил. Этим объясняется существование масштабного эффекта – некоторого несоответствия получаемых в эксперименте характеристик и картин кавитации, полученных в натуральных условиях.

Одним из физических проявлений масштабного эффекта является то, что на модели гребного винта значительная часть площади лопасти от входящей кромки обтекается ламинарным потоком. В натуральных условиях ламинарный участок крайне незначителен и развивается только в непосредственной близости от входящей кромки.

В число методов, разработанных в мире для минимизации масштабного эффекта при прогнозировании кавитационных характеристик гребных винтов, входит применяемая в ряде зарубежных исследовательских центров искусственная турбулизация потока на лопастях моделей гребных винтов. Например, нанесение полосы искусственной шероховатости на поверхность вблизи входящей кромки приводит к турбулизации потока вблизи лопасти и сокращению площади и протяженности ламинарного участка. Однако этот метод не свободен от ряда недостатков. В частности, наличие шероховатости создает дополнительное сопротивление трения и ухудшает обтекание, что приводит к погрешностям в определении как пропульсивных, так и кавитационных характеристик. Поэтому в России искусственная турбулизация моделей гребных винтов до последнего времени не применялась.

Однако ряд обстоятельств указывает на необходимость корректировки отечественного методического подхода. В конце XX века этот вопрос ставился специалистами по результатам проведенного в России цикла натуральных наблюдений за кавитацией гребных винтов, где в ряде случаев отмечалось отличие в преобладающих формах кавитации на лопастях – на модели наблюдался только

концевой вихрь, в натуральных условиях – только кромочная кавитация. Существовавший уровень технологий не позволил найти научное объяснение этого явления.

Особенно обострился этот вопрос во втором десятилетии XXI века при работе по проектированию ледовых гребных винтов судов арктического плавания. Сопоставительные модельные кавитационные испытания, проводившиеся одновременно в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) на гладких моделях гребных винтов и в двух зарубежных центрах при наличии шероховатости, показали принципиальное различие картин кавитации на гладких и шероховатых моделях. При этом картины кавитации в двух зарубежных исследовательских центрах также существенно различались, что может быть объяснено применением различных технологий нанесения шероховатости. Зафиксированная в ходе натуральных наблюдений кавитация отличалась от всех картин, полученных при модельных испытаниях, но характер кавитации и размер каверн в натуральных условиях был ближе к картине, полученной на моделях с искусственным турбулизатором.

Таким образом, стала крайне актуальной потребность провести научный анализ существующих отечественных и зарубежных 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.

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.

Степень разработанности темы

Теоретические основы практического проектирования гребных винтов в России заложены в работах А.М. Басина и И.Я. Миниовича [6], А.А. Русецкого [34]. С появлением вычислительной техники методы и программы расчета гребных винтов, основанные на вихревой теории, были разработаны В.Г. Мишкевичем [30, 31], Н.Ю. Завадовским [14, 15], позже методики и программы проектирования гребных винтов, основанные на панельных методах, развиты А.Ш. Ачкинадзе и В.И. Красильниковым [39 – 41]. Эти программы до настоящего времени являются основой технологий проектирования гребных винтов, применяемых в России. Расчеты гребных винтов по программам, реализующим RANS методы, активно развиваются в работах М.П. Лобачева и А.Е. Таранова [3, 11, 26, 80, 88].

Методики испытаний моделей гребных винтов в кавитационной трубе, являющиеся составной частью технологии проектирования гребных винтов, разрабатывались специалистами КГНЦ. В современном виде эти методики описаны А.С. Горшковым, А.А. Русецким и В.О. Борусевичем [9].

Методики применения шероховатости для турбулизации при испытаниях моделей гребных винтов разработаны и описаны Kuiper [62] 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. Александрова и Е.Я. Семионичевой [42, 43].

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

Теоретическая и практическая значимость

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 выполнять модельную проверку их кавитационных характеристик для режимов частичной кавитации.

Полученные данные и разработанные методики используются в КГНЦ при проектировании гребных винтов крупнотоннажных арктических транспортных судов.

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.

Методология и методы исследования

В диссертации для изучения влияния шероховатости на характеристики гребных винтов и винтовых профилей используются экспериментальные методы исследования. Испытания проводились в опытовом бассейне, кавитационной трубе и гидродинамической трубе КГНЦ.

Расчетными методами исследовались углы натекания потока на лопасти работающего гребного винта по программам, реализующим панельные методы

вихревой теории гребного винта. Также с помощью компьютерных расчетов выполнялось проектирование профилей с улучшенными кавитационными характеристиками методом последовательных приближений с помощью программного пакета STAR-CCM+. Был разработан собственный оригинальный алгоритм проведения таких расчетов для модификации профиля с улучшенными кавитационными характеристиками.

Диссертационная работа включает в себя четыре главы.

Первая глава посвящена обзору экспериментальных установок, применяемых в различных исследовательских центрах. Также в главе представлены результаты модельных кавитационных испытаний ледового гребного винта, полученные при помощи различных методик испытаний, и приведено их сопоставление с результатами наблюдений за кавитацией в натуральных условиях.

Во второй главе представлен обзор результатов исследований возможности применения искусственных средств турбулизации потока при проведении кавитационных испытаний. Описан принцип применения искусственной шероховатости входящей кромки при испытаниях моделей гребных винтов. Также выполнена визуализация обтекания ледовых и не ледовых профилей в вертикальной гидродинамической трубе с применением искусственной шероховатости входящей кромки.

Третья глава посвящена исследованию влияния размеров частиц и ширины полосы искусственной шероховатости на гидродинамические и кавитационные характеристики моделей как ледовых, так и не ледовых гребных винтов с целью выбора оптимальных параметров шероховатости для испытаний моделей гребных винтов на отечественных экспериментальных установках.

В четвертой главе представлен метод проектирования профилей гребных винтов с улучшенными кавитационными характеристиками.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся:

- 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.

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

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

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.

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

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(1) 2019, стр. 7 – 19.

Входящие в Web of Science:

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.

Результаты работы докладывались на 5-й международной конференции по двигателям SMP'17 (Еспоо, Финляндия, 2017 г.):

Pustoshny A.V., Darchiev 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.

Структура и объем работы.

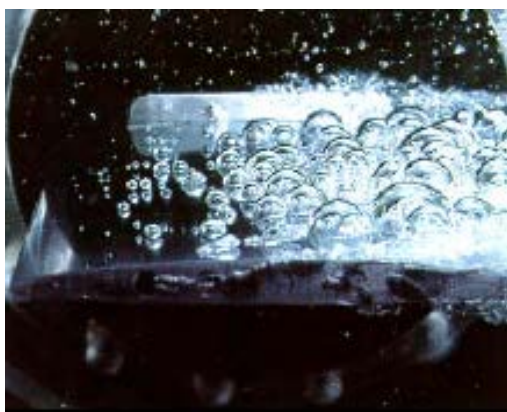
Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, приложений. Работа содержит (131) страницы основного текста (включая 16 таблиц и 65 рисунков), списка литературы из 94 наименований.

Глава 1. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

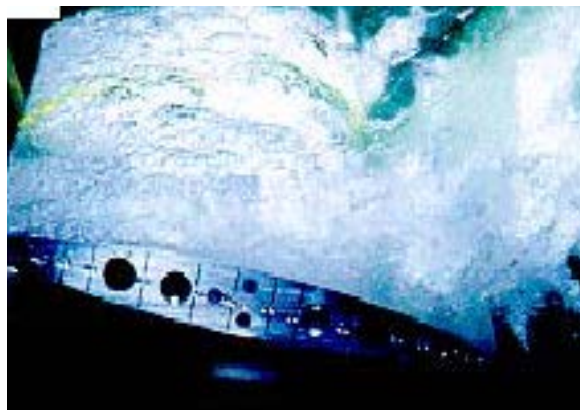
1.1 Анализ методик, применяемых для изучения кавитации в различных исследовательских центрах мира

Кавитация – это явление нарушения сплошности жидкости в условиях пониженного давления с образованием паровых или парогазовых пустот – пузырьков и каверн.

В судостроении кавитация практически неизбежно проявляется при работе гребных винтов, так как лопасти вращаются в воде с большой скоростью, и на их поверхности по закону Бернулли образуются зоны с пониженным давлением. В исследовательской практике используются определения нескольких форм кавитации. В рамках работы рассматриваются формы кавитации, наиболее часто возникающие на лопастях гребных винтов, а именно: пузырьковая, облачная, пленочная и кавитация концевой вихря. Указанные формы кавитации приведены на рис. 1. В модельных условиях наиболее часто встречается кавитация концевой вихря, возникающая, как правило, раньше других форм кавитации при снижении давления в кавитационной трубе.



(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1 – Формы кавитации: (а) – пузырьковая кавитация; (б) – облачная кавитация; (в) – пленочная кавитация; (г) – кавитация концевой вихря

Современные технологии проектирования гребных винтов дают возможность за счет выбора основных геометрических элементов максимально отдалить начало кавитации с увеличением скорости движения судна, а для проектной скорости – уменьшить площадь, покрытую кавернами, и снизить интенсивность кавитации концевой вихря.

Наибольшая опасность возникновения кавитации существует на режимах, соответствующих тяжелой гидродинамической нагрузке лопастей, когда работа происходит при достаточно больших углах атаки, и разрежения на поверхности, достаточные для появления кавитации, могут возникать даже при относительно небольшой скорости вращения винта.

Гребной винт вблизи корпуса обтекает неоднородным потоком, формирующимся при сложном взаимодействии пограничного слоя корпуса и следа

за выступающими частями. Для гребного винта одновального судна и центрального гребного винта трехвального судна неоднородность натекающего на гребной винт потока определяется гидродинамическим следом за килевой коробкой корпуса. Поэтому в некоторых областях диска гребного винта, чаще всего в верхнем положении лопасти («12 часов»), где она проходит ближе всего к корпусу и работает в следе за килевой коробкой, лопасть оказывается в существенно подторможенном потоке, и ее гидродинамическая нагрузка существенно возрастает (увеличиваются углы атаки). Таким образом, лопасть оказывается в неблагоприятном, с точки зрения кавитации, режиме высокой гидродинамической нагрузки, даже если винт судна в целом может считаться легко нагруженным.

Поэтому при работе гребного винта за корпусом кавитация, как правило, вспыхивает именно в зонах наиболее подторможенного потока и исчезает, когда лопасть выходит из этой зоны. То есть при работе винта за корпусом имеет место постоянное изменение картины кавитации на лопасти – от полного ее отсутствия до максимального проявления в зоне подторможенного потока.

Возникновение и исчезновение кавитации сопровождается негативными явлениями, которые и требуют борьбы с кавитацией, а именно:

- кавитационная эрозия, которая возникает, когда пузырьки и каверны при переходе в область повышенного давления схлопываются, и возникающие резко изменяющиеся давления, аналогичные давлению взрыва, выбивают материал из поверхности лопасти с образованием кратеров на поверхности;

- возникновение кавитации вблизи корпуса эквивалентно утолщению лопасти, что способствует резкому увеличению давления на корпусе при проходе вблизи него кавитирующей лопасти, что в свою очередь приводит к увеличению вибрации корпуса судна, индуцированной работой винта; учитывая ужесточение санитарных норм по вибрации, а также негативное влияние вибрации на оборудование в кормовой оконечности, борьба с кавитацией становится все более актуальной;

Таблица 1 – Список кавитационных труб с характеристиками

	Максимальный диаметр ГВ	Сечение рабочего участка	Максимальная скорость	Минимальное число кавитации	Максимальное и минимальное давление
Митсубиси, Корея	н/д	2×10 м	11.0 м/с	0.2	10 кПа, 150 кПа
Болгарский судостроительный центр гидродинамики	0.3 м	1.4×6 м	4.5 м/с	0.2	6 кПа, 600 кПа
Научно-исследовательский судостроительный центр Китая	0.4 м	0.8×3.2	20 м/с	н/д	10 кПа, 400 кПа
Гамбургский судостроительный исследовательский институт (большая высокоскоростная кавитационная труба)	0.4 м	0.75×2.2 5 м	19.5 м/с	н/д	н/д
Гамбургский судостроительный исследовательский институт (средняя кавитационная труба)	0.29 м	0.57×2.2 м	9.5 м/с	н/д	н/д
Японская объединенная судостроительная корпорация	н/д	н/д	12 м/с	0.2	6.4 кПа, 196 кПа
КГНЦ (большая труба)	0.6 м	1.3×6 м	10 м/с	0.6	0.5 кПа, 200 кПа
КГНЦ (средняя кавитационная труба)	0.24 м	0.68×1.6 м	13.0 м/с	0.2	2.5 кПа, 150 кПа
MARIN	0.35 м	0.9×4.0 м	10.0 м/с	0.2	10 кПа, 180 кПа
Центр морских надводных боевых действий, США (большая кавитационная труба)	0.45 м	3×13.1 м	18.0 м	0.02	3.5 кПа, 414 кПа
Самсунг, Корея	0.6 м	1.4×12 м	18.0 м/с	0.063	1 кПа, 400 кПа

Стандартный цикл испытаний моделей гребных винтов обычно включает в себя:

1. Определение гидродинамических характеристик гребного винта. В результате испытаний строятся зависимости коэффициентов упора ($K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4}$, где T – упор гребного винта; n – частота вращения; D_p – диаметр гребного винта, ρ – плотность воды), момента ($K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^5}$, где Q – крутящий момент гребного винта) и КПД ($\eta_0 = \frac{J \cdot K_T}{2 \cdot \pi \cdot K_Q}$) гребного винта от поступи ($J = \frac{V}{n \cdot D_p}$, где V – скорость набегающего потока). Для режима без кавитации наиболее надежные результаты получаются при испытаниях в опытовом бассейне, где отсутствует влияние турбулентности и нет поджатия потока, характерного для кавитационной трубы.

2. Определение момента наступления второй стадии кавитации. При переходе ко второй стадии кавитации большую часть лопасти покрывает каверна, и из-за сильного искажения кавитацией профилей лопастей происходит ухудшение гидродинамических характеристик винтов.

Как правило, вторая стадия кавитации на швартовном режиме (при нулевой скорости движения судна) является определяющей при проектировании гребных винтов ледоколов и судов высоких ледовых классов, для которых предусмотрено самостоятельное плавание во льдах. Для них всегда проводится испытание по определению начала падения гидродинамических характеристик из-за кавитации на швартовном режиме. Такие испытания корректно проводить в кавитационных бассейнах, так как в кавитационной трубе режим «нулевой скорости» строго говоря, не может быть обеспечен, поскольку даже при отключенном импеллере трубы сам испытуемый винт разгоняет воду по замкнутому кольцу трубы, что вносит заметные погрешности в испытания «на швартовном режиме».

3. Определение начала первой стадии кавитации гребного винта на ходовых режимах с построением кавитационной диаграммы – зависимости числа кавитации от поступи винта, соответствующей точке ее исчезновения при повышении давления в трубе. Данный вид испытаний, подробно описанный ниже, в

отечественной практике всегда проводится в кавитационной трубе, и полученные результаты позволяют произвести корректировку геометрии гребного винта (при необходимости) для отдаления начала кавитации в сторону больших скоростей движения судна.

4. Изучение картины и последствий частичной кавитации, как правило, на режиме, соответствующем полному спецификационному ходу транспортного судна, когда каверны уже существуют, но еще покрывают только часть лопасти и не влияют на гидродинамические характеристики винтов.

В настоящей диссертационной работе рассматривается проектирование гребных винтов транспортных ледовых судов с учетом необходимости снижения проявлений частичной кавитации на ходовых режимах, то есть задач, решаемых при испытаниях по пунктам 3 и 4.

Более 20 лет КГНЦ проектировал гребные винты на экспорт. При этом в ряде случаев разработанные КГНЦ гребные винты проходили проверку в иностранных исследовательских центрах. Необходимость защиты проектов вынудила достаточно глубоко изучить методики кавитационных испытаний в различных лабораториях мира и показала разницу в методиках, применяемых в России и за рубежом. Ниже для сравнительного анализа приводится описание этих методик.

В зарубежной практике существует несколько различных подходов к испытаниям гребных винтов транспортных судов. В целом методики описаны в материалах Международной конференции опытовых бассейнов МКОБ [56]. Общими в этих методиках является два момента:

– испытания проводятся в режиме «работы винта за корпусом», то есть при установке модели корпуса судна с гребным винтом непосредственно в кавитационной трубе; в случае, если размеры кавитационной трубы не позволяют этого, устанавливается макет части корпуса с моделированием неоднородности потока, натекающего на гребной винт, методом сеток, в котором густотой сетки варьируется степень замедления потока;

– исследуется кавитация и измеряются давления на корпусе модели судна только для ограниченного количества режимов (один-два режима), соответствующих полной спецификационной скорости судна.

Различия в методиках обусловлены в основном подходом к обеспечению максимально турбулентного течения на лопастях модели с тем, чтобы максимально приблизить его к полностью турбулентному натурному обтеканию. В большинстве кавитационных труб это достигается путем увеличения частоты вращения гребного винта и, соответственно, скорости обтекания модели корпуса. Это возможно в крупных кавитационных трубах, например в Гамбургском исследовательском центре HSVA (Германия). Этот же прием используется на установках КГНЦ.

В кавитационном бассейне (работает только один крупный кавитационный бассейн в голландском исследовательском центре MARIN, который, тем не менее, проводит огромный объем испытаний для судостроительных фирм всего мира) это принципиально невозможно – испытания осуществляются при соблюдении критерия Фруда $Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot l}}$, где g – ускорение, l – характерный размер (как правило, длина судна по ватерлинии), то есть со скоростями примерно вдвое меньшими, чем в кавитационных трубах и, соответственно, при вдвое более низких частотах вращения винтов. В этих условиях обеспечить турбулентный режим обтекания становится невозможным. Поэтому в кавитационном бассейне, а также в относительно малых кавитационных трубах, где приходится применять модели винтов с диаметром менее признанных общепринятыми 200 – 250 мм, приходится применять средства искусственной турбулизации потока на лопастях.

Следует отметить, что методики кавитационных испытаний за корпусом, применяемые в зарубежных центрах, не свободны от значительных погрешностей. Испытания проводятся за корпусом модели в модельном поле скоростей, которое существенно более неоднородное по сравнению с натурным. Коэффициенты взаимодействия гребного винта с корпусом также соответствуют модельным условиям (в частности, коэффициент попутного потока модели всегда выше натурального). В случае испытаний в кавитационной трубе, «по опыту» лаборатории,

применяются поправочные коэффициенты к коэффициентам взаимодействия на влияние стенок трубы. Как уже говорилось, при испытаниях в кавитационном бассейне с моделированием по числу Фруда при существенно более низких скоростях вращения винта для моделирования по поступи винта значительно обостряется необходимость применения турбулизации. Таким образом, кавитационные испытания за корпусом в западных исследовательских центрах следует принимать как некоторое приближенное моделирование, дающее, с учетом большого опыта таких испытаний и «подгонки» методик под натурные данные, более или менее похожие на натурные параметры кавитации.

Отечественная методика кавитационных испытаний применяется не только для проверки характеристик гребных винтов, она также является важным элементом технологии их проектирования. Гребные винты транспортных судов испытываются в кавитационной трубе в отсутствие корпуса судна. При этом основным результатом является кавитационная диаграмма – зависимость числа кавитации, соответствующего ее началу (критического числа кавитации) от поступи винта. Для гребного винта число кавитации определяется формулой

$$\sigma_n = \frac{P - P_v}{\frac{\rho \cdot (\pi \cdot n \cdot D_p)^2}{2}}, \text{ поступь определяется обычной формулой } J = \frac{V}{n \cdot D_p}.$$

В приведенных формулах:

P – давление в окружающей среде, измеряемое датчиком давления, установленным в свободной от воды части корпуса трубы; во время испытаний изменение числа кавитации происходит за счет изменения этого давления путем откачки воздуха из пустот трубы;

P_v – давление парообразования (определяется в зависимости от температуры воды).

Характерной формой кавитационной диаграммы является ломаная линия в форме «корзины» с двумя наклонными ветвями, характеризующими возникновение кавитации с засасывающей и нагнетающей сторон лопасти, и горизонтальным участком, характеризующим возникновение пузырьчатой кавитации. Типичная форма кавитационной корзины приведена на рисунке 3.

Кавитационная диаграмма строится для различных видов кавитации путем визуальных наблюдений за развитием кавитации на модели гребного винта во время ее испытаний в кавитационной трубе (так называемые «квазиакустические испытания гребного винта»). Наблюдения за возникновением кавитации на лопастях проводятся при стробоскопическом освещении вращающейся модели гребного винта, что позволяет «зафиксировать» для наблюдателя лопасть вращающегося винта в кажущемся неподвижном положении. Следует отметить, что в практике кавитационных труб для повышения точности результатов вместо точки появления кавитации, как правило, регистрируется точка исчезновения кавитации при повышении давления в кавитационной трубе. При заданных значениях относительной поступи винта регистрируется статическое давление, соответствующее моменту исчезновения той или иной формы кавитации, так как этот момент фиксируется визуально более точно, чем момент возникновения. Чем шире корзина кавитационной диаграммы, тем лучше кавитационные характеристики гребного винта, так как в этом случае максимальному и минимальному значениям мгновенной поступи гребного винта при его работе в неоднородном потоке за корпусом будут соответствовать более низкие числа кавитации, а следовательно, и большая скорость хода, при которой возникает кавитация [9].

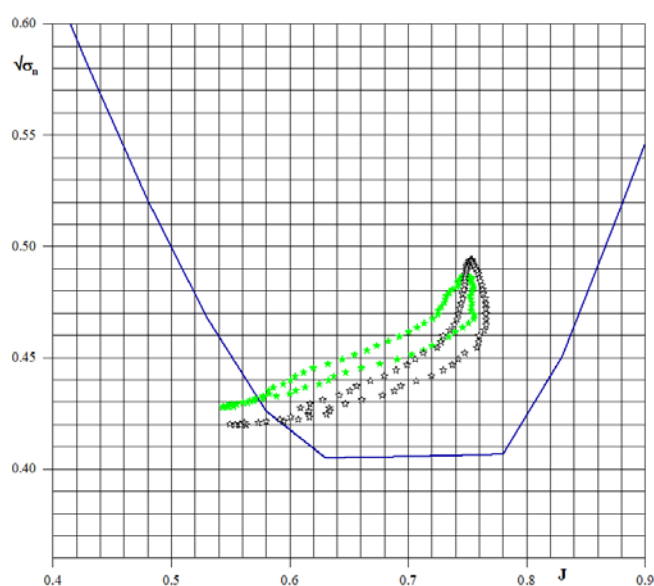


Рисунок 3 – Типичное расположение кривой распределения числа кавитации от мгновенной поступи при вращении лопасти относительно кавитационной диаграммы при проектировании гребного винта

Полученная кавитационная диаграмма в дальнейшем используется при проектировании гребного винта для данного судна следующим образом: рассчитывается зависимость мгновенной поступи лопасти, вычисляемой по формуле $J = \frac{J_V \cdot \overline{V}_x(\bar{r}, \theta)}{1 - \frac{J_V \cdot \overline{V}_t(\bar{r}, \theta)}{\pi \cdot \bar{r}}}$ (где $\overline{V}_x(\bar{r}, \theta)$ и $J_V \cdot \overline{V}_t(\bar{r}, \theta)$ – осевая и тангенциальная компоненты поля скоростей в диске гребного винта для каждого положении лопасти при ее вращении вокруг оси винта на рассматриваемых радиусах в неоднородном потоке, натекающем на гребной винт данного судна). Эта зависимость, имеющая вид петли (рисунок 3) наносится на кавитационную диаграмму, и чем большая часть «петли» расположена внутри диаграммы, тем меньше кавитации будет возникать на лопасти. Левая часть «петли» соответствует наиболее подторможенной части потока (положению лопасти около «12 часов»). При неудовлетворительном положении петли относительно кавитационной диаграммы существуют стандартные методы расчетного изменения геометрии гребного винта (распределения шага и кривизны), которые позволяют подвинуть кавитационную диаграмму гребного винта с тем, чтобы «петля» числа кавитации оказалась максимально внутри корзины.

Преимуществом отечественной методики является то, что при расчете «петли» уже можно ввести поле скоростей в диске винта в натуральных условиях, то есть получить результат сразу для натурального винта. Также этот метод, как уже отмечено, позволяет проектанту определить необходимость и направление корректировки гребного винта.

Однако отечественная методика не лишена погрешностей – отсутствие корпуса перед гребным винтом заставляет проводить испытания в широком диапазоне изменений поступи, а затем делать заключение о картинах кавитации по расчетному значению натурной мгновенной поступи, которая определяется на основании пересчета на натуру поля скоростей в диске гребного винта, измеряемого на модели. Прогнозирование натурального поля скоростей в этом случае носит приближенный характер. Кроме того, квазистатические испытания (то есть испытания при заданной поступи, соответствующей мгновенной поступи лопасти

в данном положении за корпусом) исключают учет динамических эффектов при развитии кавитации.

Таким образом, в отечественных и иностранных методиках кавитационных модельных испытаний изначально заложены различные погрешности, в частности, в определении режимов. Эти погрешности известны научному сообществу, и ведется работа по уточнению методик, но сама природа модельного эксперимента не позволяет их полностью исключить.

В параграфе 1.2 проанализированы результаты кавитационных испытаний ледового гребного винта, спроектированного в КГНЦ на различных установках по методикам, принятым в различных исследовательских центрах.

1.2 Анализ результатов сравнительных испытаний ледового гребного винта арктического транспортного судна

Как уже отмечалось во введении, для спроектированных в КГНЦ ледовых гребных винтов арктического транспортного судна был проведен цикл кавитационных испытаний моделей винтов за корпусом в различных европейских исследовательских центрах, использующих искусственную шероховатость входящей кромки при кавитационных испытаниях. Программа испытаний за рубежом включала наблюдения за кавитацией на одном-двух ходовых режимах, соответствующих полному ходу, с дополнительным измерением величины пульсаций давления на корпусе модели.

Для тех же гребных винтов на этапе проектирования были также проведены испытания в средней кавитационной трубе КГНЦ по принятой в России методике, то есть испытывались гладкие модели (без установки в кавитационной трубе модели корпуса судна) в широком диапазоне вариации поступи без применения шероховатости.

Основные геометрические характеристики модели гребного винта в безразмерной форме, прошедшего эти испытания даны, на рисунках 4 – 7, чертеж 200.0 мм модели представлен на рисунке 8. В зарубежных центрах, в зависимости от их технических возможностей, испытывались модели винтов диаметром 250.0 мм и 166.7 мм.

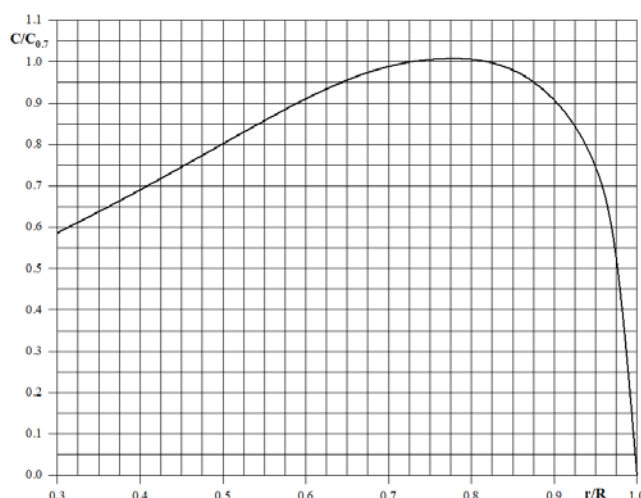


Рисунок 4 – Распределение отношения длины хорды к длине хорды на

$$r/R = 0.7$$

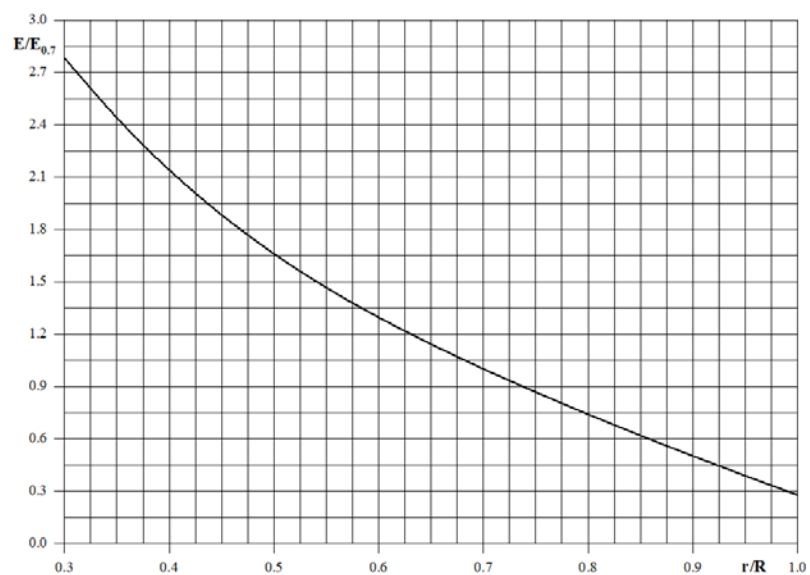


Рисунок 5 – Распределение отношения максимальной толщины к максимальной толщине на $r/R = 0.7$

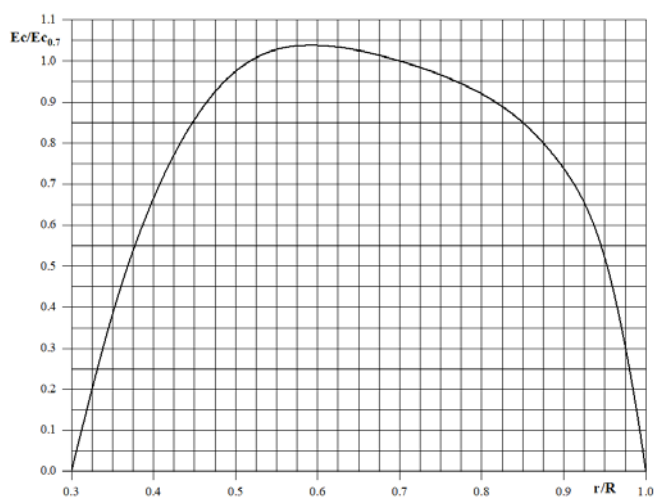


Рисунок 6 – Распределение отношения максимальной кривизны к максимальной толщине на $r/R = 0.7$

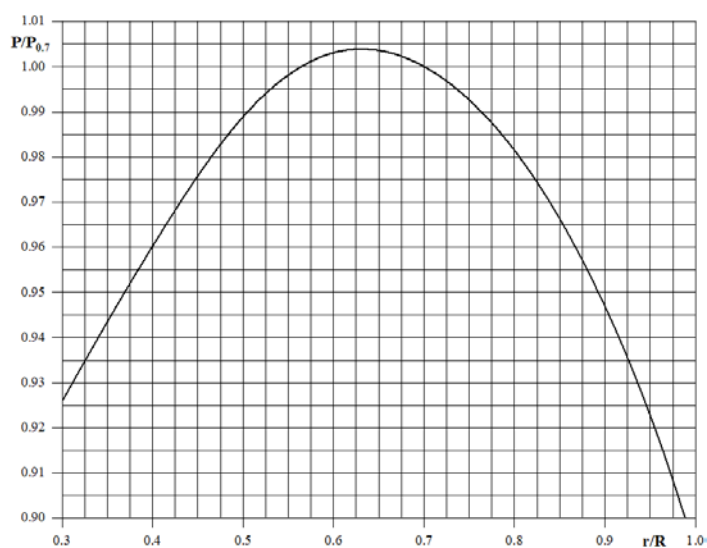


Рисунок 7 – Распределение отношения шага к шагу на $r/R = 0.7$

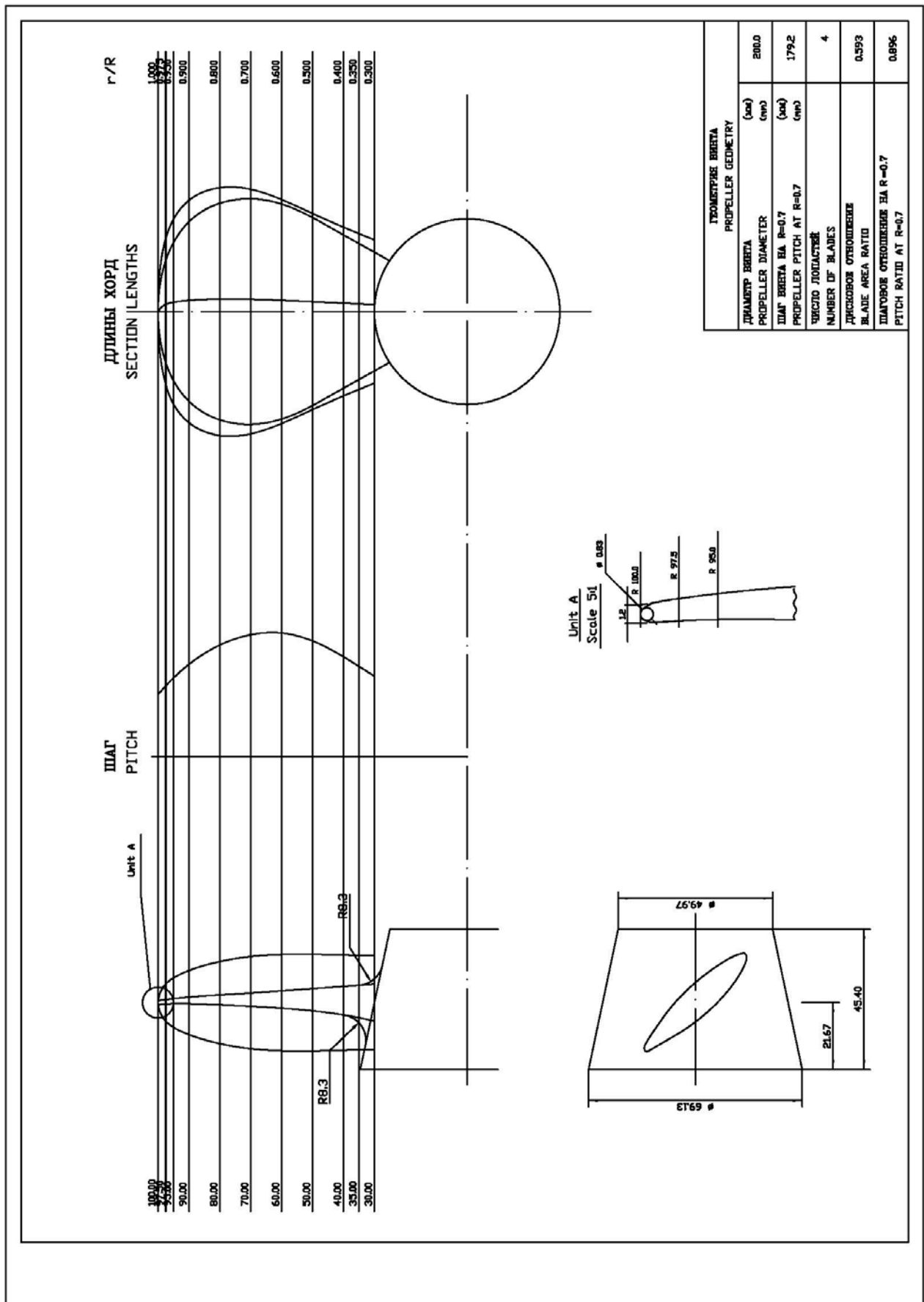


Рисунок 8 – Теоретический чертёж модели ледового гребного винта

Несколько позже, при сдаточных испытаниях судна, с участием специалистов КГНЦ были проведены натурные наблюдения за кавитацией гребного винта.

Наблюдения проводились по новейшей бороскопической технологии, разработанной исследовательским центром MARIN, позволяющей не делать в корпусе корабля над винтами несколько иллюминаторов для наблюдения и организации стробоскопической подсветки, а выводить за борт для видеофиксации через отверстие диаметром порядка 15 мм трубку бороскопа и производить высокоскоростную видеосъемку кавитации винта. Эта технология является весьма перспективной с точки зрения возрождения практики натуральных наблюдений кавитации гребных винтов в России, так как необходимость установки и последующего демонтажа подводных иллюминаторов по существующей в России технологии крайне неохотно применяется заказчиком. В то же время качество бороскопического наблюдения, как выяснилось в ходе испытаний, существенно зависит от освещенности, и приемлемое качество получается только при сильном солнечном свете в отсутствие облаков.

Для всех полученных в ходе испытаний видеоматериалов в ходе настоящей работы был проведен собственный компьютерный анализ изображений кавитации, в результате чего были получены сопоставительные данные по длинам каверн при различных методиках проведения испытаний. Наибольший интерес представляют результаты анализа кавитации среднего гребного винта трехвального судна, работающего, в отличие от бортовых винтов, в существенно неоднородном поле скоростей (замеренная на модели минимальная скорость натекающего на винт потока в области следа за килевой коробкой корпуса (положение лопасти «12 часов») составляет около 0.5 от скорости потока, натекающего на винт вне зоны следа). При этом в последующем анализе сопоставлялись данные модельных испытаний в зарубежных центрах и натуральных испытаний, соответствующие спецификационному режиму скорости полного хода, и картина кавитации по отечественной методике, соответствующая мгновенной поступи лопасти также для

спецификационного режима в положении лопасти «12 часов», то есть в зоне максимальной подторможенности потока за корпусом.

На рисунке 9 представлены результаты анализа картин кавитации, полученные при различных испытаниях:

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

Б) контур максимальной каверны в положении лопасти около «12 часов», полученной в кавитационном бассейне за корпусом при установке полосы шероховатости на входящей кромке лопасти; в этом случае размер каверны существенно меньше, каверна начинается с радиуса 0.6 и распространяется до концевых радиусов, максимальная длина составляет ~50 % от 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, которые сносятся вдоль хорды лопасти и частично постепенно схлопываются вдоль хорды.

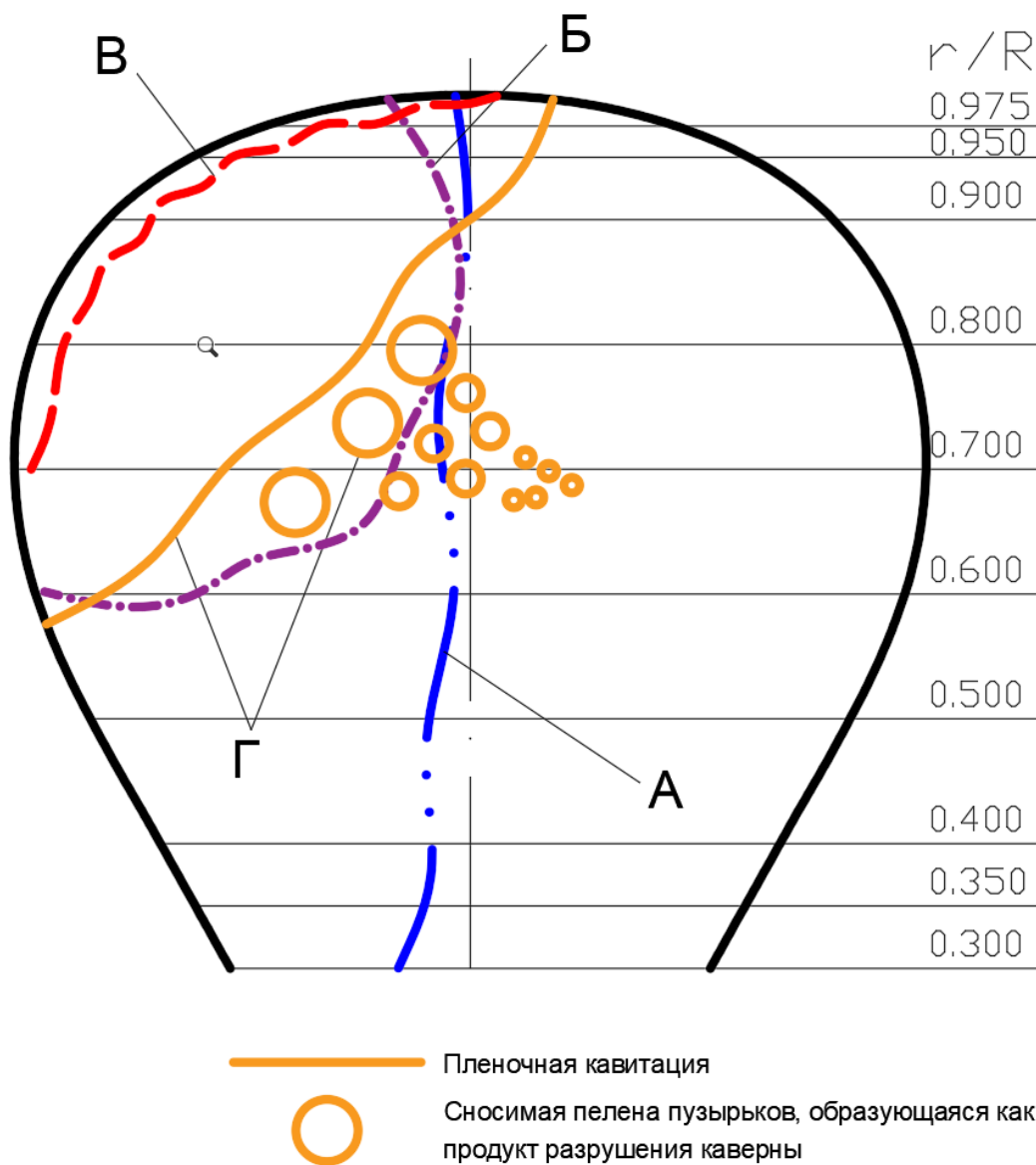


Рисунок 9 – Сравнение картин кавитации: А – испытание модели с применением шероховатой краски; Б – испытание модели с применением полосы шероховатости входящей кромки; В – результаты испытаний в средней кавитационной трубе КГНЦ; Г – картина кавитации при натуральных испытаниях

Как видно из рисунка 9, во всех случаях речь идет о развитой частичной (покрывающей часть лопасти) кавитации на режимах, уже весьма далеких от момента ее возникновения.

Уникальная серия проведенных экспериментов в совокупности с результатами натуральных наблюдений позволила сделать заключение, что при проектировании как минимум ледовых гребных винтов отечественные методики кавитационных испытаний не дают полной информации о развитой частичной кавитации при работе винтов в существенно неоднородном потоке и требуют

корректировки. Картина кавитации, существенно более близкая к натурным условиям, получается в результате испытаний винта с полоской искусственной шероховатости вблизи входящей кромки (Б). Поэтому было принято решение исследовать вопросы, связанные с влиянием шероховатости на характеристики винтов, обосновать и разработать скорректированную методику, учитывающую преимущества применения искусственной шероховатости при моделировании частичной развитой кавитации. Разработка такой скорректированной методики с использованием искусственной шероховатости входящей кромки потребовала проанализировать имеющиеся материалы по влиянию шероховатости, провести модельные эксперименты для изучения влияния шероховатости на винтовых профилях, а также получить собственные экспериментальные данные по оценке влияния шероховатости винтов различных типов. Эти исследования описаны ниже в главах 2 и 3.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКА НА ЛОПАСТЯХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

2.1. Анализ физических аспектов формирования потока на лопастях в модельных и натуральных условиях

Традиционно в теории гребного винта считалось, что физические процессы, происходящие при обтекании лопастей, хорошо описываются теорией крыла малого удлинения. Это позволяло при расчетах гребного винта применять математический аппарат вихревой теории, разработанный в теории крыла. В течение долгого времени все проектировочные и поверочные расчеты базировались на разработанной для расчета крыльев вихревой теории (см. например, работы В.М. Лаврентьева, И.Я. Миниовича, А.А. Русецкого, Н.Ю. Завадовского, В.Г. Мишкевича, А.Ш. Ачкинадзе [2, 6, 14, 15, 24, 30, 31, 36, 39 – 41]), где влияние вязкости учитывалось на уровне эмпирических поправок. Лишь в последние годы, благодаря росту вычислительных мощностей, быстро развиваются расчетные методы для гребных винтов, основанные на решении уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS методы). Применительно к судостроению в России эти методы развиваются в работах М.П. Лобачева, А.Е. Таранова [3, 11, 26, 80, 88].

Тем не менее, в практическом проектировании гребных винтов крыльевые методы (метод несущей поверхности, панельные методы) остаются основными, так как позволяют достаточно точно и быстро проводить многовариантные расчеты винтов с систематическим изменением геометрии.

Однако, учитывая высокие требования к выполнению спецификационных характеристик судов, зависящих от качества проектирования винтов и точности прогнозирования ходкости, в практике проектирования винтов применение любых расчетных методов как для проектирования винта, так и для прогнозирования его гидродинамических характеристик, как правило, сопровождается проведением модельных экспериментов. Именно результаты модельных экспериментов до настоящего времени считаются наиболее точным и убедительным обоснованием

корректности как проектирования винта, так и полученных результатов расчетов ходкости и кавитационных качеств винтов. В отечественной практике испытания по определению гидродинамических характеристик проводятся в опытовом бассейне, а кавитационные испытания – в кавитационных трубах.

При прогнозировании характеристик натуральных гребных винтов по данным модельных испытаний существует достаточно серьезная проблема масштабного эффекта, то есть некоторого отличия модельных характеристик винтов от натуральных из-за различия размеров модели и натурального винта. Эта проблема стала особенно актуальной с увеличением размеров судов. Винты крупнотоннажных транспортных судов достигают 6 – 9 м в диаметре, а их моделирование проводится при размерах моделей 200 – 300 мм.

Проблема обусловлена тем, что при испытаниях моделей гребных винтов не удается достичь натуральных значений числа Рейнольдса – одного из главных критериев моделирования, выражающего соотношение инерционных и вязких сил. Для гребных винтов число Рейнольдса может быть записано в форме [18]

$$Rn_p = 5 \cdot \frac{n \cdot D_p^2}{\nu} \cdot \frac{A_E}{A_0} \cdot \frac{1}{z}, \quad (2.1)$$

где $\frac{A_E}{A_0}$ – дисковое отношение; z – число лопастей.

Равенство натурального и модельного числа Рейнольдса можно выразить через соотношение частот вращения натурального и модельного гребного винта

$$n_M = n_H \cdot \left(\frac{v_M}{v_H}\right) \cdot (M^2), \quad (2.2)$$

где M – масштаб.

Вязкость в модельном эксперименте всегда близка по величине вязкости в натуральных условиях (по крайней мере, это величины одного порядка ($v_H \cong v_M$)). И на практике выполнение условия (2.2) является невозможным, т.к. масштаб M всегда больше единицы, и для равенства по числу Рейнольдса требуется достижение очень

высокой частоты вращения модели, которая, как правило, недостижима на экспериментальных установках исходя из технических возможностей аппаратуры.

Поэтому считается, что необходимо достичь определенного, достаточно высокого уровня чисел Рейнольдса (от $5 \cdot 10^5$ до 10^6), чтобы результаты модельных испытаний были достоверными и их можно было принимать с достаточной степенью точности либо вообще без корректировки, либо с минимальной корректировкой, которая разработана МКОБ [57]. В основе метода корректировки МКОБ заложена следующая идея.

Считается, что если поток на лопасти (или на крыле) полностью турбулентный, то коэффициент профильного сопротивления крыла при малых углах атаки уменьшается с ростом числа Рейнольдса афинно сопротивлению трения гидродинамически гладкой пластины:

$$C_x = (1+k) \cdot C_{f0}, \quad (2.3)$$

где C_{f0} – удвоенное сопротивление технически гладкой пластины, обезразмеренное по скоростному напору и площади крыла в плане; коэффициент пропорциональности $(1+k)$ характеризует влияние формы профиля и угла атаки.

В действительности зависимость $C_x(Re)$ носит более сложный характер вследствие неоднородности режима течения на модели при относительно невысоких числах Рейнольдса, соответствующих модельному эксперименту, а также влияния шероховатости поверхности в натуральных условиях. В области чисел $Re = 10^5 - 10^6$ положение границы ламинарно-турбулентного перехода и размеры переходной зоны не одинаковы на засасывающей и нагнетающей поверхностях и зависят не только от числа Рейнольдса, но и от угла атаки и формы профиля.

Первоначально исследование структуры потока началось с вращающихся дисков Майне [77]. С помощью данных исследований было установлено, что из-за преобладания инерционных сил над силами трения в ламинарном потоке угол между линиями тока и касательной к окружности составляет приблизительно 33° , а в случае турбулентного режима течения, из-за преобладания сил трения, этот угол

составляет 11° . На лопасти такая закономерность сохраняется. Это можно ясно видеть на рисунке 10 из работы [62].

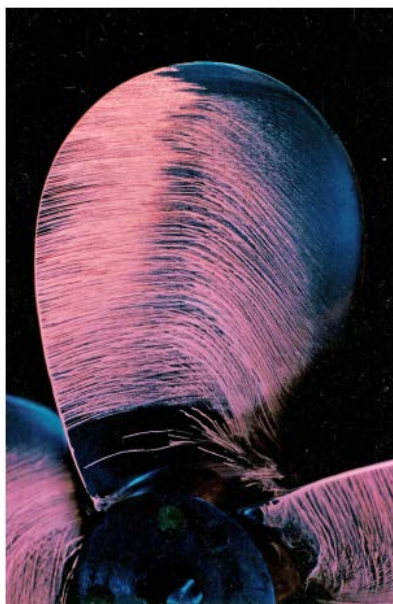


Рисунок 10 – Линии тока с нагнетающей стороны лопасти гребного винта

Наиболее детальные данные по визуализации течений представлены в работах Сосаджимы [83], ХХ МКОБ [82] и результатах испытаний серии моделей гребных винтов [2].

Для визуализации потока в работах Сосаджимы был применен метод визуализации с использованием масляной пленки. Пленка была нанесена на две лопасти. Первая лопасть была покрыта на 30 %, вторая лопасть покрывалась полностью.

Как показали результаты исследований, при достижении числа Рейнольдса $2.26 \cdot 10^5$ размывания пленки на нагнетающей стороне лопасти не происходило, что означает, что поток являлся ламинарным. При достижении $Rn = 4.52 \cdot 10^5$ на лопасти наблюдался переход от ламинарного режима к турбулентному. При $Rn = 1.5 \cdot 10^6$ картина линий тока на нагнетающей стороне полностью соответствовала картине линий тока с засасывающей стороны, что, как предполагалось, соответствовало турбулентному обтеканию.

Исследование протяженности участков течения, представленное в [82], показало, что при значениях $Rn = (0.57 - 1.43) \cdot 10^6$ площадь ламинарного участка

составляет, соответственно, 65 – 16 % от площади всей лопасти, переходный участок 22 – 8 %, турбулентный 22 – 76 %. Однако результаты, представленные в [77, 83] указывают на наличие большего ламинарного участка с нагнетающей стороны лопасти.

Также в работе [82] по изучению распределения давления на ледовых профилях было продемонстрировано, что на нагнетающей стороне профилей наблюдается значительно более поздний переход. Это происходит из-за смещения точки минимального давления при увеличении угла атаки на засасывающей стороне – ближе к носу, а на нагнетающей стороне – вниз по потоку. И, следовательно, градиент давления на засасывающей стороне приводит к более раннему переходу.

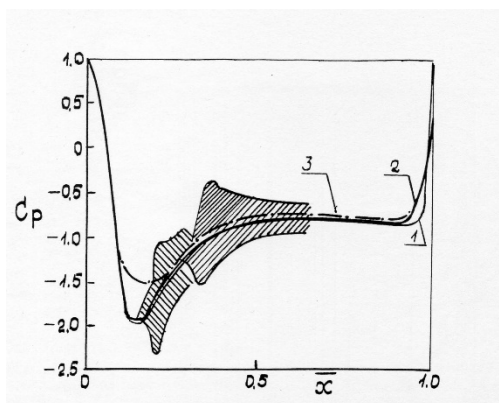
В работе [82] исследовались также пульсации давления на профилях сечений в области повторного присоединения пограничного слоя после отрыва ламинарного слоя и в области перехода режима течения в турбулентный. В таблице 2 представлены результаты для трех областей: 1 – область турбулентного течения, 2 – область ламинарно-турбулентного перехода, 3 – область присоединения пограничного слоя после ламинарного отрыва. В данной таблице $\sqrt{\overline{p'^2}}$ – среднеквадратичное значение пульсаций давления; P'_m – максимальное значение амплитуды пульсаций в течение 40-секундного периода; P'_{mc} – в течение периода, равного 1 с; $q = \frac{\rho v^2}{2}$ – скоростной напор.

Таблица 2 – Интенсивность пульсаций давления в пограничном слое профиля

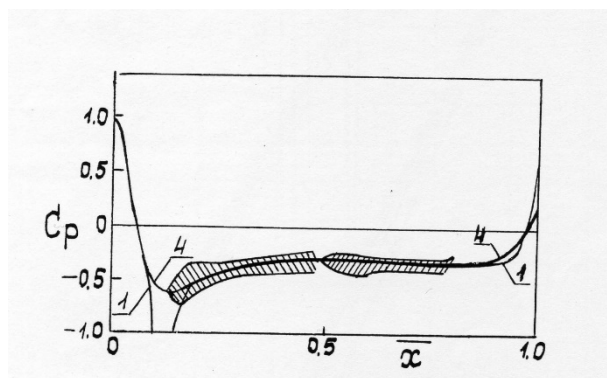
Режим течения	$\sqrt{\overline{p'^2}}/q$	$-P'_m/q$	$-P'_{mc}/q$
1	0.015	0.060	0.035
2	0.040	0.200	0.100
3	0.150	0.550	0.350

Как видно из таблицы 2, наиболее сильные пульсации наблюдаются в области повторного присоединения пограничного слоя и в области ламинарно-турбулентного перехода. Также достаточно важное явление – искажение эпюры

давления в случае наличия ламинарного отрыва (рисунок 11а). Рисунок 11 демонстрирует распределение давления вдоль профиля при следующих случаях: 1 – потенциальное обтекание, 2 – обтекание при малых величинах числа Rn , 3 – при больших величинах числа Rn , 4 – ламинарно-турбулентный переход без образования области отрыва. Заштрихованная область показывает диапазон изменения давления из-за воздействий случайных пульсаций.



а) /// – области отрыва (малые Rn)
 \\\ – области отрыва (большие Rn)



б) /// – области перехода (малые Rn)
 \\\ – области перехода (большие Rn)

Рисунок 11 – Распределение давления вдоль профиля

Как видно из представленных данных, наличие продолжительного ламинарного участка на лопасти в модельных условиях может исказить как картину обтекания, так и распределение давления на профиле, что в случае гребного винта приводит к определенным погрешностям в определении гидродинамических характеристик (коэффициентов упора, момента и КПД), а также картины кавитации в ходе кавитационных испытаний.

Влияние масштабного эффекта на гидродинамические характеристики носит достаточно сложный характер. В первую очередь оно зависит от геометрических характеристик гребного винта, и в результате может приводить к трудно прогнозируемому влиянию на кривые действия модели. Как продемонстрировано в работах [77, 89], влияние оборотов на упор, момент и КПД может достигать нескольких процентов (в практике КГНЦ до 3 – 4 % КПД). Результаты визуализации обтекания, представленные в [93, 83], показали, что характер

обтекания лопастей модели может отличаться от турбулентного и зависит от многих факторов, таких как геометрия, тип профилировки и условия испытаний. Важность учета влияния ламинарного течения при обтекании модели гребного винта на гидродинамические характеристики показана расчетными RANS методами с учетом ламинарно-турбулентного перехода в работе [88].

Для минимизации указанных погрешностей необходимы специальные меры, направленные на максимально возможное снижение протяженности ламинарных участков.

2.2 Современные взгляды на методику модельных испытаний гребных винтов при применении методики искусственной турбулизации

Согласно рекомендациям, представленным в МКОБ [57], для достижения турбулентного режима потока на лопастях модели гребного винта испытания должны проводиться при числах Рейнольдса не менее $2 \cdot 10^5$. Такая величина определена МКОБ, осуществляющим координацию методик судостроительных гидродинамических лабораторий во всем мире, после обсуждения, в ходе которого рассматривалась как необходимая величина числа Рейнольдса равная 10^6 , однако только немногие экспериментальные установки в мире способны достичь таких величин, а рекомендации МКОБ ориентированы на средние характеристики установок, проводящих коммерческие работы.

В отечественной практике пропульсивные и кавитационные характеристики винтов прогнозируются по результатам испытаний моделей в свободной воде при частотах вращения 25 – 30 об/с. Как показали многочисленные опыты, при указанных оборотах достигаются величины гидродинамических характеристик, которые не изменяются при дальнейшем увеличении оборотов, то есть достигается определенная автомодельность по критерию Рейнольдса. Поэтому модельные испытания в КГНЦ традиционно до настоящего времени проводились на моделях гребных винтов с гладкими лопастями. В целом ряде кавитационных труб и опытовых бассейнах в мире также испытывают только гладкие модели винтов (например, в кавитационной трубе в крупном исследовательском центре HSV A в Гамбурге).

Однако, как отмечалось в главе 1, для ряда лабораторий в мире выполнить даже такую «осредненную» рекомендацию бывает затруднительно. Например, в случае, когда характеристики установки не позволяют увеличить диаметр гребного винта до общепринятых 200 – 300 мм. Также при испытаниях моделей в кавитационном бассейне, как это принято в MARIN (Нидерланды), в отличие от испытаний в кавитационных трубах, требуется моделирование движения модели с винтом по числу Фруда, что не позволяет существенно увеличить обороты винта (для сравнения, частота вращения винта в кавитационной трубе составляет обычно

25 – 30 об/с, в то время как в кавитационном бассейне – 15 – 20 об/с). В этих случаях становится крайне актуальной дополнительная турбулизация потока на лопастях моделей гребных винтов с применением (в MARIN) полоски искусственной шероховатости вблизи входящих кромок [62] или полной окраски моделей краской с определенной шероховатостью (в шведском исследовательском центре SSPA).

Суть методов с применением искусственной шероховатости заключается в провоцировании перехода к турбулентному течению при низких скоростях вращения гребного винта за счет использования дополнительных средств турбулизации. Поэтому применение турбулизатора в районе входящей кромки (как правило, полоску с нанесенными корундовыми частицами или проволочных турбулизаторов), позволяет вызвать переход к турбулентному течению непосредственно сразу в области входящей кромки. Метод окрашивания лопастей гребного винта с применением красок с внесенными в нее корундовыми частицами приводит к росту шероховатости на всей лопасти, и тем самым вызывает переход к турбулентному режиму обтекания и изменение характеристик пограничного слоя при обтекании лопастей. Большое исследование, посвященное влиянию шероховатости поверхности лопасти на гидродинамические характеристики, было опубликовано в [93].

Использование искусственных турбулизаторов вносит необходимость ввода поправки на сопротивление, создаваемое турбулизатором, что является довольно сложной задачей, и, как было отмечено в [48], «методикам с применением искусственных средств турбулизации не хватает строгости в применении».

Ниже представлен анализ работ, связанных с применением методик искусственной турбулизации при модельных испытаниях гребных винтов. Следует заметить, что хотя в настоящее время, по имеющимся сведениям, искусственная турбулизация при проведении испытаний моделей винтов используется в крайне ограниченном числе стран, исследования по этому вопросу проводились во всем мире.

Оценка влияния искусственных турбулизаторов на гидродинамические характеристики ГВ была выполнена во многих бассейнах мира: японские опытовые

бассейны [83, 89, 93], голландский [55], корейский [94], бассейн им. Д. Тейлора [59]. В качестве турбулизаторов применялись проволочные штифты и шероховатые полосы (таблица 4).

Выводы работ относительно применения метода искусственной шероховатости, при всей тщательности проведенных исследований, неоднозначны и не дают определенного ответа на все вопросы, связанные с применением методики. Обратим внимание на некоторые из них.

Например, по конструкции турбулизатора:

– MARIN [62] использует и рекомендует полосы корундового песка, закрепленные вблизи входящей кромки;

– Язака и др. [93] рекомендуют использование проволочного турбулизатора диаметром 0.1 мм, что, по его данным, приводит к полной турбулизации потока при $Rn_{0.7R} = 3.5 \cdot 10^5$;

– Тзюдо и др. [89] рекомендуют в качестве искусственных средств турбулизации использовать проволочные или штифтовые турбулизаторы.

Также имеются существенные расхождения по данным о числе Рейнольдса, когда наступает переход к турбулентному режиму и когда, следовательно, турбулизаторы не нужны:

– В работе Сосаджима [83] указано, что при обтекании лопастей без средств искусственной турбулизации переход к турбулентному режиму обтекания наступает при $Rn_D = 1.8 \cdot 10^6$, при этом нужно учитывать, что при пропульсивных испытаниях винта с моделью корпуса область турбулентного течения значительно больше, чем при испытаниях модели гребного винта в свободной воде, и, как следствие, применение турбулизаторов менее эффективно; там же указано, что пропульсивные испытания без искусственных средств турбулизации и испытания в свободной воде следует проводить при одинаковой величине числа Рейнольдса;

– Тзюдо и др. [89] считают, что до числа Рейнольдса $Rn_D = \frac{n \cdot D_p^2}{\nu} = 8 \cdot 10^5$ поток на лопастях является ламинарным, а при переходе к турбулентному режиму наблюдается отрыв.

В качестве данных для оценки протяженности ламинарного участка, как указано в материалах XX МКОБ [59], можно использовать данные, полученные корейским центром в Ульсане при различных величинах чисел Рейнольдса.

Довольно интересными результатами по оценке естественной турбулизации являются данные, полученные в Потсдамском гидродинамическом центре [82]. В данной работе было выполнено измерение коэффициентов упора и момента лопастей гребного винта в зависимости от числа Рейнольдса, которое вычислялось по длине хорды на $r/R = 0.7$ по следующей формуле:

$$Rn = \frac{c_{0.7R} \cdot (V_A^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D_p)^2)^{\frac{1}{2}}}{v}. \quad (2.4)$$

По результатам были получены следующие зависимости:

ламинарный режим:		турбулентный режим:
K_T (при $Rn = 0.27 \cdot 10^6$)	<	K_T (при $Rn = 0.78 \cdot 10^6$);
K_Q (при $Rn = 0.27 \cdot 10^6$)	>	K_Q (при $Rn = 0.78 \cdot 10^6$).

Полученные результаты приемлемо согласуются с данными полученными в КГНЦ [4].

Однако исследовательский судостроительный центр в Токио в работах, представленных в XIV МКОБ [93], утверждает, что для получения устойчивого турбулентного пограничного слоя необходимо применять средства искусственной турбулизации. Аналогичные результаты были продемонстрированы в работе [89], в которой были выполнены модельные испытания серии гребных винтов с диапазоном изменения диаметра $D = 0.186 - 0.356$ м. Авторы данных работ рекомендуют использовать турбулизаторы в виде штифтов или проволочные турбулизаторы [83, 93], аналогичные применяемым в бассейне им. Д. Тейлора [59]. В таблице 3 представлены принципы выбора размеров и установки штифтов на лопасть модели гребного винта [83]. На рисунке 12 приведен пример установленных штифтов на лопасти модели гребного винта диаметром 0.178 м.

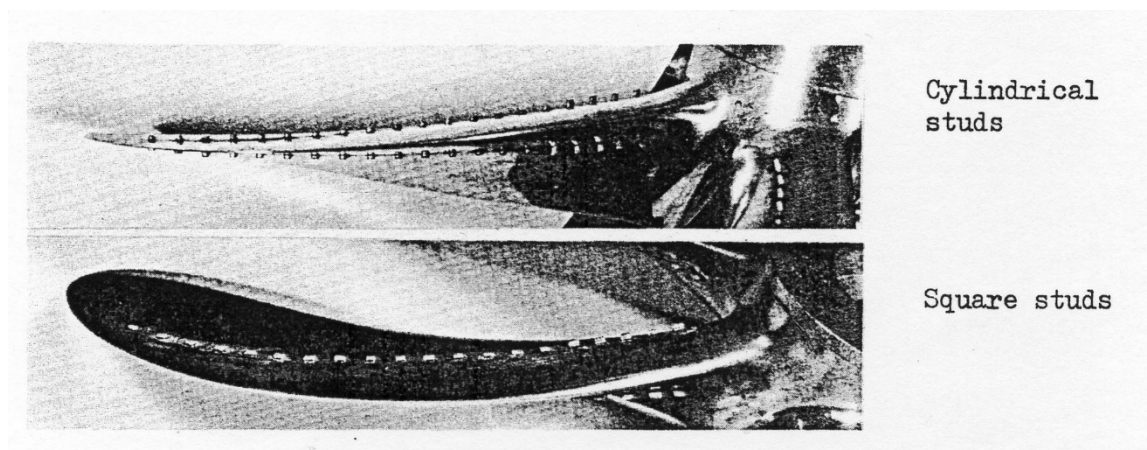


Рисунок 12 – Установка штифтовых турбулизаторов на лопасти модели гребного винта

Таблица 3 – Размеры турбулизующих штифтов

	Цилиндрические штифты	Прямоугольные штифты
шаг P мм	3.00	3.00
d или b в мм	0.83	1.00
b' мм	-	0.50
h мм	0.90	0.53

В работе [94], выполненной в корейском опытовом бассейне, для турбулизации потока на лопастях рекомендуется использовать полосы шероховатости размером 1 мм с размером частиц 63 мкм, расположенные на расстоянии 5 % от входящей кромки. В работе голландского опытового бассейна [55] рекомендуется также использовать полосы шероховатости, однако для определения размера частиц предполагается использовать график зависимости размера корундовых частиц от числа Рейнольдса (рисунок 13). На рисунке по оси абсцисс число Рейнольдса определяется по формуле (2.4).

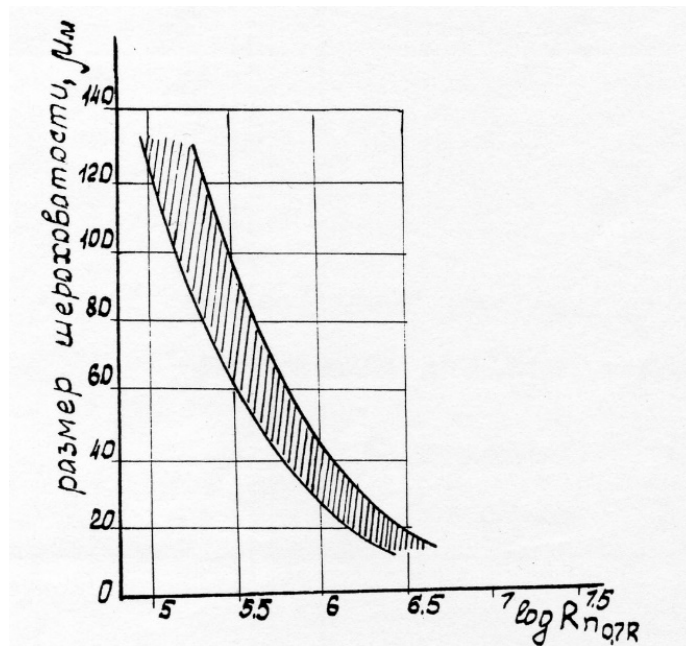


Рисунок 13 – Зависимость размера шероховатости от $Rn_{0.7R}$

С помощью лазерного доплеровского анемометра в бассейне им. Д. Тейлора [59] были выполнены измерения средних и пульсационных скоростей гребного винта диаметром 0.305 м при значениях числа Рейнольдса $7.3 \cdot 10^5$ и $1.46 \cdot 10^6$. Там же дополнительно с помощью метода красок, были определены линии тока для варианта с проволочным турбулизатором диаметром 0.25 мм и для варианта без применения искусственного турбулизатора. Данные исследования показали, что при увеличении числа Рейнольдса с $Rn = 7.3 \cdot 10^5$ до $Rn = 1.46 \cdot 10^6$ пульсации скоростей уменьшались примерно в 1.5 раза. А использование проволочного турбулизатора позволило уменьшить область ламинарного течения на 65 % при $Rn = 7.3 \cdot 10^5$.

Расчеты эпюр распределения давления для пятилопастного и трехлопастного гребного винта с наличием саблевидности (гребные винта так называемого типа Skew) были представлены на 20 МКОБ [82]. Результаты показали, что у трехлопастного гребного винта с засасывающей стороны лопасти переход к турбулентному режиму обтекания наступает примерно при $\bar{x} = \frac{x}{c} \approx 0.5$. Авторами работы [59] были получены схожие результаты.

Таблица 4 – Объекты, условия испытаний и диапазон чисел Rn при исследованиях влияния масштабного эффекта на ГДХ ГВ

№ п/п	Автор, Год	Испытательный центр	Модели ГВ (свободная вода)	Методы индикации	Измерения с помощью ТА, ЛДА	Числа Rn, типы турбулизаторов	Примечания
1	Майне 1972	Бассейн HSVA	Масштабная серия ГВ D = 0.186; 0.20; 0.25; 0.35 м	Краски, электрорлитич., метод	ТА	$Rn = 8.3 \cdot 10^4 - 1.4 \cdot 10^6$	Визуализация течения проводилась также на дисках
2	Сосаджима 1975	ОБ в Нагасаки	Модели ГВ D = 0.178; 0.233; 0.250 м	Метод масляных плёнок	н/д	$Rn = 2.26 \cdot 10^5 - 1.82 \cdot 10^6$ цилиндрические и прямоугольные штифты	Выполнены самоходные испытания танкера $C_B = 0.813$
3	Язаки и др. 1975	Исслед. судостроит. центр в Токио	Модели ГВ D = 0.168; 0.180 м	н/д	н/д	$Rn = (1 - 6) \cdot 10^5$ проволочный турбулизатор	Надбавка на турбулизатор определялась по данным Тагори [7]
4	Тзюда и др. 1978	ОБ в Акаши	Масштабная серия ГВ D = 0.185; 0.205; 0.230; 0.240 м	Метод масляных плёнок	н/д	$Rn = (1 - 6) \cdot 10^5$ проволочный турбулизатор, прямоугольны штифты	Выполнены самоходные испытания танкера $C_B = 0.820$
5	Джесап и др. 1985	ОБ им. Д. Тейлора	Модели ГВ D = 0.305 м	Метод красок	Двухкомпонентный ЛДА	$Rn = 7.3 \cdot 10^5 - 1.46 \cdot 10^6$ проволочный турбулизатор	Получены данные о профилях средней и пульсационной скорости вблизи поверхности лопасти
6	Хайне и др. 1992	ОБ и кавитационная труба в Потсдаме	Модели ГВ D = 0.250 м	Метод красок	Двухкомпонентный ЛДА	$Rn = (0.26 - 1.59) \cdot 10^6$	Испытания проводились в ОБ и кавитационной трубе
7	1992	Кавитационная труба Корейского центра Улсан	Модели ГВ D = 0.250 м	Метод красок	Двухкомпонентный ЛДА	$Rn = (0.57 - 1.43) \cdot 10^6$	Испытания проводились в кавитационной трубе
8	Холтроп и др. 1992	Вагенингенский ОБ	Модели ГВ типа Skew	Метод красок	н/д	$Rn = (5 - 7) \cdot 10^6$ шероховатая полоска	Выполнены исследования характеристик ГВ в кавитационном бассейне
9	Young-Na Park at al.. 1999	Корейский исследовательский центр морских транспортных систем	Крыловой профиль	н/д	н/д	$Rn = 1 \cdot 10^6; 1.6 \cdot 10^6$ шероховатая полоска	Выполнены измерения подъёмной силы и сопротивления профиля на специальном динамометре

Одной из причин, по которой в отечественной практике не применяется искусственная шероховатость, являются погрешности, которые неизбежно вносит турбулизатор в гидродинамические характеристики винтов. Поэтому представляется полезным рассмотреть также известные публикации, посвященные оценкам собственного сопротивления турбулизаторов.

При установке турбулизаторов на моделях корпусов судов, что обязательно и повсеместно применяется в опытовых бассейнах, в том числе России, из-за относительно малых размеров турбулизатора по сравнению с корпусом надбавка, создаваемая им, как правило, не учитывается. Однако в случае модели гребного винта из-за большего относительного размера турбулизатора неизбежно будет происходить изменение гидродинамических характеристик (коэффициент упора и момента) модели гребного винта.

Как правило, для оценки собственного сопротивления турбулизатора используются данные о силе сопротивления, полученные Тагори прямым измерением силы на элементе турбулизатора [87]. Однако работа [93] рекомендует следующую схему.

Коэффициент минимального сопротивления эквивалентного профиля определяется по формуле:

$$C_{D\min} = 2C_F \left(1 + \frac{t_{0.7R}}{C_{0.7R}}\right), \quad (2.5)$$

где: $C_{0.7R}$ – длина хорды лопасти в сечении 0.7R;

$t_{0.7R}$ – толщина лопасти в сечении 0.7R.

Затем определяется коэффициент

$$C_{D\min} = C_{D\min} + \left(\frac{U_d}{U}\right)^2 \frac{d}{C_{0.7R}} 2C_{DW}. \quad (2.6)$$

В формуле (2.6) $\left(\frac{U_d}{U}\right)^2 \frac{d}{C_{0.7R}} 2C_{DW}$ – минимальная надбавка на собственное сопротивление турбулизатора (в данной схеме рассматривается вариант с турбулизатором, установленным с двух сторон лопасти). Коэффициент сопротивления C_{DW} определяется через данные, полученные Тагори [87]. Для

проволочного турбулизатора данная величина составляет 0.75. Величина U_d – местная скорость в районе расположения турбулизатора. Т.к. по данным [93] диаметр проволоки должен быть равен толщине пограничного слоя в области установки турбулизатора, то величина $\frac{U_d}{U}$ принимается равной единице. Результаты, рассчитанные по данной схеме, были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными для модели гребного винта диаметром 0.18 м для вариантов искусственной и естественной турбулизации. Расчетные величины $C_{D_{min}}$ с достаточной точностью согласуются с результатами при искусственной турбулизации, кроме результатов при очень низких оборотах ($n = 6$ об/с).

Также в работе [93] была выполнена косвенная оценка влияния турбулизатора на гидродинамические характеристики модели гребного винта.

В работе Куипера [62] предложен метод коррекции коэффициентов момента и упора, полученных при испытаниях с применением искусственной шероховатости входящей кромки, основанный на методе Лингрена (1972), который базируется на изменении сопротивления сечения гребного винта на радиусе $r/R = 0.75$. Это влияние записывается как

$$\Delta K_T = -0.28 \cdot \Delta C_D \cdot P/D_P \cdot \left(\frac{C \cdot z}{D_P}\right); \quad (2.7)$$

$$\Delta K_Q = +0.248 \cdot \Delta C_D \cdot \left(\frac{C \cdot z}{D_P}\right), \quad (2.8)$$

где P/D_P – шаговое отношение гребного винта; C – длина хорды (в данном случае для $r/R = 0.75$). В первом приближении в качестве сопротивления ΔC_D задается величина, равная разности сопротивлений при полностью ламинарном и полностью турбулентном обтеканиях пластины при $Re = 10^6$ $\Delta C_D = 0.0066$.

Однако, как отмечает автор работы, подобный подход способен приводить к довольно неправдоподобным результатам и без доработки не рекомендован к применению. В работах, которые находятся в открытом доступе, нет данных о развитии данного подхода.

Проведенный анализ показал, что результаты исследований по применению искусственной турбулизации и зарубежная практика при испытаниях моделей гребных винтов весьма противоречивы. Выполненные работы с различными видами турбулизаторов дают обширный материал для понимания физики процессов, происходящих при искусственной турбулизации, но не позволяют сделать определенное заключение о том, какой турбулизатор наиболее эффективен и каково его влияние на обтекание и гидродинамические характеристики винтов. Очевидно, что определенную роль в изучении вопроса играет существенное отличие характеристик экспериментальных установок в различных странах.

В отечественной практике турбулизация лопастей моделей гребных винтов ранее не применялась, опыт ее практического применения на момент постановки работы отсутствовал. Поэтому, учитывая, что основные задачи настоящей работы связаны с исследованием кавитации и улучшением прогнозирования кавитационных качеств проектируемых винтов, при выборе способа искусственной турбулизации, было принято решение ориентироваться на один из двух вариантов искусственной шероховатости, которые применяются за рубежом в коммерческой практике при проведении именно кавитационных испытаний. При этом из двух вариантов – полосы шероховатости вблизи входящей кромки лопасти, как это принято в MARIN [62], и полной покраски лопасти шероховатой краской, как это принято в SSPA – на основании сопоставления натуральных и модельных данных (см. рис. 8) для дальнейшей разработки был принят вариант с полоской шероховатости вблизи входящей кромки как обеспечивший наилучшее согласование картин кавитации с натурными наблюдениями. При этом следует отметить, что случаи применения остальных видов турбулизации, проанализированных в параграфе, в практической работе не встречались ни в одном исследовательском центре.

Выбор способа искусственной турбулизации потребовал постановки собственных экспериментов для набора данных о влиянии полосы шероховатости в условиях кавитационных труб КГНЦ. Поэтому для изучения физических особенностей формирования потока в условиях турбулизации был поставлен

специальный эксперимент по визуализации потока на винтовых профилях различных типов, результаты этих испытаний представлены в параграфе 2.4.

2.3. Обоснование выбора параметров искусственной шероховатости для испытаний моделей гребных винтов

Как отмечено в предыдущем параграфе, для дальнейшего применения при кавитационных испытаниях в кавитационных трубах КГНЦ была принята турбулизация с помощью полоски шероховатости вблизи входящей кромки лопастей, как это описано в [62]. Учитывая, что проанализированные материалы показывают, что данные о влиянии шероховатости могут существенно отличаться в зависимости, в том числе, и от экспериментальной установки, где они получены, для целей настоящей работы, в частности, для разработки методики испытаний с шероховатостью в отечественных кавитационных трубах, потребовалось накопление и анализ собственной информации по влиянию характеристик шероховатости на кавитационные и пропульсивные качества моделей винтов.

Для формирования полоски шероховатости при кавитационных испытаниях моделей винтов была выбрана методика с закреплением лаком полоски корундовой шероховатости вблизи входящей кромки лопасти.

Для начала проведения опытов по влиянию шероховатости на характеристики гребных винтов необходимо было определиться с параметрами искусственной шероховатости.

Ключевой особенностью метода искусственной шероховатости входящей кромки является то, что для определения величины шероховатости используется число Рейнольдса, вычисленное по следующей формуле [64]:

$$Rn_Q = \frac{V_k \cdot k}{\nu}, \quad (2.9)$$

где V_k – скорость на верхней грани корундовых частиц в случае их отсутствия;

k – высота шероховатости;

ν – кинематическая вязкость.

То есть в данной постановке числа Рейнольдса в качестве характерного размера используется размер частиц.

Экспериментальные исследования [64] на плоской пластине показали, что величина числа Рейнольдса по шероховатости должна быть 500 – 750. Однако стоит учесть, что на пластине отсутствуют градиенты давления, и, согласно [72], для тел, имеющих градиенты давления, наиболее оптимальная величина числа Рейнольдса по шероховатости – 300.

Согласно рекомендациям MARIN [62], при испытаниях моделей гребных винтов в кавитационной трубе высота шероховатости должна составлять около 30 мкм.

Длина области шероховатости от входящей кромки в первую очередь зависит от распределения давления. Она должна выбираться таким образом, чтобы охватить зону минимального давления. Как правило, на моделях гребных винтов зона минимального давления расположена достаточно близко к кромке лопасти. В большинстве случаев покрытие 2 – 2.5 % от длины хорды достаточно. Дальнейшее увеличение ширины полосы от входящей кромки является нежелательным, т.к. оно вызывает значительный рост сопротивления лопасти при ее обтекании. Однако на внутренних радиусах входящая кромка имеет большую толщину, а минимум давления располагается несколько дальше от кромки.

Для того, чтобы оценить влияние высоты и ширины полосы шероховатости на экспериментальных установках КГНЦ, была проведена серия экспериментов на моделях винтов с варьированием параметров шероховатости. Описание и результаты этого исследования приведены в главе 3.

Однако для более детального изучения влияния шероховатости на обтекание различных профилей и выяснения физических особенностей происходящих процессов до проведения испытаний моделей винтов были поставлены и проведены специальные эксперименты по визуализации потока вокруг различных профилей (гидродинамических и ледовых) с шероховатостью вблизи носика и без нее. Результаты экспериментов приведены в параграфе 2.4.

2.4. Экспериментальное исследование влияния шероховатости на обтекание винтовых профилей различных типов

В практике проектирования гребных винтов, как правило, применяются гидродинамические профили, которые условно можно разделить на 2 группы: профили, обеспечивающие наилучшие гидродинамические и кавитационные качества (в большинстве случаев это различные модификации профилей типа НАСА), и профили для гребных винтов ледовых классов, которые в ущерб обтекаемости, существенно утолщены вблизи кромок из соображений обеспечения прочности во льдах. Имевшийся на момент постановки настоящей работы опыт сопоставления результатов испытаний в КГНЦ гладких винтов и зарубежных испытаний гребных винтов с шероховатостью показал (см. параграф 1.2), что наибольшие расхождения результатов имеют место для ледовых гребных винтов при их испытаниях за корпусом с существенной неоднородностью потока, то есть в таких положениях, когда лопасть гребного винта работает при больших углах атаки.

Учитывая изложенное, для понимания отличий в процессах формирования потока на гладких профилях и профилях с искусственной шероховатостью была поставлена серия экспериментов по визуализации потока при обтекании профилей в вертикальной гидродинамической трубе. При постановке эксперимента учитывалось, что скорости в вертикальной трубе невелики, так что режим обтекания профилей будет ламинарным, что соответствует обтеканию примерно трети хорды профиля от входящей кромки при испытаниях моделей гребных винтов. Поэтому проведенные эксперименты обеспечивали корректное представление о формировании потока при наличии шероховатости.

В качестве объектов исследования были выбраны два профиля:

- ледовый профиль семейства ИК82, разработанный в КГНЦ специально для ледовых гребных винтов;
- профиль НАСА 66-mod, широко используемый на гребных винтах судов без ледовых классов и обладающий меньшей по сравнению с ледовыми профилями

толщиной в области входящей и выходящей кромок, что обеспечивает высокие гидродинамические и кавитационные характеристики гребных винтов.

Различия в геометрии профилей показаны на рисунке 14, где представлены профили, которые были построены при равных значениях максимальной толщины и кривизны.

Профили семейства ИК82 соответствовали цилиндрическим сечениям модели ледового винта, описанного в параграфе 2.2, на $r/R = 0.7$ и $r/R = 0.9$.

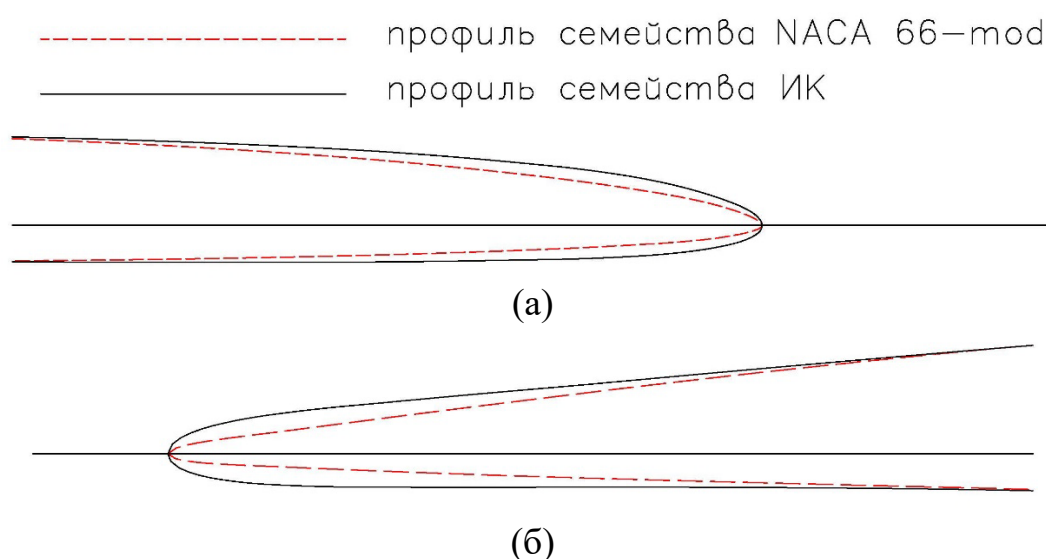


Рисунок 14 – Сравнение профилей: (а) – входящая кромка; (б) – выходящая кромка

Для проведения испытаний в вертикальной гидродинамической трубе были изготовлены модели профилей из оргстекла с размахом крыла 145.0 мм и длиной хорды 150.0 мм. Максимальная толщина и кривизна профилей составляли, соответственно, 8.1 мм и 1.8 мм для $r/R = 0.7$; 4.5 мм и 1.5 мм для $r/R = 0.9$. Профили семейства NACA 66-mod были изготовлены с аналогичными величинами максимальной толщины и кривизны. В таблицах 5 и 6 представлено распределение толщин для профилей, где Y_u – расстояние от хорды до засасывающей стороны профиля, Y_l – расстояние от хорды до нагнетающей стороны профиля.

Таблица 5 – Геометрические характеристики профиля ИК82

r/R = 0.7			r/R = 0.9		
x, мм	Y _u , мм	Y _l , мм	x, мм	Y _u , мм	Y _l , мм
3.75	1.5	1.1	3.75	1.1	0.8
7.50	1.9	1.2	7.50	1.3	0.8
15.00	2.5	1.2	15.00	1.7	0.7
30.00	3.9	1.3	30.00	2.5	0.5
45.00	4.9	1.7	45.00	3.1	0.6
60.00	5.5	2.1	60.00	3.5	0.7
75.00	5.9	2.2	75.00	3.7	0.8
90.00	5.8	2.3	90.00	3.7	0.8
105.00	5.5	2.3	105.00	3.6	0.9
120.00	5.0	2.3	120.00	3.2	1.1
135.00	3.9	2.2	135.00	2.7	1.2
142.50	3.0	1.9	142.50	2.1	1.2
150.00	0.0	0.0	150.00	0.0	0.0

Таблица 6 – Геометрические характеристики профиля NACA 66-mod

r/R = 0.7			r/R = 0.9		
x, мм	Y _u , мм	Y _l , мм	x, мм	Y _u , мм	Y _l , мм
3.75	0.7	0.5	3.75	0.5	0.2
7.50	1.3	0.6	7.50	0.7	0.3
15.00	2.2	0.9	15.00	1.4	0.3
30.00	3.8	1.3	30.00	2.4	0.4
45.00	4.9	1.7	45.00	3.1	0.5
60.00	5.6	2.0	60.00	3.5	0.7
75.00	5.9	2.2	75.00	3.7	0.8
90.00	5.5	2.6	90.00	3.7	0.8
105.00	5.4	2.2	105.00	3.2	0.8
120.00	4.6	2.0	120.00	2.8	0.8
135.00	3.2	1.6	135.00	2.0	0.6
142.50	2.2	1.2	142.50	1.4	0.5
150.00	0.0	0.0	150.00	0.0	0.0

Испытания включали в себя визуализацию потока для профилей с искусственной шероховатостью входящей кромки и без нее. В качестве методов визуализации применялись:

– метод подкрашенной жидкости, заключающийся в том, что через специальные дренажные отверстия в поток на профиле подаются струйки подкрашенной жидкости, которая поступает из емкости, расположенной выше уровня воды в экспериментальной установке;

– метод водородных пузырьков, заключающийся в подаче водородных пузырьков с проволочного катода, расположенного поперек потока над испытуемой моделью, что позволяет наблюдать структуру линий тока при обтекании тела.

Для фиксирования результатов испытаний использовалась высокоскоростная камера MEMRECAM GX-1. Видеосъемка была выполнена при частоте 125 кадров в секунду.

Испытания для обоих профилей были выполнены при углах атаки 2° и 4° и при скорости набегающего потока 0.1 и 0.2 м/с.

Следуя рекомендациям зарубежных источников, описанных в параграфе 2.3, величина шероховатости была выбрана 30 мкм, область покрытия 2.5 % от длины хорды (3.75 мм при длине хорды 150.0 мм).

Фотографии обтекания профилей приведены на рисунках 15 – 18. Полученные результаты позволили выявить следующие особенности течения:

При малом угле атаки 2° (рисунки 15 и 17) поток на лопасти, как и ожидалось, турбулизуется, но не выявлено значительного воздействия шероховатости на структуру течения. Можно отметить лишь несколько более заметное вихреобразование за выходящей кромкой у ледового профиля при наличии на нем шероховатости, в результате чего (рисунок 15) картины течения за выходящей кромкой ледового профиля стали идентичны картине течения за выходящей кромкой профиля NASA 66-mod.

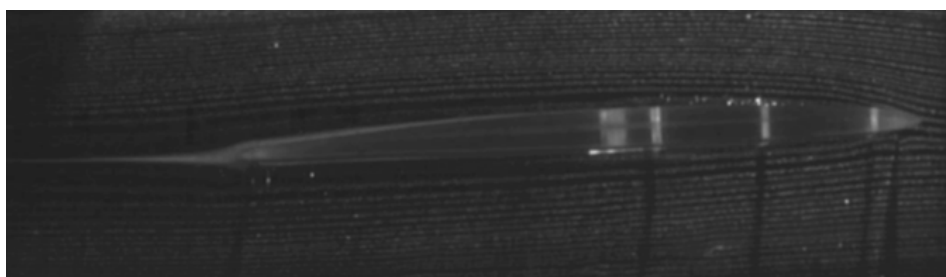
Совершенно другая картина наблюдается при большем угле атаки – 4° , характерном для работы лопасти в зонах наиболее подторможенного потока. Так, на профиле NASA 66-mod с искусственной шероховатостью входящей кромки наблюдается образование вихревых структур с засасывающей стороны (особенно

заметные для более тонкого профиля, соответствующего концевым сечениям лопасти), что хорошо видно на рисунках 16 и 18, а также возникновение возвратного течения в области выходящей кромки (см. рис. 16). На профиле ИК82 проявляются более ярко выраженные достаточно крупные отрывные структуры (особенно явно заметные для более тонких профилей, рис. 18). Это приводит к качественному изменению картины обтекания как на засасывающей стороне профиля, так и в следе за ним.

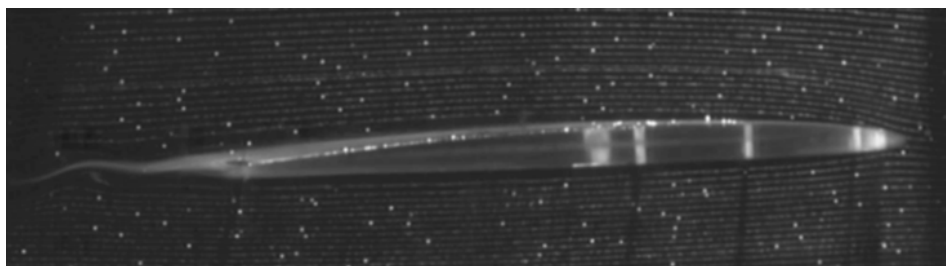
Таким образом, проведенные испытания дают основания сделать следующие выводы:

1. Для профилей типа НАСА 66-mod наличие искусственной шероховатости входящей кромки, турбулизируя поток, не вносит существенного изменения в структуру потока.
2. Влияние шероховатости на поток вблизи входящей кромки ледовых профилей при малых углах атаки, характерных для работы винта в поле скоростей с малой неоднородностью (например для тянущих винтов в пограничном слое корпуса) также невелико и сводится к турбулизации потока.
3. При больших углах атаки, характерных для работы гребного винта в существенно неоднородном потоке (например при установке винта в следе за корпусом), применение шероховатости приводит к существенно различному влиянию на поток для различных профилей: если для НАСА 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 гребных винтов. Можно сказать, что в этом случае полоска шероховатости играет роль не столько турбулизатора, сколько интерцептора, способствующего отрыву потока на профиле.

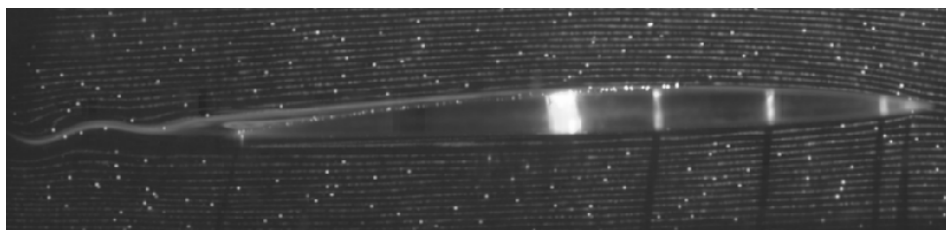
Таким образом, эффект применения искусственной шероховатости входящей кромки существенно зависит от конфигурации профиля и угла атаки, что вызывает необходимость осторожно подходить к ее применению на ледовых гребных винтах, особенно при значительной неоднородности натекающего на гребной винт потока. Проведенный эксперимент позволяет объяснить картины кавитации, полученные на различных установках для среднего гребного винта арктического транспортного судна.



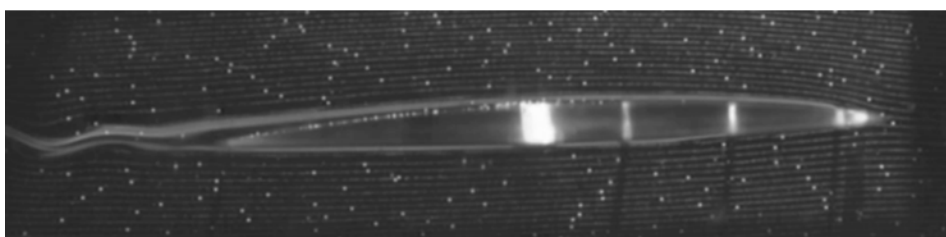
а) профиль ИК82 гладкий



б) профиль ИК82 с шероховатостью входящей кромки

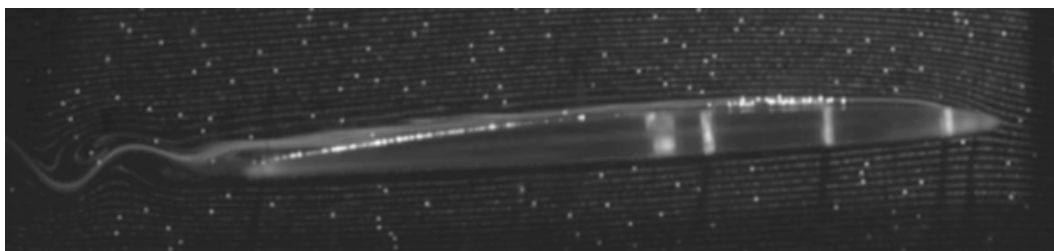


в) профиль NACA 66-mod гладкий

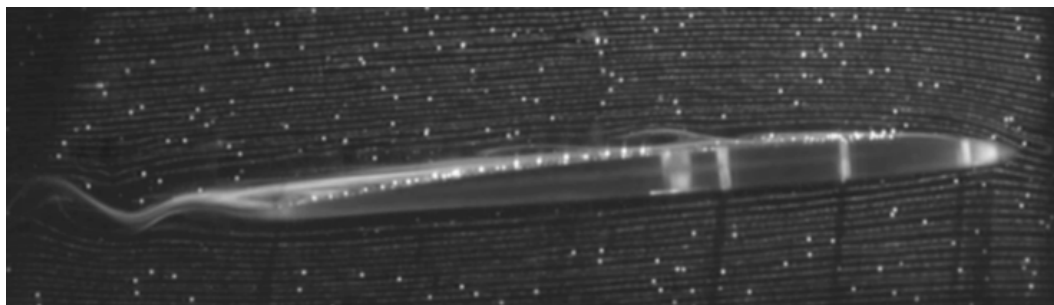


г) профиль NACA 66-mod с шероховатостью входящей кромки

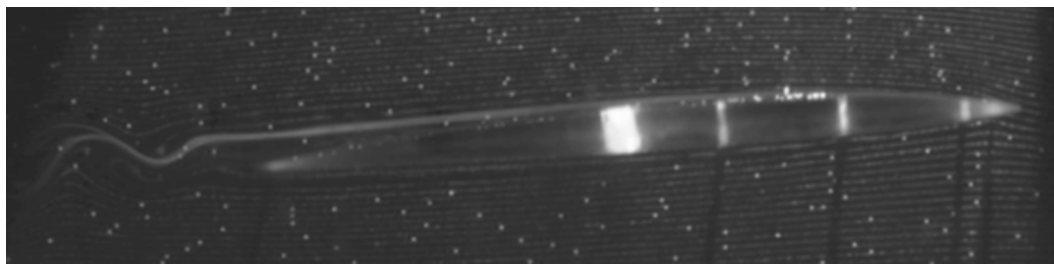
Рисунок 15 – Результаты испытания профилей в вертикальной гидродинамической трубе. Угол атаки 2° $r/R = 0.7$



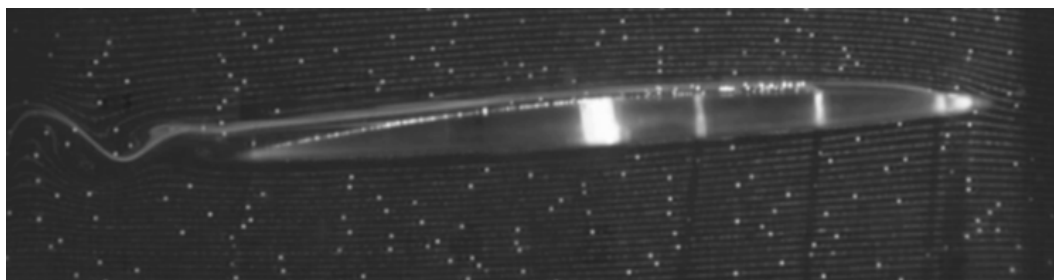
а) профиль ИК82 гладкий



б) профиль ИК82 с шероховатостью входящей кромки

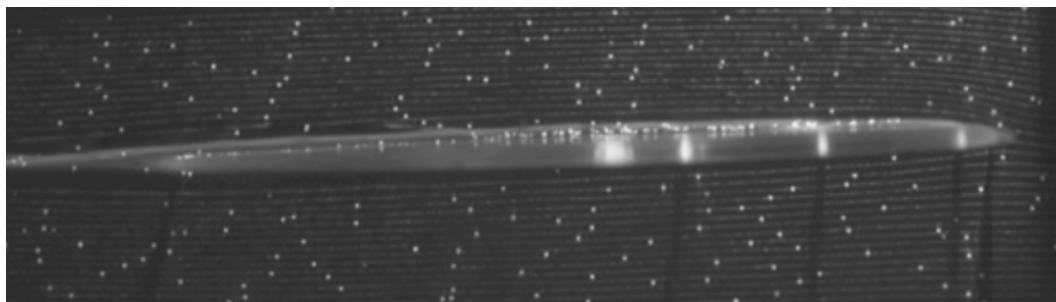


в) профиль NACA 66-mod гладкий

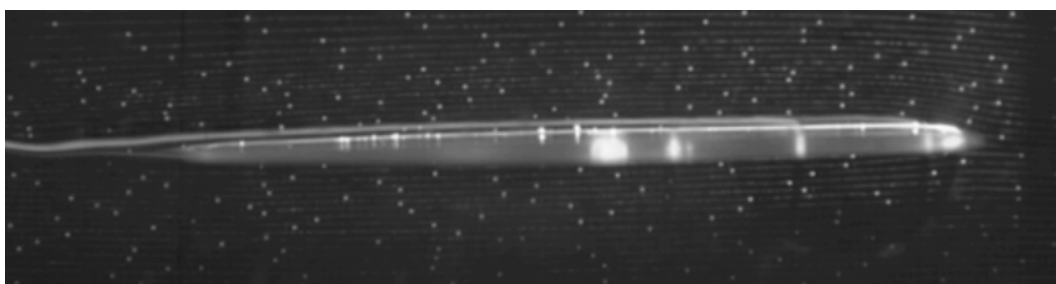


г) профиль NACA 66-mod с шероховатостью входящей кромки

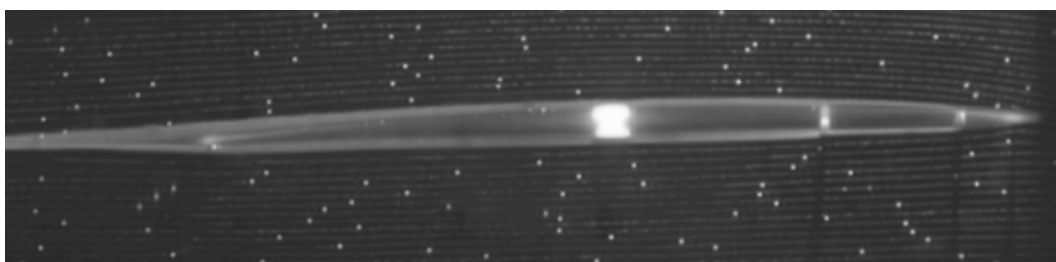
Рисунок 16 – Результаты испытания профилей в вертикальной гидродинамической трубе. Угол атаки 4° $r/R = 0.7$



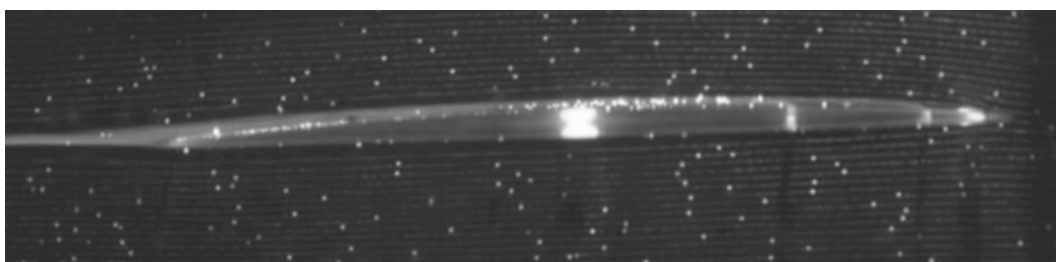
а) профиль ИК82 гладкий



б) профиль ИК82 с шероховатостью входящей кромки

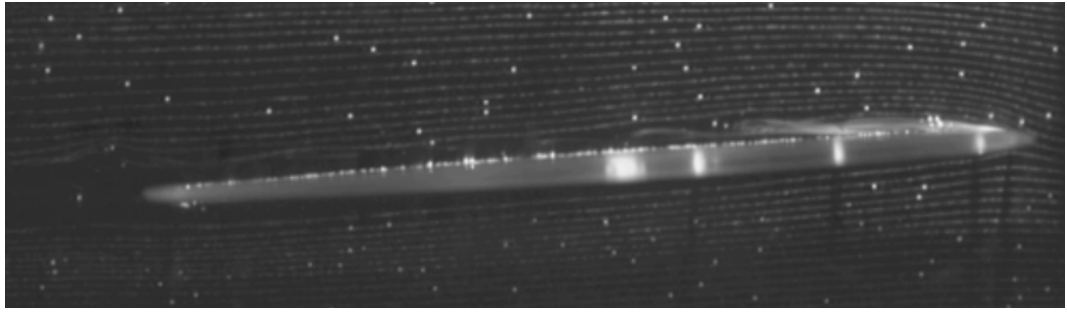


в) профиль NACA 66-mod гладкий

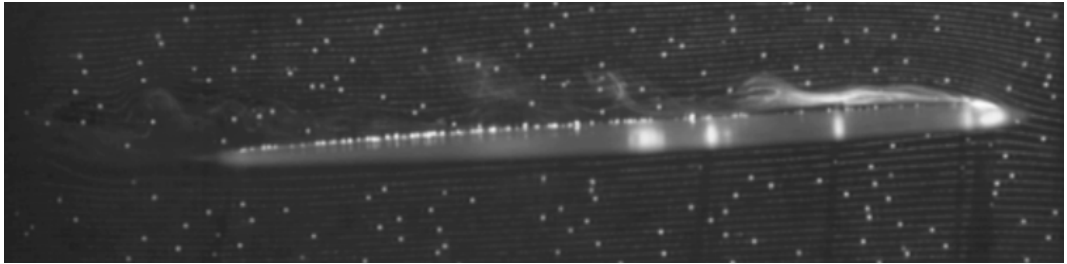


г) профиль NACA 66-mod с шероховатостью входящей кромки

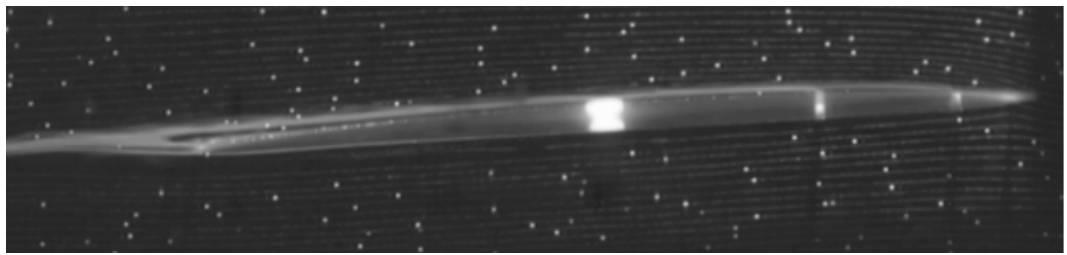
Рисунок 17 – Результаты испытания профилей в вертикальной гидродинамической трубе. Угол атаки 2° $r/R = 0.9$



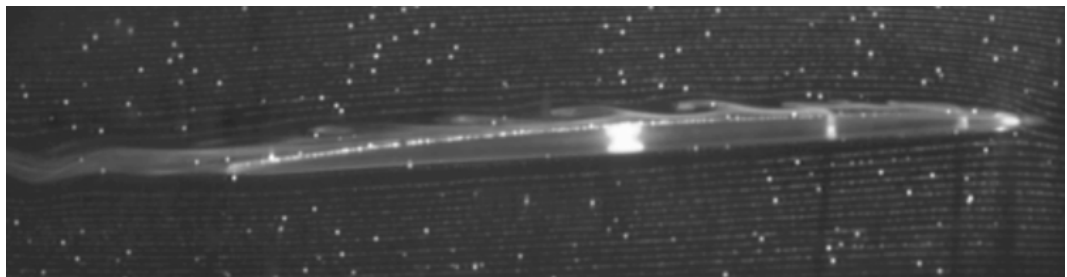
а) профиль И 82 гладкий



б) профиль И82 с шероховатостью входящей кромки



в) профиль NASA 66-mod гладкий



г) профиль NASA 66-mod с шероховатостью входящей кромки

Рисунок 18 – Результаты испытания профилей в вертикальной гидродинамической трубе. Угол атаки 4° $r/R = 0.9$

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И КАВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

3.1 Постановка экспериментов по исследованию влияния шероховатости на характеристики гребных винтов. Результаты визуализации потока на лопастях

Для того, чтобы оценить влияние размеров элементов шероховатости и ширины полосы шероховатости на гидродинамические и кавитационные характеристики гребных винтов, на экспериментальных установках КГНЦ была проведена серия экспериментов на двух моделях гребных винтов различных типов (ледовый винт с симметричным контуром и ледовыми профилями ИК82 и не ледовый винт с саблевидными лопастями, характерными для пассажирских судов) с различными параметрами шероховатости.

Описание и чертеж ледового гребного винта даны в параграфе 1.2. Характеристики гребного винта с саблевидными лопастями приведены в таблице 7, чертеж модели на рисунке 19. В качестве профилировки использовались профили НАСА 66-mod, обтекаемость которых значительно лучше по сравнению с ледовыми профилями ИК82.

Таблица 7 – Основные геометрические характеристики гребного винта быстроходного пассажирского судна в безразмерной форме

	r/R	C/R	C_s/R	X_r/R	E/R	E_c/R	P/R
1	0.200	0.5700	0.0000	-0.0010	0.0883	0.0009	3.0000
2	0.300	0.7047	0.0126	-0.0082	0.0712	0.0156	2.9907
3	0.400	0.8368	0.0094	-0.0150	0.0590	0.0247	2.9604
4	0.500	0.9586	-0.0081	-0.0219	0.0498	0.0286	2.9008
5	0.600	1.0564	-0.0425	-0.0297	0.0440	0.0273	2.8043
6	0.700	1.1121	-0.0955	-0.0394	0.0402	0.0218	2.6615
7	0.800	1.0976	-0.1739	-0.0519	0.0381	0.0136	2.4138
8	0.900	0.9411	-0.3012	-0.0684	0.0365	0.0054	2.0199
9	0.950	0.7289	-0.3976	-0.0790	0.0317	0.0023	1.7754
10	0.975	0.5279	-0.4590	-0.0854	0.0239	0.0010	1.6393
11	1.000	0.0000	-0.5340	-0.0930	0.0000	0.0000	1.4857

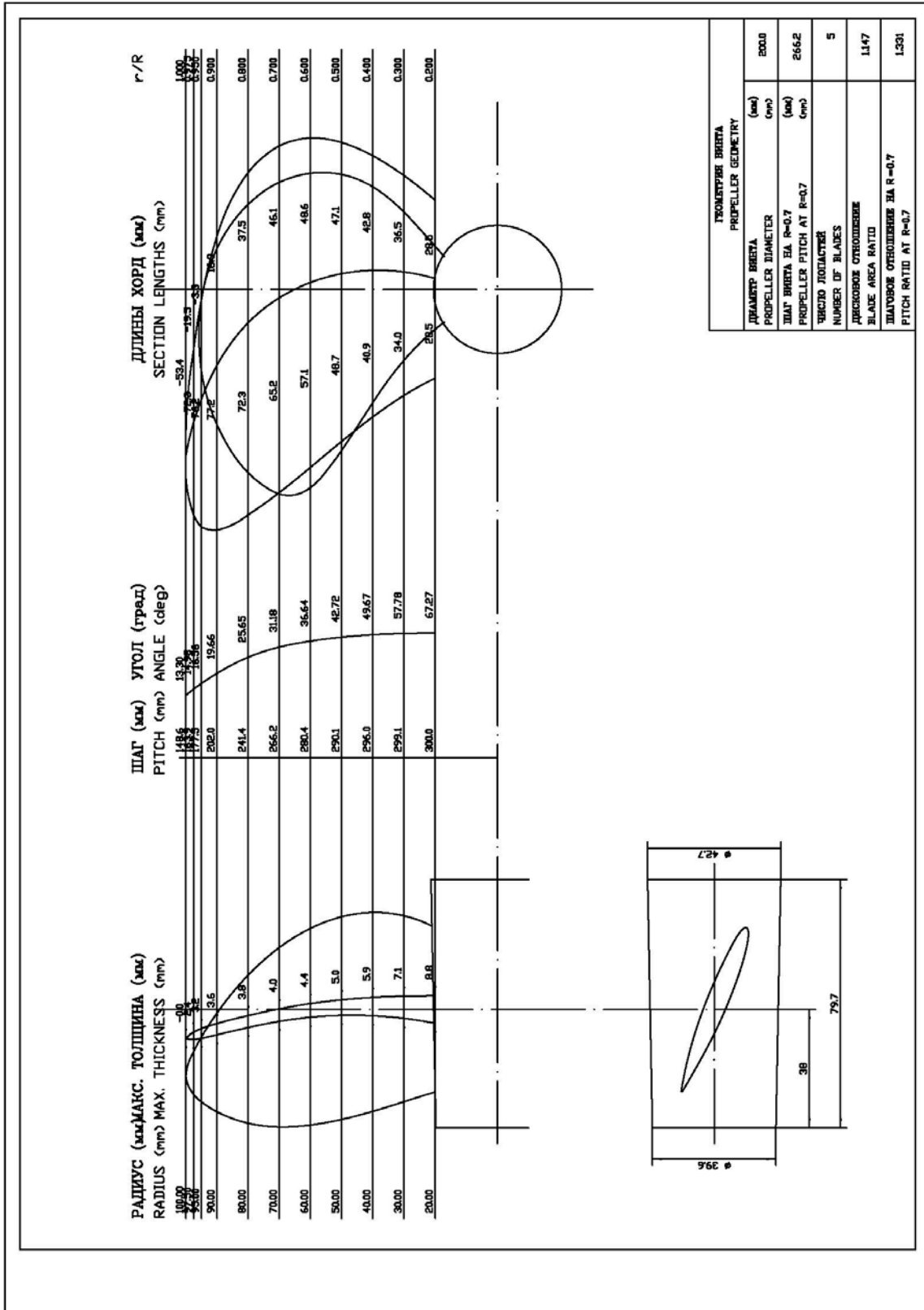


Рисунок 19 – Теоретический чертеж модели гребного винта быстроходного пассажирского судна

Модели испытывались с полосками шероховатости, характеристики которых варьировались следующим образом: было принято 2 размера частиц – 30 мкм (в соответствии с рекомендацией, изложенной в параграфе 2.3) и 3 мкм (для проверки эффекта шероховатости минимального размера). В связи с отсутствием четких сведений о рекомендованной ширине полоски на основании представленной информации в параграфе 2.3, была выбрана ширина полоски, равная 2.5 % длины хорды от входящей кромки для частиц величиной 30 и 3 мкм. Кроме того, для проверки влияния ширины полоски на обоих винтах был испытан вариант с шириной полоски 3.5 % длины хорды от входящей кромки для частиц 30 мкм. Также, исходя из информации представленной в предыдущем параграфе, при испытаниях с шероховатостью 30 мкм плотность покрытия составляла ~50 %. При испытаниях с шероховатостью в 3 мкм область была заполнена полностью, т.к. из-за слишком мелких частиц было невозможно обеспечить равномерное распределение при плотности 50 %. На рисунке 20 в качестве примера показаны лопасти ледового гребного винта с нанесенной шероховатостью.

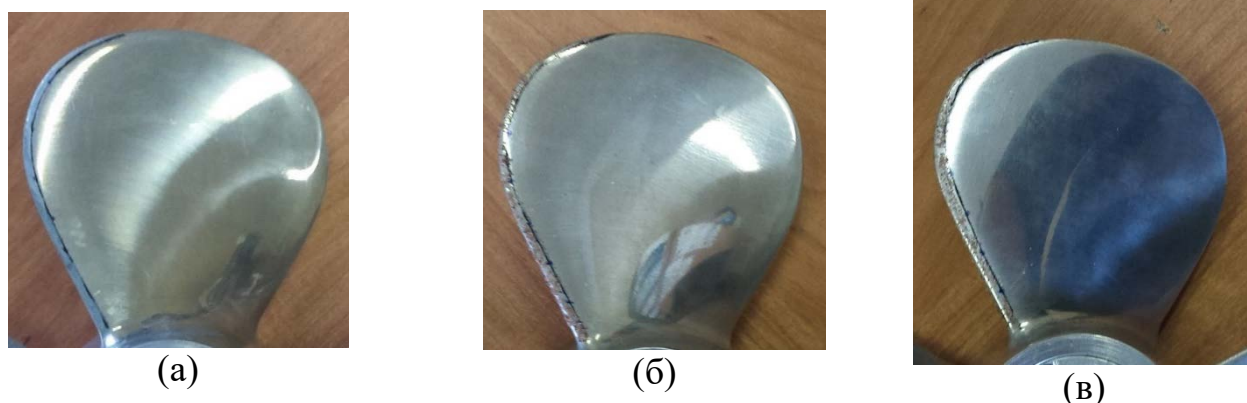


Рисунок 20 – Пример нанесенной шероховатости на лопастях модели ледового гребного винта:

- (а) – шероховатость величиной 3 мкм на полоске шириной 2.5 % от длины хорды
- (б) – шероховатость величиной 30 мкм на полоске шириной 2.5 % от длины хорды
- (в) – шероховатость величиной 30 мкм на полоске шириной 3.5 % от длины хорды

Для оценки влияния искусственной шероховатости на входящей кромке на турбулизацию потока на лопастях были выполнены экспериментальные

исследования в глубоководном опытовом бассейне КГНЦ с применением метода красок, аналогично исследованиям, описанным в параграфе 2.1.

Испытания проводились при $n = 20$ об/с и $J = 0.0$.

Результаты исследований представлены на рисунках 21 – 24.

Как видно из рисунков, при низких оборотах в случае «чистого» гребного винта, особенно с нагнетающей стороны, наблюдается четкий ламинарно-турбулентный переход, который расположен практически на середине лопасти. Величины шероховатости 3 мкм (рисунки 22 и 23) недостаточно для полноценной турбулизации потока, это выражается в изменении угла линий тока на внутренних радиусах с нагнетающей стороны лопасти ($r/R = \sim 0.3 - 0.5$). Однако при увеличении шероховатости до 30 мкм (рисунок 23) весь поток на лопастях имеет турбулентный характер. Так как при длине полосы в 2.5 % уже достигается полностью турбулентное течение, то увеличение области, в случае модели ледового гребного винта, не приводит к значительному влиянию на структуру потока.



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 21 – Линии тока на лопасти ледового гребного винта без применения шероховатости входящей кромки



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 22 – Линии тока на лопасти ледового гребного винта. Полоска шероховатости 3 мкм, шириной 2.5 % от длины хорды.



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 23 – Линии тока на лопасти ледового гребного винта. Полоска шероховатости 30 мкм, шириной 2.5 % от длины хорды



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 24 – Линии тока на лопасти ледового гребного винта. Полоска шероховатости 30 мкм, шириной 3.5 % от длины хорды

Интересная картина наблюдается при обтекании гребного винта быстроходного судна. Результаты испытаний представлены на рисунках 25 – 28. Исследования показали, что в варианте «чистого» гребного винта на внутренних радиусах имеются участки с ламинарным течением и последующим переходом в турбулентное, особенно это хорошо видно на внутренних радиусах с нагнетающей стороны лопасти. Применение шероховатости 3 мкм на полоске длиной 2.5 % не вносит особенных изменений в структуру линий тока. Довольно сильное влияние шероховатости наблюдается при переходе на величину 30 мкм. Так, при длине полоски 2.5 % на верхних радиусах ($r/R = 0.8 - 1.0$) с засасывающей стороны наблюдается образование вихревых структур. При увеличении длины полоски до 3.5 % начинают образовываться отрывные течения на внутренних радиусах и происходит увеличение интенсивности вихря на концевых радиусах. Т.е. можно сказать, что в случае гребного винта с несимметричным контуром и с профилями типа *NACA 66-mod* существует сильное влияние как высоты шероховатости, так и размера полоски. Полученные данные хорошо согласуются с результатами испытаний профилей в вертикальной гидродинамической трубе (см. параграф 2.4). Так, при обтекании профилей *NACA 66-mod* с углом атаки 4° наблюдалось полностью ламинарное обтекание, а при испытаниях с применением шероховатости (30 мкм и длина полоски 2.5 %) возникало сильное вихреобразование для профиля, соответствующего $r/R = 0.9$, в то время как для профиля, эквивалентного сечению на $r/R = 0.7$ такое вихреобразование наблюдалось в существенно меньшей степени.



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 25 – Линии тока на лопасти гребного винта быстроходного судна без применения шероховатости входящей кромки



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 26 – Линии тока на лопасти гребного винта быстроходного судна.
Полоска шероховатости 3 мкм, шириной 2.5 % от длины хорды



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 27 – Линии тока на лопасти гребного винта быстроходного судна.
Полоска шероховатости 30 мкм, шириной 2.5 % от длины хорды



Засасывающая сторона



Нагнетающая сторона

Рисунок 28 – Линии тока на лопасти гребного винта быстроходного судна.
Полоска шероховатости 30 мкм, шириной 3.5 % от длины хорды

Таким образом, по результатам испытаний можно сделать следующие
выводы:

1. Результаты испытаний ледового гребного винта показали, что в случае «чистого» гребного винта с нагнетающей стороны лопасти наблюдается явно выраженный ламинарно-турбулентный переход. С засасывающей стороны лопасти имеются только небольшие участки ламинарного

течения в области корневых сечений, и для их устранения достаточно применения любой величины шероховатости.

2. Применение на ледовом гребном винте шероховатости 3 мкм на полоске длиной 2.5 % позволило практически полностью убрать ламинарные участки на модели гребного винта быстроходного судна, однако остались небольшие участки ламинарного течения на внутренних радиусах. В тоже время при высоте турбулизатора 30 мкм весь поток на лопасти является турбулентным.
3. Результаты испытаний гребного винта быстроходного судна без шероховатости показали, что с нагнетающей стороны лопасти ламинарные участки наблюдаются только до $r/R = 0.7$, в отличие от гребного винта ледового судна, где ламинарный участок с нагнетающей стороны имеет большую протяженность.
4. Применение шероховатости 3 мкм при длине полоски 2.5 % позволило практически полностью убрать ламинарные участки на модели гребного винта быстроходного судна, однако все равно остаются небольшие области на внутренних радиусах. Шероховатость величиной 30 мкм полностью устраняет участки с ламинарным течением, однако возникает вихрь на конце лопасти. Увеличение полоски шероховатости до 3.5 % от длины хорды приводит к увеличению интенсивности вихревых структур с засасывающей стороны лопасти.
5. Таким образом, можно сказать, что оптимальными характеристиками шероховатости являются частицы, создающие шероховатость величиной 30 мкм на полоске длиной 2.5 %. Такие характеристики шероховатости позволяют турбулизировать поток на обеих моделях гребных винтов, при этом на гребном винте с саблевидными лопастями и профилями НАСА такая шероховатость не приводит к образованию отрывных явлений.

3.2. Влияние искусственной шероховатости на гидродинамические характеристики моделей гребных винтов

Для оценки влияния искусственной шероховатости на гидродинамические характеристики гребных винтов при испытаниях в свободной воде в опытовом бассейне, исходя из результатов, полученных в параграфе 2.4 и 3.1, была выбрана шероховатость величиной 30 мкм и длиной полоски 2.5 % с плотностью заполнения ~50 %. Дополнительно для оценки сопротивления создаваемого турбулизатором, было принято решение провести испытания с полоской шероховатостью такой же величины, но с плотностью заполнения ~100 %, а также с полоской шероховатости величиной 3 мкм на области 2.5 % (как и в предыдущем параграфе, плотность нанесения была 100 %).

Гидродинамические испытания гребных винтов проводились в глубоководном опытовом бассейне КГНЦ. Результаты испытаний моделей ледового гребного винта и гребного винта быстроходного судна (чертеж и таблица с основными геометрическими характеристиками приведены в параграфах 1.2 и 3.1 соответственно) представлены на рисунках 29 и 30.

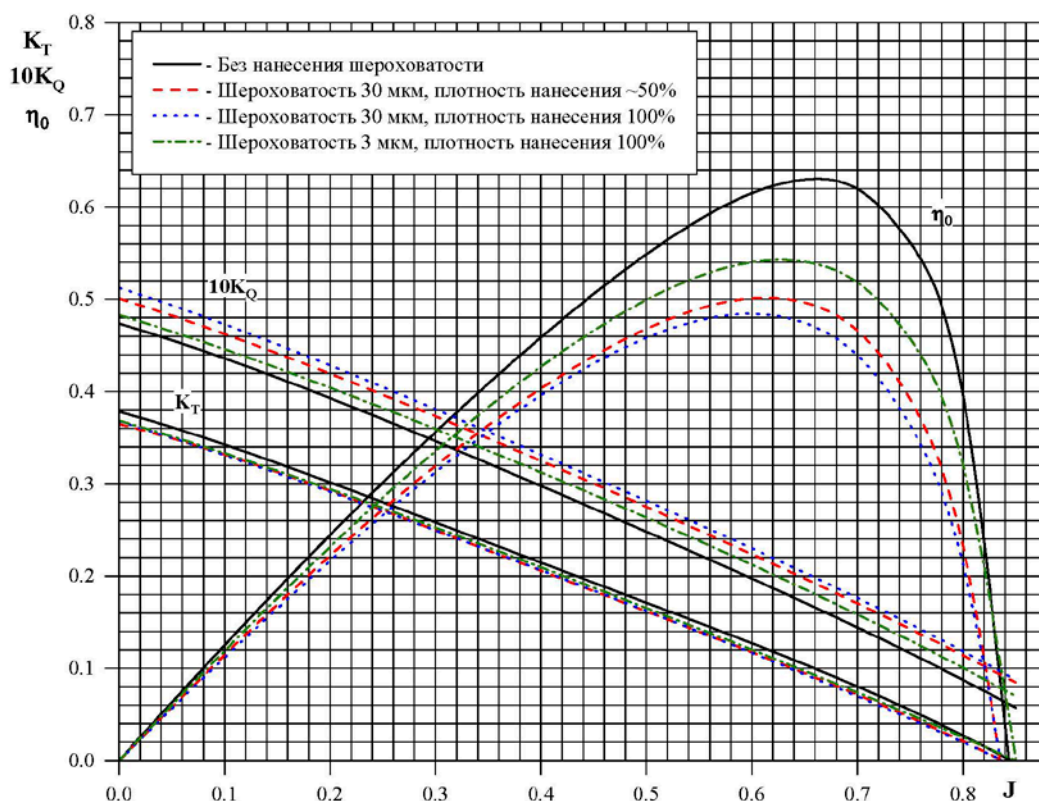


Рисунок 29 – Сводный график кривых действия модели ледового гребного винта

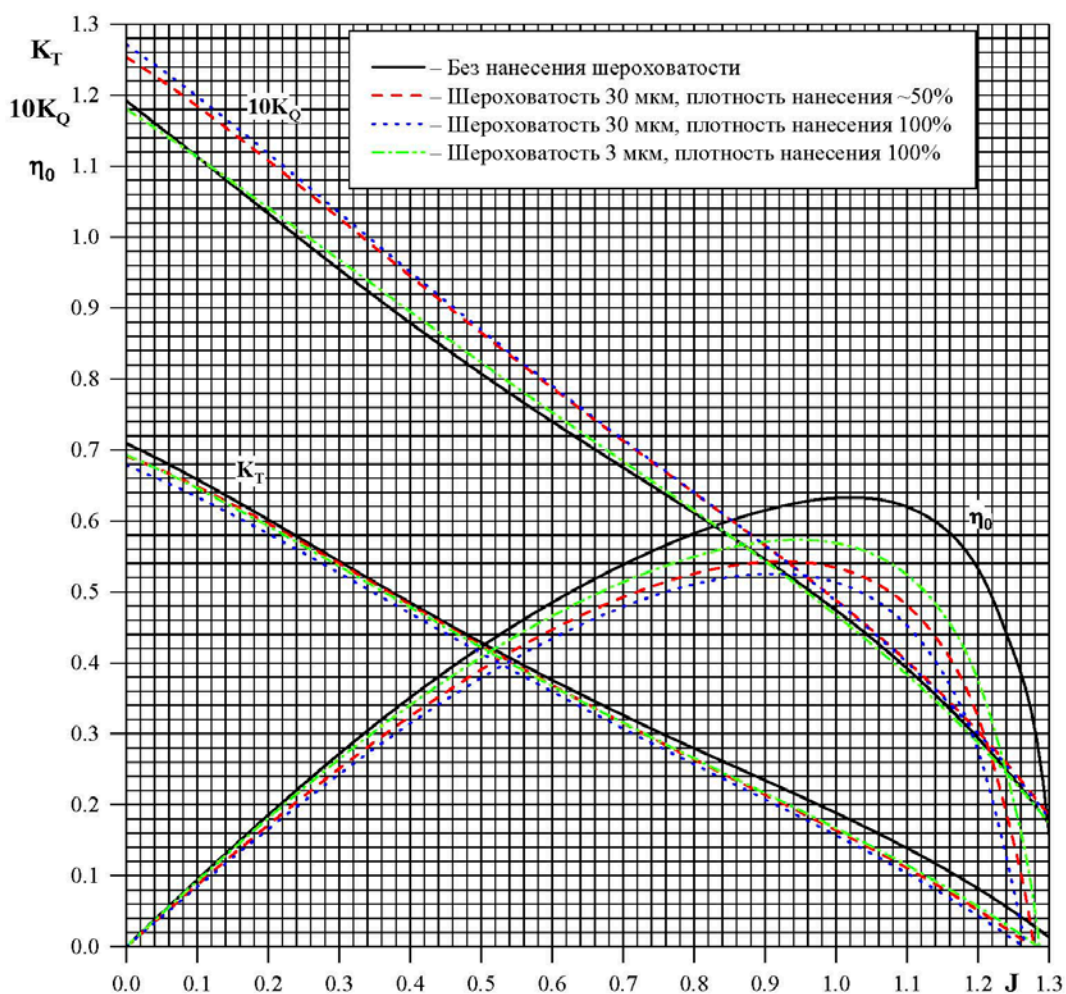


Рисунок 30 – Сводный график кривых действия модели гребного винта быстроходного пассажирского судна

Результаты испытаний как ледового, так и не ледового гребного винта показали, что установка искусственной шероховатости у входящей кромки оказывает влияние как на коэффициент упора, так и (в существенно большей степени) на коэффициент момента. В терминах влияния на гидродинамические характеристики профилей можно сказать, что искусственная шероховатость оказывает незначительное влияние на подъемную силу, но приводит к значительному росту силы сопротивления.

Однако есть и различия между гребными винтами двух типов. В случае ледового гребного винта увеличение момента происходит фактически эквидистантно, а в случае пятилопастного гребного винта быстроходного судна различие между величиной момента «чистого» и гребного винта с шероховатостью уменьшается с ростом поступи. Можно предположить, что в данном случае при

малых значениях поступи, то есть при больших углах атаки, на лопастях в большей степени проявляются последствия изменения режима обтекания лопастей (турбулизация). Нельзя исключать, что такое поведение кривых действия не ледового винта связано с наличием саблевидности лопастей и образованием сильного вихря на малых поступях, который во многом определяет картину обтекания.

Анализ величин изменения КПД винтов показывает, что для ледового винта в зависимости от способа нанесения и характера шероховатости падение КПД находится в пределах от 15 до 24 %. Для не ледового винта это падение существенно меньше, и не превышает 18 % своей величины.

Влияние на КПД определяется не только калибром шероховатости, но и плотностью заполнения полосы корундом. Так, изменение плотности заполнения от 50 до 100 % приводит к дополнительному снижению КПД на 2 – 3 %. Чтобы исключить это влияние, необходимо в дальнейшем принять определенную плотность заполнения полосы шероховатости. В соответствии с принятыми рекомендациями, разработанными MARIN, с тем чтобы максимально унифицировать применяемые параметры шероховатости с зарубежной практикой (что особенно важно при разработке экспортных винтов), рекомендовано в дальнейшем обеспечивать плотность заполнения области около 50 %.

Проведенные исследования показывают, что результаты испытаний, а соответственно, и результаты прогнозирования характеристик натуральных гребных винтов, существенно зависят от того, как и какая шероховатость будет нанесена. Это вносит элемент произвола в обработку результатов пропульсивных характеристик гребных винтов. Поэтому применяемые в отечественной практике методики испытаний по определению гидродинамических характеристик без применения шероховатости следует считать наиболее корректными, и применение искусственной шероховатости при гидродинамических испытаниях моделей однозначно не может быть рекомендовано.

3.3 Влияние искусственной шероховатости на кавитационные характеристики моделей гребных винтов

Как было показано в главе 1, применение искусственной шероховатости при гидродинамических и кавитационных испытаниях приводит к изменению результатов по сравнению с испытаниями гладких винтов. Кроме того, в главе 2 показано, что влияние искусственной шероховатости зависит от типа винта, в частности, по результатам испытаний профилей выявлено качественное отличие влияния шероховатости при больших углах атаки для профилей ледовых винтов. Поэтому исследование влияния искусственной шероховатости на кавитационные качества проводилось для тех же двух типов гребных винтов (ледовые и с аблевидными лопастями), что и при исследовании влияния шероховатости на гидродинамические характеристики.

Ледовый гребной винт уже прошел цикл кавитационных испытаний, описанных в параграфе 1.2. Его дополнительные испытания были необходимы для того, чтобы коррелировать результаты ранее проведенных испытаний с результатами испытаний, проводимых по методикам кавитационных испытаний в КГНЦ при проектировании гребных винтов, в частности, с определением кавитационной диаграммы по началу кавитации. Методика кавитационных испытаний описана в параграфе 1.1.

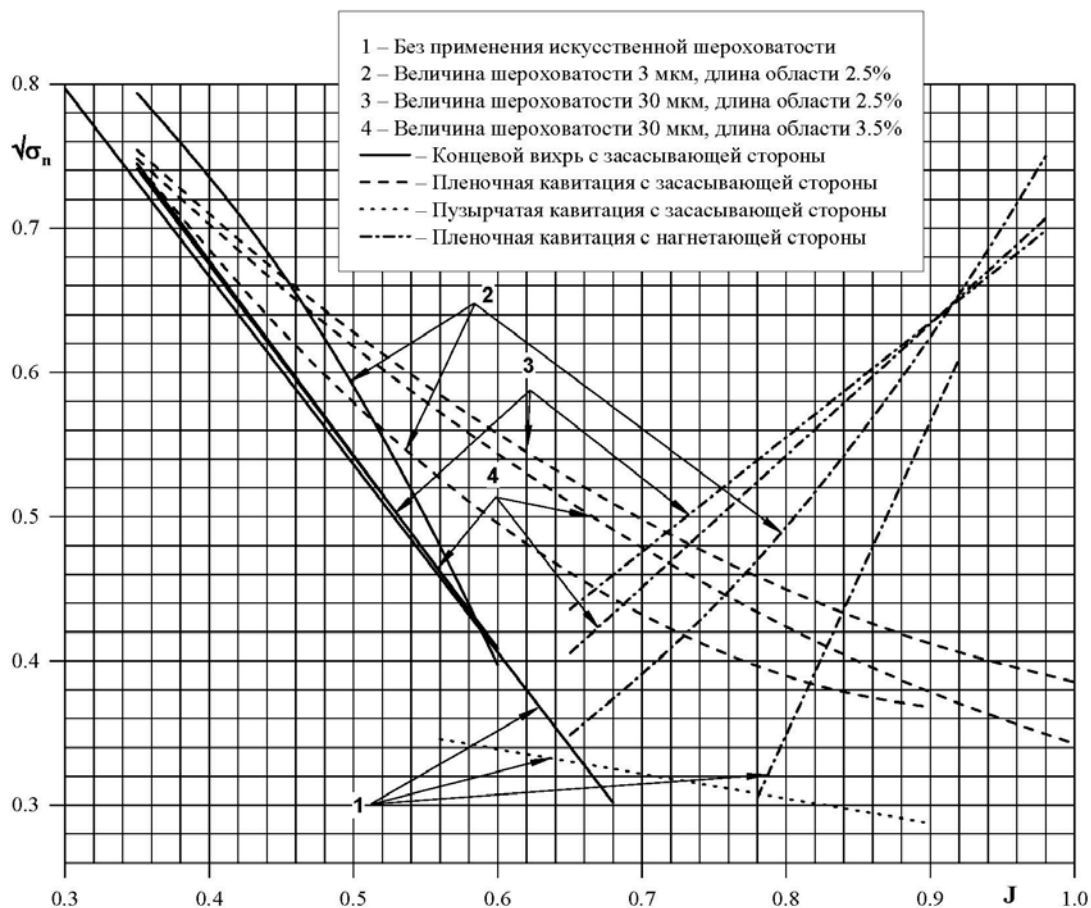
В этом же параграфе уже обращалось внимание на то, что задачей отечественных методик кавитационных испытаний, наряду с прогнозированием кавитационных характеристик гребных винтов, является получение информации, необходимой для корректировки гребных винтов в ходе их проектирования, в то время как зарубежные центры в основном концентрируются только на прогнозировании кавитационных характеристик гребных винтов на спецификационных режимах.

Обе модели были испытаны по указанной «отечественной» методике в следующих вариантах:

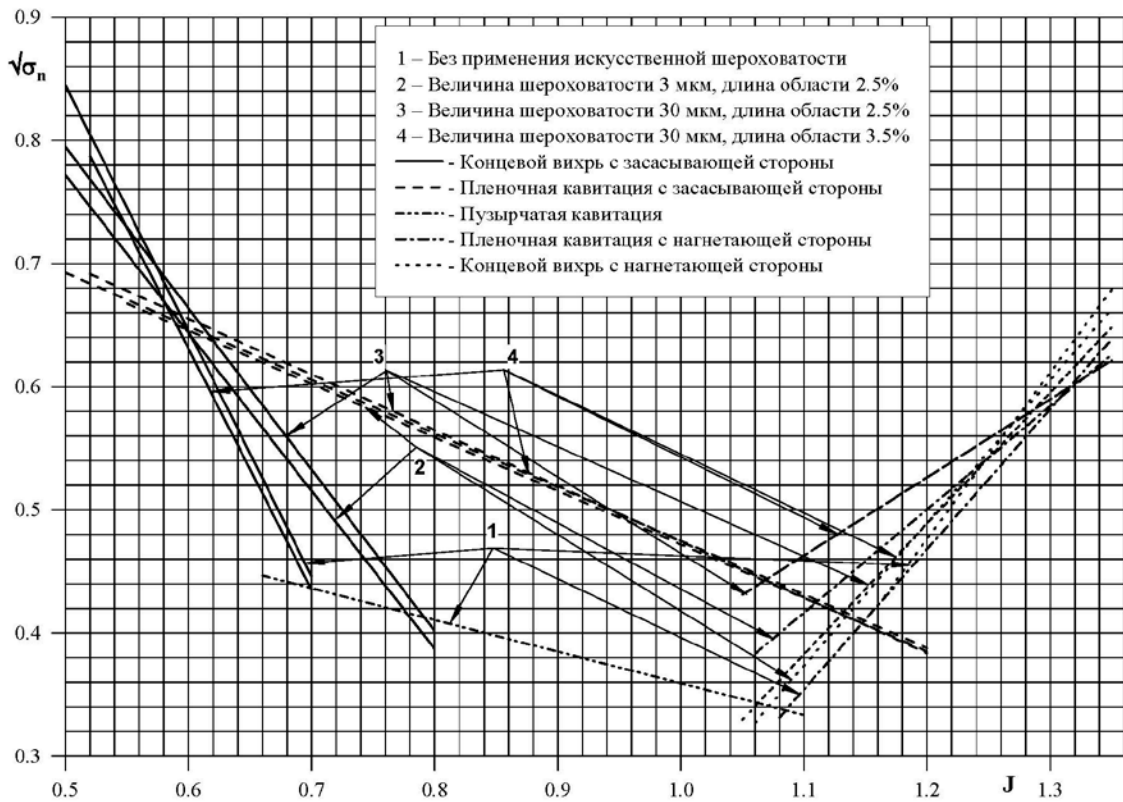
- без нанесения корундовых частиц на входящую кромку;
- с нанесением корундовых частиц:

- размером 3 мкм на область 2.5 % длины хорды;
- размером 30 мкм на область 2.5 % длины хорды;
- размером 30 мкм на область 3.5 % длины хорды.

Полученные кавитационные диаграммы для ледового и не ледового гребного винта представлены на рисунках 31 и 32. Фотографии различных типов кавитации на лопастях обеих моделей представлены на рис 33 – 36.



Рисунков 31 – Результаты квазиакустических испытаний модели ледового гребного винта



Рисунков 32 – Результаты квазиакустических испытаний модели гребного винта пассажирского быстроходного судна

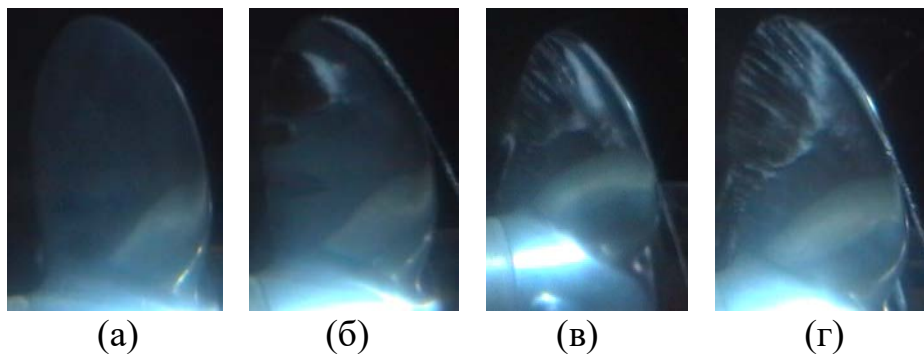


Рисунок 33 – Кавитация на лопастях ледового гребного винта при $J = 0.512$, $\sqrt{\sigma_n} = 0.409$:

(а) – без шероховатости; (б) – с шероховатостью $\mu = 3$ мкм на области 2.5 %; (в) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 2.5 %; (г) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 3.5 %

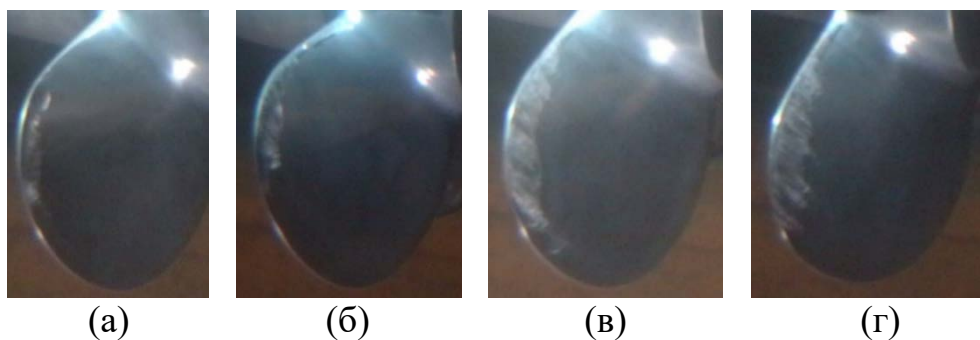


Рисунок 34 – Кавитация на лопастях ледового гребного винта при $J = 0.887$,
 $\sqrt{\sigma_n} = 0.489$:

(а) – без шероховатости; (б) – с шероховатостью 3 мкм на области 2.5%; (в) – с шероховатостью $\mu=30$ мкм на области 2.5%; (г) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 3.5%

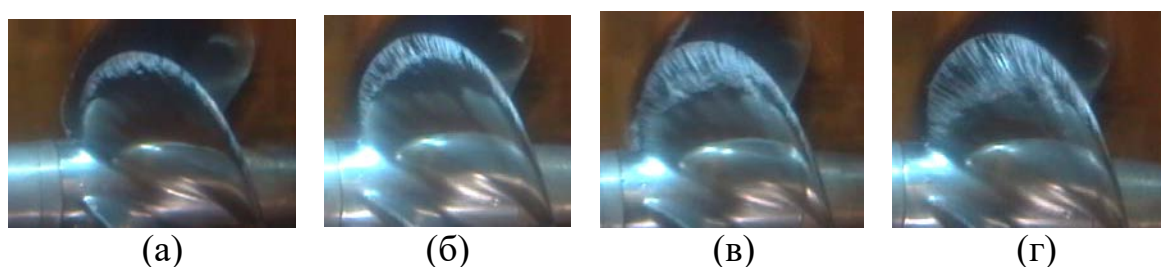


Рисунок 35 – Кавитация на лопастях ледового гребного винта при $J = 0.512$,
 $\sqrt{\sigma_n} = 0.409$:

(а) – без шероховатости; (б) – с шероховатостью $\mu = 3$ мкм на области 2.5 %; (в) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 2.5 %; (г) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 3.5 %

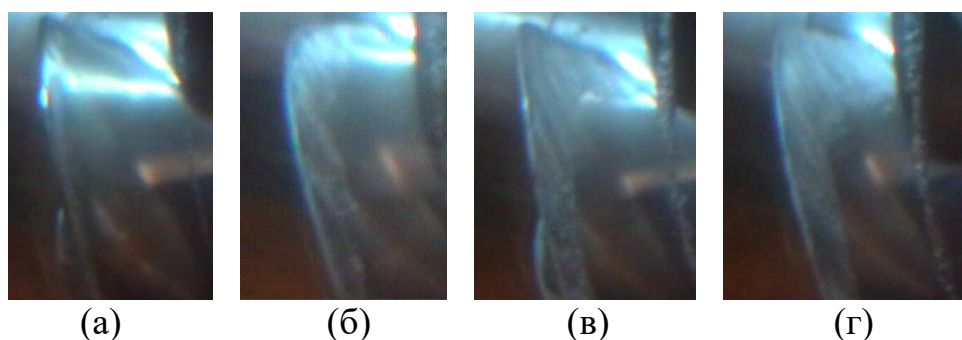


Рисунок 36 – Кавитация на лопастях ледового гребного винта при $J = 1.199$,
 $\sqrt{\sigma_n} = 0.355$:

(а) – без шероховатости; (б) – с шероховатостью $\mu = 3$ мкм на области 2.5 %; (в) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 2.5 %; (г) – с шероховатостью $\mu = 30$ мкм на области 3.5 %

Как видно из приведенных диаграмм, левая ветвь кавитационных корзин, соответствующая кавитации на засасывающей стороне лопасти, для обоих гребных винтов при наличии шероховатости существенно отличается от левой ветви,

полученной при кавитационных испытаниях гребных винтов 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. Аналогичным оказалось влияние шероховатости на кавитационную корзину не ледового гребного винта. Несмотря на значительно большее дисковое отношение ($A_E/A_O = 1.147$), произошло аналогичное изменение кавитационной корзины.

Фотографии кавитации с нагнетающей и засасывающей стороны показали, что в случае ледового гребного винта (рисунки 33 и 34) наблюдается прямая зависимость между параметрами шероховатости и размером пленочной кавитации с засасывающей стороны. Также необходимо заметить, что на лопастях без шероховатости кавитация практически отсутствует. Однако шероховатость 30 мкм вне зависимости от размеров полоски приводит к примерно одинаковой картине с нагнетающей и засасывающей стороны. Стоит отметить, что форма полученной каверны на модели ледового гребного винта аналогична полученной при испытаниях, описанных в параграфе 1.2. При анализе картин кавитации гребного винта быстроходного судна (рисунки 35 и 36) видно, что все виды шероховатости приводят к примерно одинаковой каверне как с засасывающей, так и с нагнетающей стороны.

Следует обратить внимание, что картины развитой кавитации на лопастях, особенно при низких значениях поступи, слабо зависят от параметров примененной искусственной шероховатости, особенно для ледовых профилей. Это подтверждает выводы главы 2, что при больших углах атаки полоска шероховатости играет роль не турбулизатора, а интерцептора – срывника, за которым образуется кавитирующая отрывная зона, размеры которой показывают вероятные размеры каверн, в том числе и в натуральных условиях.

Таким образом, изучение кавитации при наличии шероховатости дает дополнительную важную информацию о возможной картине развитой частичной кавитации на лопастях. При этом форма кавитации за полоской шероховатости

практически всегда – кромочная пленка, концевой вихрь при этом не носит преобладающий характер, как на гладких винтах.

Анализ результатов проведенных испытаний позволяет рекомендовать испытания с искусственной шероховатостью входящих кромок лопастей как испытания, дополнительные к испытаниям гладких винтов и направленные на изучение развитой частичной кавитации на ходовых режимах. При этом для унификации результатов с зарубежными центрами рекомендуется принимать параметры шероховатости величиной 30 мкм и длиной полосы 2.5 % от длины хорды, а в качестве численного результата таких испытаний, характеризующих кавитационные качества гребного винта – левую ветвь кавитационной диаграммы «кавитации за шероховатостью», характеризующую момент начала кавитации за полоской шероховатости на засасывающей стороне. Далее эта ветвь должна быть сопоставлена с режимами работы (принцип расчетов рабочих режимов гребного винта описан в параграфе 1.1), как это показано на рисунке 37.

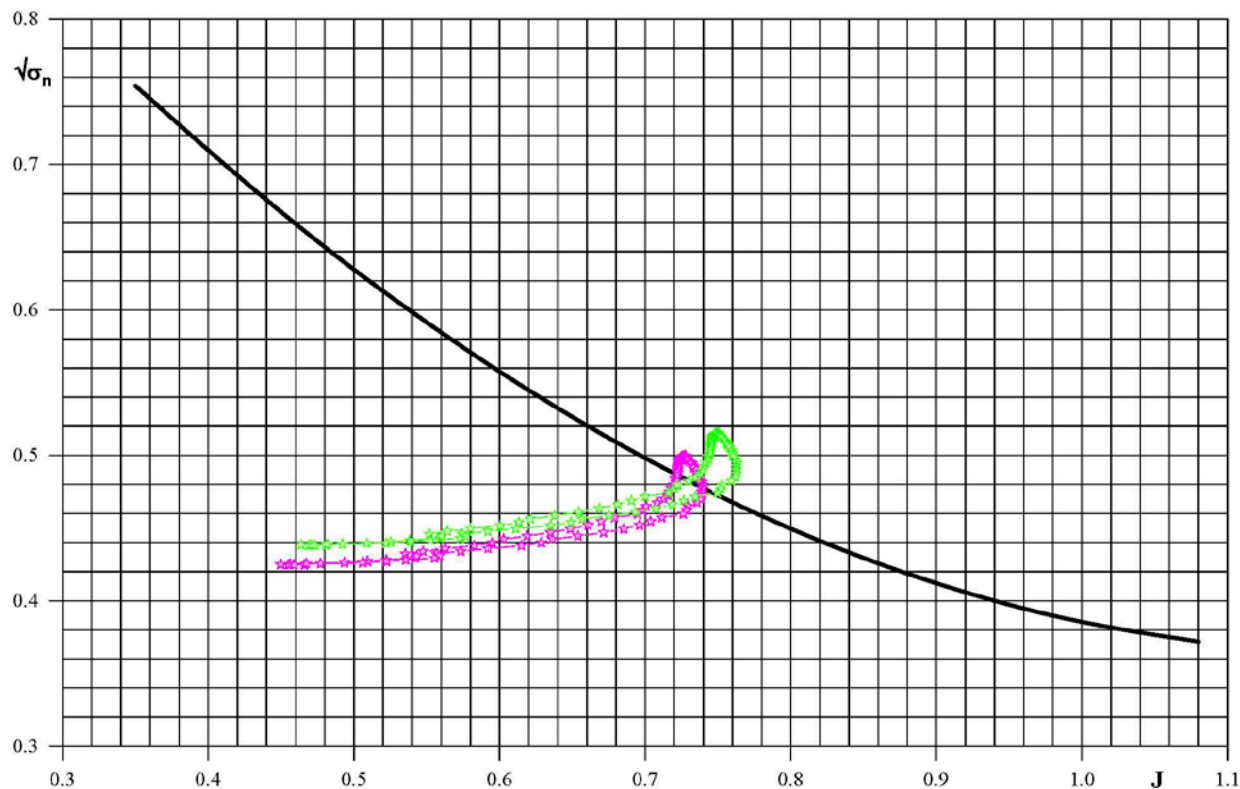


Рисунок 37 – Пленочная кавитация за шероховатостью для ледового гребного винта

Испытания по этой методике позволяют сопоставить гребные винты по кромочной кавитации с засасывающей стороны при испытаниях с шероховатостью, и таким образом при проектировании выбрать, какой из вариантов гребных винтов лучше с точки зрения развитой частичной кавитации на ходовом режиме. Тогда, в случае обнаружения опасности сильной пленочной кавитации на гребном винте с искусственной шероховатостью, проектант должен стремиться максимально опустить эту ветвь «кавитации за шероховатостью» (при одинаковых параметрах шероховатости).

Таким образом, для отечественной практики выявлена целесообразность дополнить методику «квазиакустических» кавитационных испытаний обязательными испытаниями шероховатых винтов.

В главе 4 эта методика была применена для улучшения кавитационных качеств при проектировании нового гребного винта с улучшенными кавитационными характеристиками для арктического транспортного судна.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО РАЗВИТОЙ КАВИТАЦИИ НА ХОДОВЫХ РЕЖИМАХ

4.1. Анализ возможности снижения развитой кавитации на лопастях ледовых гребных винтов на ходовых режимах

Как уже отмечалось, для ледовых гребных винтов применяются специальные профили (семейства ИК80 и ИК82). Эти профили были специально разработаны исходя из требований Российского Регистра, согласно которым вводится нормирование толщин лопастей на расстоянии 5 % от кромок с тем, чтобы обеспечить прочность при работе во льдах. Это вносит определенные сложности с достижением необходимых гидродинамических и кавитационных характеристик при проектировании. По сравнению с традиционными гидродинамическими профилями, профили сечений ледовых гребных винтов можно охарактеризовать как более «тупые», и поэтому при их обтекании имеют место существенно более ярко выраженные пики разрежений, что приводит к более сильной кавитации при движении судна со спецификационной скоростью в свободной воде.

Одним из традиционных методов борьбы с кавитацией на засасывающей стороне лопасти является увеличение дискового отношения, что приводит к снижению удельной гидродинамической нагрузки на лопасти. Кроме того, увеличение длины хорды лопасти позволяет при сохранении прочности уменьшить относительную толщину за счет сохранения соотношения $\frac{e^2}{C}$, где e – максимальная толщина профиля, C – длина хорды профиля. Однако, как отмечено в [1], увеличение дискового отношения на 0.1 приводит к снижению КПД на 1 – 2 %, что при ведущейся в настоящее время борьбе за повышение энергоэффективности судна может оказаться неприемлемым.

Также к традиционным методам улучшения кавитационных качеств относится такое изменение шага и кривизны, которое позволяет более точно расположить кавитационную «корзину» относительно диапазона изменения мгновенной поступи за оборот гребного винта (иными словами, гребной винт перепроектируется, чтобы подвинуть кавитационную корзину вдоль оси поступи,

рис. 3). Этот прием традиционно является наиболее мощным инструментом при проектировании, исходя из условия максимального отдаления начала кавитации в сторону больших скоростей движения судна.

Для проверки суммарной эффективности этих традиционных методов была спроектирована и изготовлена модель ледового гребного винта № 2 (под ледовым гребным винтом № 1 понимается модель, исследования которой описаны в предыдущих главах). Геометрия ледового винта № 2 представлена на рис. 38 и в таблице 8. Ледовый гребной винт № 2 являлся равноупорным с гребным винтом № 1 на спецификационном ходовом режиме. Дисковое отношение гребного винта было существенно увеличено с 0.593 у гребного винта № 1 до 0.700 у гребного винта № 2. Кавитационные испытания модели без шероховатости, результаты которых представлены на рисунке 39, показали, что в целом традиционный подход позволяет добиться увеличения запаса по кавитации с засасывающей стороны при стандартных испытаниях «чистого» гребного винта в кавитационной трубе. На рисунке 40 приведены результаты испытаний с шероховатостью, которые продемонстрировали, что изменения, внесенные в геометрию гребного винта, приводят также к определенному улучшению кавитационной картины на засасывающей стороне (так, при поступи 0.5 параметр кавитации «за шероховатостью» снизился с 0.63 до 0.52). Однако при этом КПД в районе максимума снизился на 0.04 (около 6 %), в районе ходовой поступи ($J = 0.6$) – примерно на 0.025, то есть на 4 % (результаты гидродинамических испытаний гребных винтов № 1 и № 2 в опытовом бассейне сопоставлены на рисунке 41). Такие потери КПД при работе на чистой воде для современного транспортного судна следует признать недопустимо большими (в настоящее время идет борьба даже за 1 % КПД).

Таблица 8 – Изменение геометрических характеристик гребного винта № 2 относительно гребного винта № 1 в процентах

	R	$\Delta C/R, \%$	$\Delta E/R, \%$	$\Delta E_c/R, \%$	$\Delta P/R, \%$
1	0.300	-0.17	-3.00	0.00	1.73
2	0.350	7.64	-5.19	25.34	1.71
3	0.400	13.04	-6.89	20.50	1.28
4	0.500	18.54	-7.99	13.13	-0.28
5	0.600	19.70	-8.03	15.23	-1.72
6	0.700	19.25	-8.21	21.75	-2.45
7	0.800	20.17	-8.49	31.22	-2.45
8	0.900	20.00	-8.00	46.69	-2.49
9	0.950	17.99	-5.62	56.00	-2.98
10	0.975	18.00	-3.83	57.53	-3.39
11	1.000	0.00	0.00	0.00	-3.93

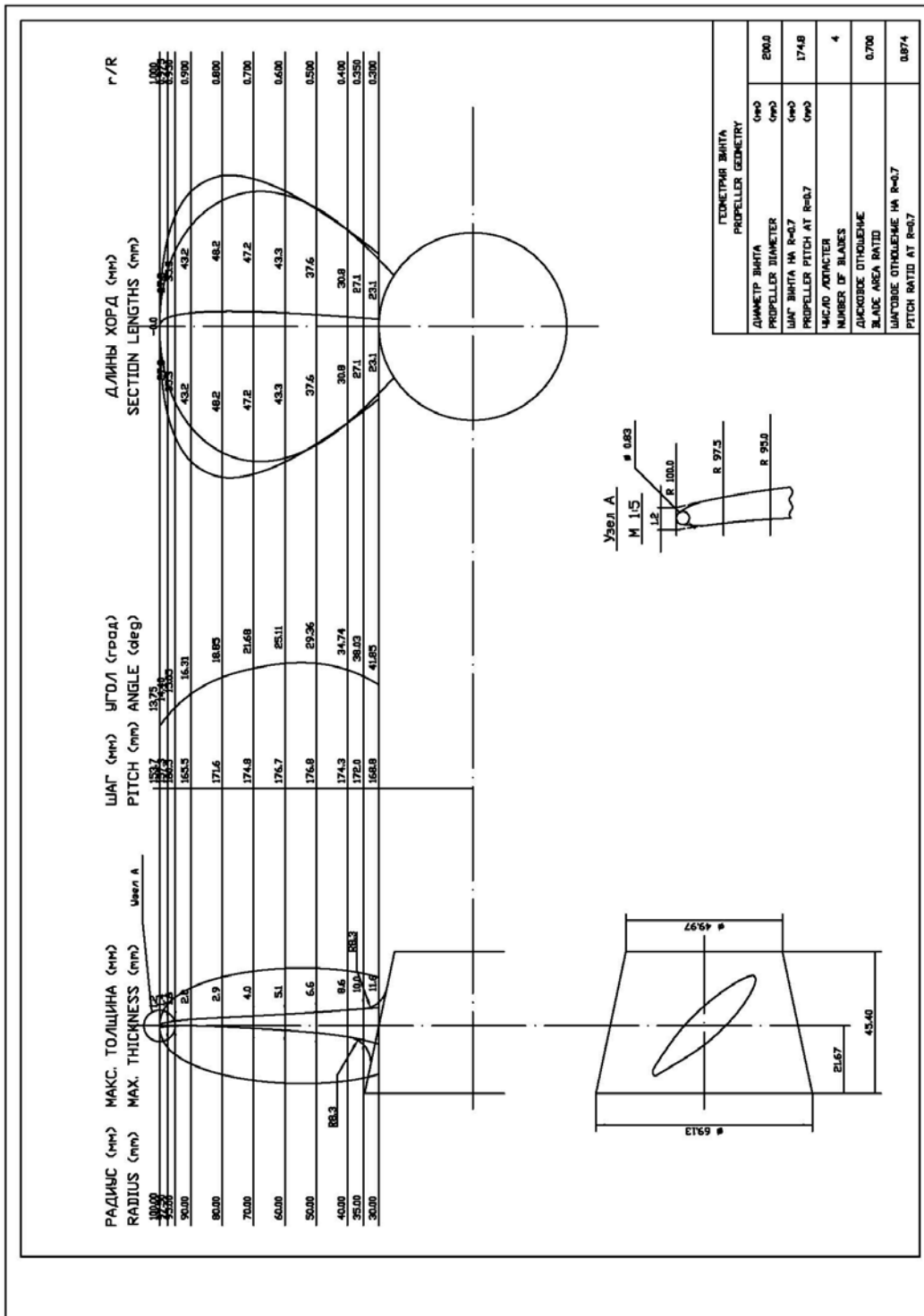


Рисунок 38 – Теоретический чертеж модели гребного винта № 2

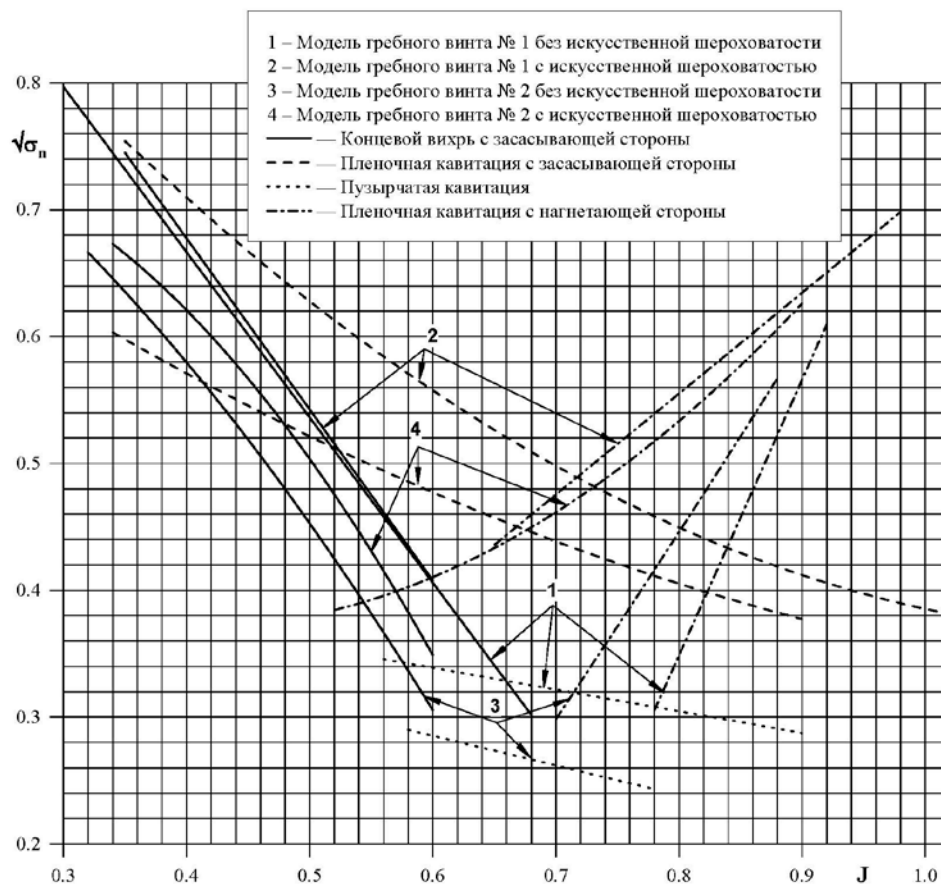


Рисунок 39 – Результаты кавитационных испытаний моделей гребных винтов № 1 и № 2 с применением искусственной шероховатости входящей кромки и без нее

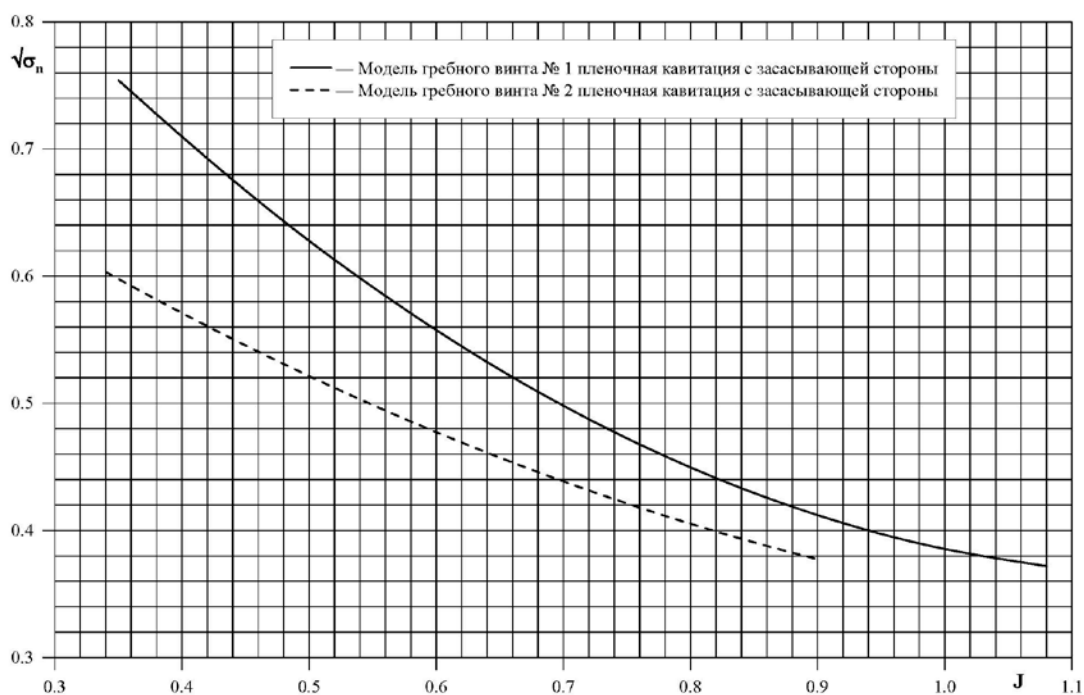


Рисунок 40 – Кавитационная диаграмма пленочной кавитации за шероховатостью при испытании моделей гребных винтов № 1 и № 2

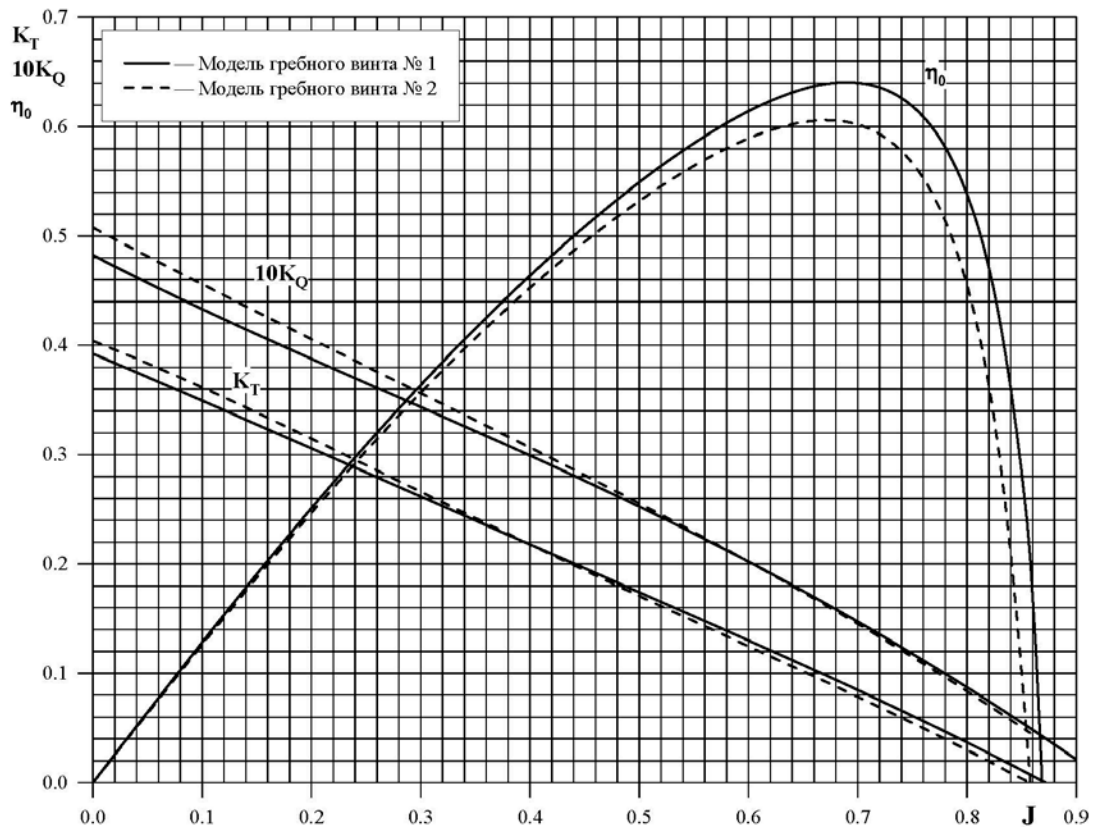


Рисунок 41 – Сравнение результатов гидродинамических испытаний моделей гребных винтов № 1 и № 2 в свободной воде

Таким образом, проведенные испытания модели № 2 показали, что при использовании традиционных методов, применяемых при проектировании гребных винтов для решения задачи отдаления начала кавитации лопастей в сторону больших скоростей хода, имеет место некоторое улучшение характеристик развитой кавитации (снижение ветви «кавитация за шероховатостью»), однако оно сопровождается существенным снижением КПД, прежде всего из-за необходимости значительного увеличения дискового отношения. Поэтому для улучшения характеристик развитой кавитации необходима разработка новых подходов.

В связи с этим необходимо напомнить, что 80-х годах XX века в мире появился ряд работ К.В. Александра и его учеников [42, 43], в которых рассматривалась возможность расчетной оптимизации формы профиля для решения задачи отдаления начала кавитации путем изменения локальной кривизны вблизи входящей кромки профиля, снизив углы натекания у его носика.

В настоящей работе было решено применить указанный подход для улучшения характеристик развитой кавитации. При этом, в отличие от работ [42, 43], где для разработки новых профилей, адаптированных под неоднородное поле скоростей натекающего потока конкретного рассматриваемого судна применялись достаточно приближенные методы вихревой теории, в настоящей работе в процесс проектирования профилей были введены расчеты вязкого обтекания профилей с использованием современных методов вычислительной гидродинамики (методы решения уравнений Навье-Стокса в приближении Рейнольдса – RANS методы). Такие методы позволяют уловить отрывные явления при обтекании лопастей ледовых гребных винтов. То есть в настоящей работе предложено с помощью методов компьютерной гидродинамики целенаправленно проектировать профили цилиндрических сечений лопастей для снижения развитой кавитации на засасывающей стороне с последующей проверкой результата по разработанной скорректированной экспериментальной методике на моделях с шероховатостью. При этом необходимо было не только снизить проявления развитой кавитации с засасывающей стороны лопасти, но и, одновременно, в максимальной степени сохранить гидродинамические характеристики, что достигалось сохранением дискового отношения (длин хорды сечений).

Принципиально важным при таком методе является обеспечение максимально точного соответствия направления носика профиля и натекающего потока на заданном режиме (рисунок 42). Решение данной задачи компьютерными методами должно на первой стадии включать в себя определение углов атаки профиля в составе лопасти гребного винта (на каждом радиусе) при его работе в неоднородном поле скоростей, в частности, в зоне с максимальной подторможенностью потока – в верхнем положении лопасти. На второй стадии предлагалось в ходе серии расчетов выбрать для каждого радиуса гребного винта такую конфигурацию профиля, которая обеспечивала бы существенное снижение кавитации при максимальном угле атаки профиля на данном радиусе при работе гребного винта в неоднородном потоке. При этом специальные расчеты должны контролировать отсутствие кавитации с нагнетающей стороны при прохождении

лопастью участков с максимальной мгновенной поступью $(J = \frac{J_V \cdot \overline{V_x}(\bar{r}, \theta)}{1 - \frac{J_V \cdot \overline{V_\tau}(\bar{r}, \theta)}{\pi \cdot \bar{r}}})$, как правило, это зоны с максимальными осевыми скоростями и наличием большого тангенциального скоса потока.

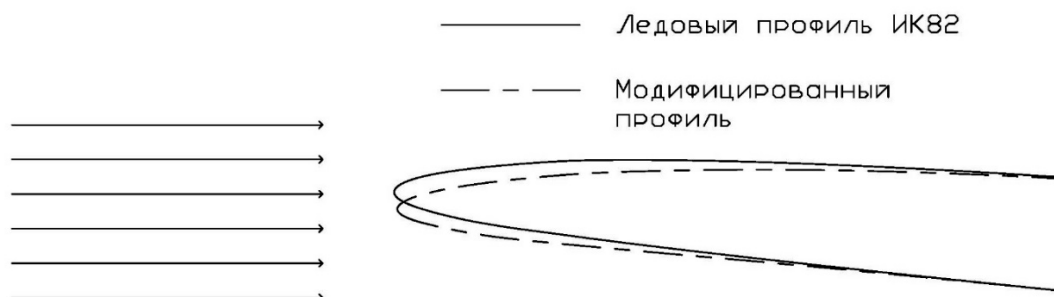


Рисунок 42 – Схема модификации профилей

Таким образом, данный подход позволяет уйти от понятия «стандартная профилировка» и разрабатывать улучшенные профили для каждого проекта гребного винта. В качестве основного винта для оптимизации была выбрана геометрия модели ледового гребного винта № 1 без изменения дискового отношения – параметра, в наибольшей степени влияющего на изменение КПД.

4.2. Основные положения RANS метода расчета обтекания профилей

Расчет вязкого обтекания профилей различных радиусов гребного винта проводился в программном комплексе Star-CCM+. Ниже описана математическая модель и основные принципы, используемые в Star-CCM+ при расчете профилей цилиндрических сечений.

1. Основные уравнения метода

Система уравнений неразрывности и движения в случае несжимаемой вязкой жидкости с постоянной динамической вязкостью μ записывается следующим образом [28]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0; \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \left(\nabla \cdot \vec{V} \right) \vec{V} = -\text{grad}(\bar{p}) + \mu \nabla^2 \vec{V} + \text{Div}(\tau_t), \quad (4.2)$$

где ρ – плотность; V – скорость; p – давление; τ_t – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, $\tau_{tij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$.

Для определения связи между турбулентными пульсациями скорости и параметрами течения, как правило, применяются походы, основанные на гипотезе Буссинеска, которая заключается в определении тензора напряжений Рейнольдса аналогично определению вязких напряжений в модели несжимаемой жидкости:

$$\tau_t = 2\mu_t \bar{S}; \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (4.3)$$

где \bar{S} – тензор скоростей деформации осредненного движения.

В (4.3) предполагается пропорциональность турбулентных напряжений градиентам средней скорости. Турбулентная вязкость μ_t , не является свойством жидкости, а зависит от характера течения.

Благодаря введению турбулентной вязкости уравнение движения (4.2) может быть переписано в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \left(\nabla \cdot \frac{\vec{v}}{V} \right) \vec{v} = -\text{grad}(\bar{p}) + \mu \nabla^2 \vec{v} + \text{Div}(2\mu_{\text{eff}} \vec{S}), \quad (4.4)$$

где $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ – эффективная вязкость.

В рамках данной теории замыкание системы сводится к вычислению величины турбулентной вязкости.

В качестве модели турбулентности использовалась SST модель Ментера [74 – 76], которая формулируется в терминах k - ω модели. Данная модель представляет собой «гибрид» между k - ω и k - ε моделями – при удалении от стенки происходит переход от одной модели к другой. Где $\varepsilon \sim \frac{k^{3/2}}{l}$ – скорости диссипации кинетической энергии; $\omega \sim \frac{k^{1/2}}{l}$ – частоте пульсации энергосодержащих вихрей.

Система уравнений данной модели имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) = P_k - \rho \beta^* \omega k; \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) = \rho \frac{\gamma}{\mu_t} P_k - \rho \beta \omega^2 + \sigma_d \rho D_{k\omega} \cdot (1 - F_1). \quad (4.6)$$

Замыкающие соотношения:

$$\mu_t = \min \left(\mu_t^0, \frac{0.31 \rho k}{Q F_2} \right) = \frac{0.31 \rho k}{\max(0.31 \omega, Q F_2)}, \mu_t^0 = \frac{\rho k}{\omega}, Q = \sqrt{2 S^2}; \quad (4.7)$$

$$F_2 = \text{th}(\arg_2^2), \arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09 \omega d}, \frac{500 v}{d^2 \omega} \right); \quad (4.8)$$

$$F_1 = \text{th}(\arg_1^4), \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega d}, \frac{500 v}{d^2 \omega} \right) \cdot \frac{500 v}{D_{k\omega} d^2} \right]; \quad (4.8)$$

$$\widetilde{D}_{k\omega} = \max(D_{k\omega}, 10^{-20}), D_{k\omega} = (\nabla k) \cdot (\nabla \omega) / \omega; \quad (4.9)$$

$$P_k = \min(P_k^0, 10 \beta^* \rho k \omega), P_k^0 = 2 \mu_t S^2. \quad (4.10)$$

Выбор k - ω и k - ε :

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2, \varphi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta\}. \quad (4.11)$$

Константы модели:

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega1} = 0.5, \beta_1 = 0.075;$$

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828;$$

$$\beta^* = 0.09, \sigma_d = 2\sigma_{\omega2}, \gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \sigma_{\omega} k^2 / \sqrt{\beta^2}. \quad (4.12)$$

Граничные условия на стенке имеют вид

$$k_W = 0, \omega_W = \frac{60\nu}{\beta(\Delta y_1)^2} = \frac{800\nu}{(\Delta y_1)^2}. \quad (4.13)$$

2. Выбор граничных условий

Для расчетов была построена прямоугольная расчетная область (рис. 43). Размеры расчетной области выбирались таким образом, чтобы возмущения потока от профиля не доходили до границ области. Задача решалась в двумерной постановке.

На рисунке 43 показаны граничные условия. На входной границе задавалось условие по скорости (velocity-inlet), интенсивность турбулентности 0.01, отношение турбулентной вязкости 10. На выходящей границе – давление (pressure outlet). На верхней и нижней границе было выбрано условие симметрии (symmetry plane).

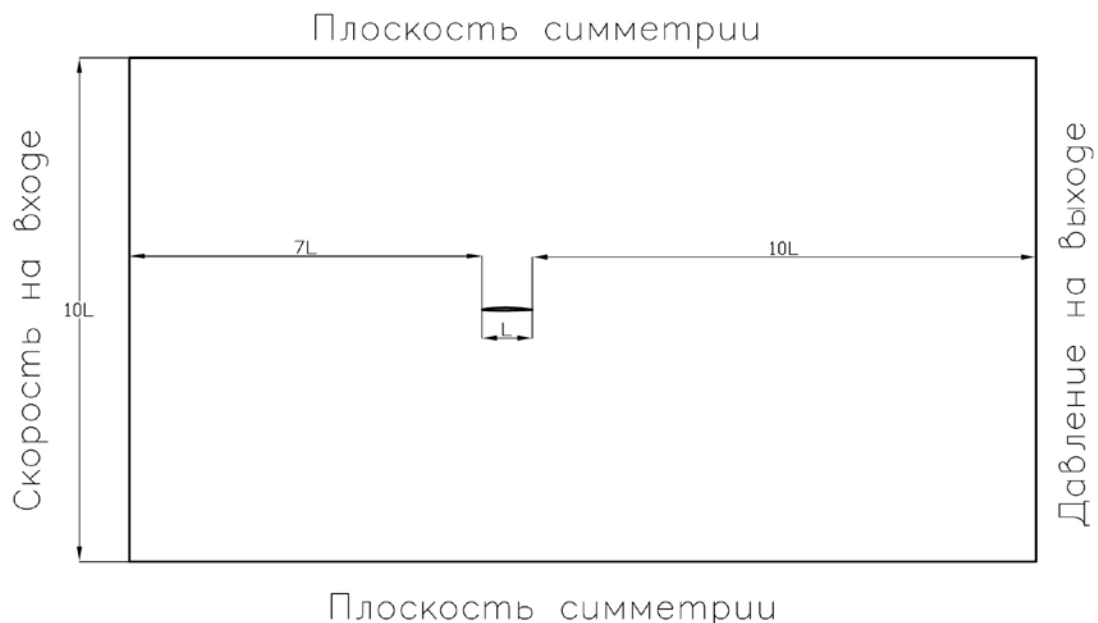


Рисунок 43 – Размеры расчетной области

В качестве атмосферного давления (опорное давление) задавалась величина в одну атмосферу (101325 Па), плотность и динамическая вязкость воды принимались равными $\rho = 997.561 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 8.8871 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

3. Выбор параметров расчетной сетки

Расчетная сетка была построена в программном комплексе Star-CCM+. Для построения была выбрана модель «направленная сетка» (directed mesh). Принцип работы данного сеточного генератора заключается в разбиении геометрии на одной поверхности расчетной области на блоки (рисунок 44) и задании числа разбиений вдоль граней блоков.

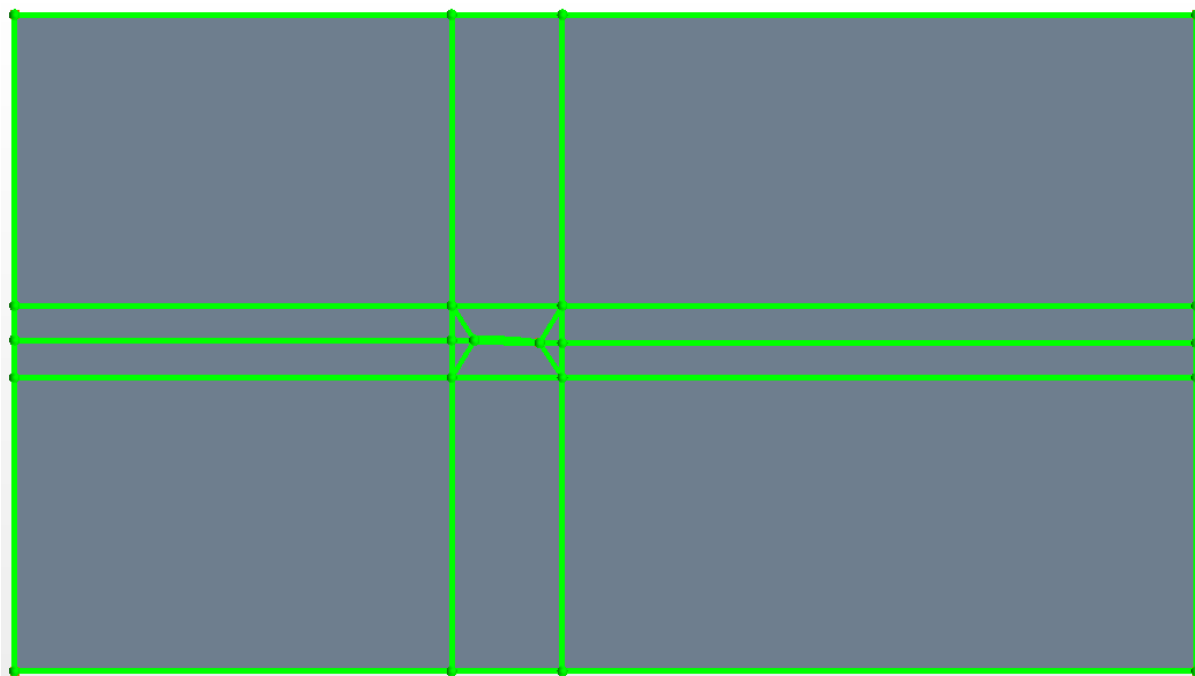


Рисунок 44 – Пример структуры блоков

Полученная сетка (рисунок 45) проецируется на противоположенную поверхность. Таким образом, за счет контроля числа разбиений и контроля размеров ячейки в начале и конце граней блоков данный метод позволяет построить расчетную сетку с хорошим качеством ячеек.

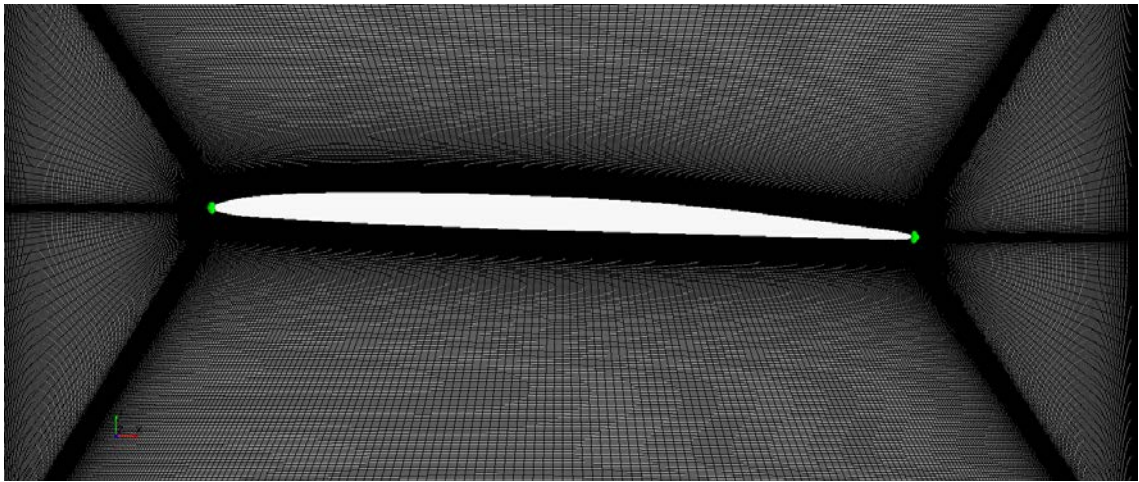


Рисунок 45 – Расчетная сетка

4. Верификация и проверка на сеточную независимость

Первоначально, перед проведением расчетов, необходимо проверить достоверность получаемых результатов.

Для проведения анализа были взяты данные для верификации [90] профиля NASA 0012.

В таблице 9 представлены результаты вычислений на различных вычислительных сетках и сравнение результатов с данными из [90].

Таблица 9 – Результаты верификации профилей

	C_x	C_y	$\Delta C_x, \%$	$\Delta C_y, \%$
Данные для верификации	0.00758	0.64953		
Сетка 1	0.00739	0.63985	2.5	1.5
Сетка 2	0.00751	0.64597	0.9	0.6

Таким образом наиболее оптимальная расчетная сетка для дальнейших расчетов – сетка № 2, которая имеет 422500 элементов и дает результат с отклонением не больше 1 %, как по величине коэффициента подъемной силы, так и по величине коэффициента силы сопротивления.

4.3 Расчетное проектирование гребного винта с улучшенными кавитационными характеристиками по развитой кавитации

Дальнейшее развитие метода проектирования гребных винтов с улучшенными характеристиками по развитой кавитации проводилось применительно к гребному винту № 1. При этом, как было отмечено выше, с целью максимального сохранения КПД такие характеристики как, дисковое отношение, контур лопасти, распределение шага, кривизны и толщины по радиусу сохранялись, и все изменения касались только профилировки лопастей.

Для анализа условий обтекания лопастей было принято поле скоростей, представленное на рисунке 46.

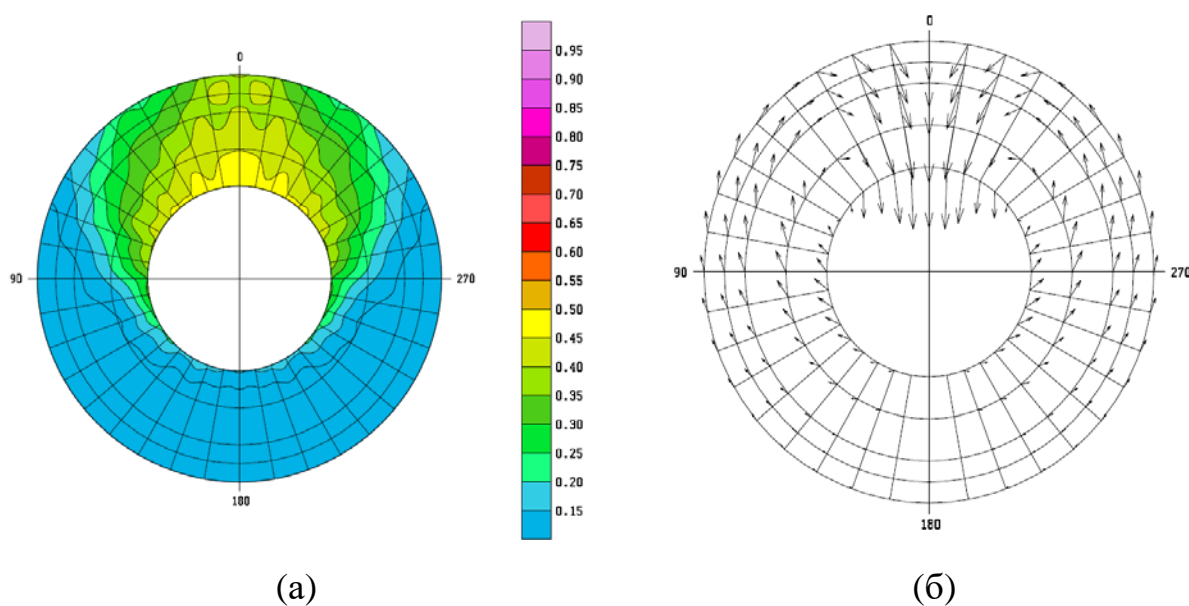


Рисунок 46 – Распределение осевого попутного потока и тангенциальных скоростей в диске гребного винта: (а) – линии равных осевых скоростей; (б) – векторная диаграмма тангенциальных и радиальных скоростей

Для указанных режимов работы лопастей при помощи программного комплекса SPA2000 были определены углы атаки цилиндрических сечений при работе гребного винта на рабочей поступи $J = 0.6$ для различных положений лопасти в неоднородном поле скоростей. Определенные максимальные значения углов атаки соответствуют положению лопасти в наиболее подторможенной

области потока (как правило, положение лопасти «12 часов»). Отрицательные значения углов атаки при поступи $J = 0.6$ соответствуют крайне ограниченным зонам с минимальной подторможенностью и максимальным тангенциальным скосом потока и приведены как экстремальные контрольные значения для проверки кавитации с нагнетающей стороны при проектировании профилей. Диапазоны углов атаки для различных радиусов при поступи $J = 0.6$ представлены в таблице 10.

Для иллюстрации влияния нагрузки гребного винта на углы атаки в таблице 10 дополнительно приведены диапазоны углов атаки при поступи $J = 0.3$, а также при поступи непосредственно вблизи швартовного режима.

Обращает на себя внимание, что на швартовном режиме углы атаки значительно больше, чем на ходовых режимах, но, как показывают многочисленные испытания моделей, на швартовном режиме преобладающей формой кавитации всегда является кавитация концевой вихря, и постановка задачи о проектировании профилей для снижения кромочной кавитации для швартовного режима некорректна.

Таблица 10 – Углы атаки профилей в составе лопасти гребного винта

r/R	$J = 0.01$	$J = 0.3$	$J = 0.6$
0.40	4.95° – 13.57°	1.53° – 8.44°	4.84° – 6.00°
0.50	4.78° – 9.50°	2.30° – 6.57°	3.71° – 6.05°
0.60	3.35° – 6.82°	1.37° – 4.87°	1.93° – 4.31°
0.70	2.18° – 4.68°	0.75° – 3.41°	-0.52° – 3.28°
0.80	1.54° – 3.36°	0.43° – 2.45°	-1.04° – 2.44°
0.90	1.08° – 2.39°	-0.06° – 1.76°	-1.21° – 1.71°
0.95	0.15° – 2.49°	-1.08° – 1.65°	-1.29° – 1.63°

Данные о максимальных углах атаки профилей в составе лопасти позволяют приступить к расчетному проектированию профилей для улучшения кавитационных характеристик винтов на ходовых режимах. Проектирование формы профиля осуществлялось методом последовательных приближений. С

помощью программного комплекса Star-CCM+ проводились расчеты вязкого обтекания профилей при углах атаки в соответствии с таблицей 10.

Для проведения расчетов были взяты три профиля ИК82, соответствующие радиусам $r/R = 0.5; 0.7; 0.9$ гребного винта № 1. Алгоритм серии расчетов предусматривал варьирование (постепенное снижение) давления в потоке, что полностью симулировало процесс испытаний в кавитационной трубе. Снижение давления в расчетной области потока проводилось до тех пор, пока на профиле не появлялась область длиной $\sim 2\%$ от длины хорды с давлением ниже давления парообразования ($P = 2400$ Па (критическое давление парообразования) при $t = 24$ °С). Такой режим считался «критическим» для данного профиля. Принятый критерий в 2% от длины хорды является достаточно мягким, что позволяет избежать излишнего изменения локальной кривизны в носике, которое может привести к возникновению кавитации на нагнетающей стороне в указанных выше опасных зонах наибольшей скорости потока и наличия скосов.

Дальше производилась корректировка локальной кривизны в области носика профиля до тех пор, пока минимальное давление на профиле не становилось равным давлению парообразования. Полученная кривизна профиля для данного радиуса принималась в качестве проектной.

Предложенный метод, при котором корректировке подвергаются сечения лопасти на различных радиусах, означает отход от традиционных, принятых в КГНЦ методов проектирования гребных винтов с едиными профилями и переход на не единые профили (как по кривизне, так и по распределению толщины для каждого радиуса гребных винтов).

Некорректное распределение не единой кривизны может привести к образованию «волн» на поверхности лопасти. Поэтому необходимой процедурой в предлагаемой технологии проектирования является сглаживание распределения кривизны. Также необходимо выполнить проецирование (интерполяцию) на остальные радиусы и согласовать распределение кривизны между радиусами.

Для сглаживания распределения кривизны профилей использовался программный комплекс InpGeom, который применяется для описания геометрии гребных винтов в КГНЦ. Сглаживание проводилось за счет выравнивания производной.

Следующий шаг – проецирование нового распределения кривизны на остальные радиусы. Выполнялось путем вычисления среднего арифметического через кривизну сглаженных профилей. Например, кривизна для радиуса $r/R = 0.8$ (если по предыдущему шагу были выполнены расчеты профилей на $r/R = 0.7$ и $r/R = 0.9$) вычислялась следующим образом: $f_{c_{r/R=0.8}}(\xi) = \frac{f_{c_{r/R=0.7}}(\xi) + f_{c_{r/R=0.9}}(\xi)}{2}$.

Кривизна на верхних радиусах вычисляется следующим образом:

$$\text{кривизна на } r/R = 0.95 - f_{c_{r/R=0.95}}(\xi) = \frac{f_{c_{r/R=0.9}}(\xi)}{2},$$

$$\text{кривизна на } r/R = 0.975 - f_{c_{r/R=0.975}}(\xi) = \frac{f_{c_{r/R=0.95}}(\xi)}{2}.$$

Также в связи с возможным образованием «загиба» (рисунок 47) из-за слишком большой величины кривизны было принято решение сохранить кривизну для всех радиусов ниже $r/R = 0.5$ такой же, как и на $r/R = 0.5$.

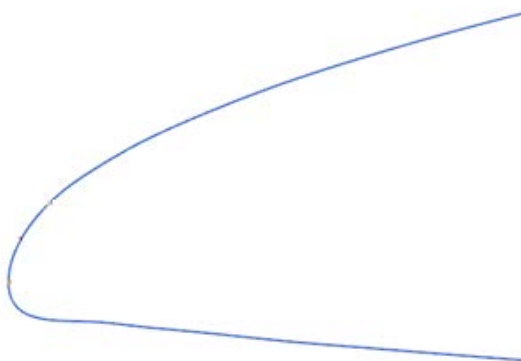


Рисунок 47 – Пример загиба входящей кромки из-за слишком большой величины локальной кривизны

Последним этапом сглаживания новой профилировки является согласование распределения кривизны по всей лопасти для каждого значения ξ (ξ – безразмерная абсцисса, $\xi = -1$ – выходящая кромка, $\xi = 1$ – входящая кромка).

Таким образом, при проектировании профилей по предлагаемой методике из-за не единого применяемого профиля становится необходимым дополнительный шаг – сглаживание распределения кривизны, а также согласование кривизны между всеми радиусами.

Процесс проектирования профилей и его результаты рассмотрены в параграфе 4.4.

4.4. Экспериментальная проверка кавитационных характеристик винта с скорректированными профилями

В качестве основных расчетных радиусов для корректировки кривизны были выбраны «стандартные» значения радиусов $r/R = 0.5$; 0.7 ; 0.9 гребного винта № 1. Расчетные значения углов атаки составили: $r/R = 0.5 - 6.05^\circ$; $r/R = 0.7 - 3.28^\circ$; $r/R = 0.9 - 1.71^\circ$.

На рисунке 48 представлено распределение кривизны исходных профилей в безразмерной форме.

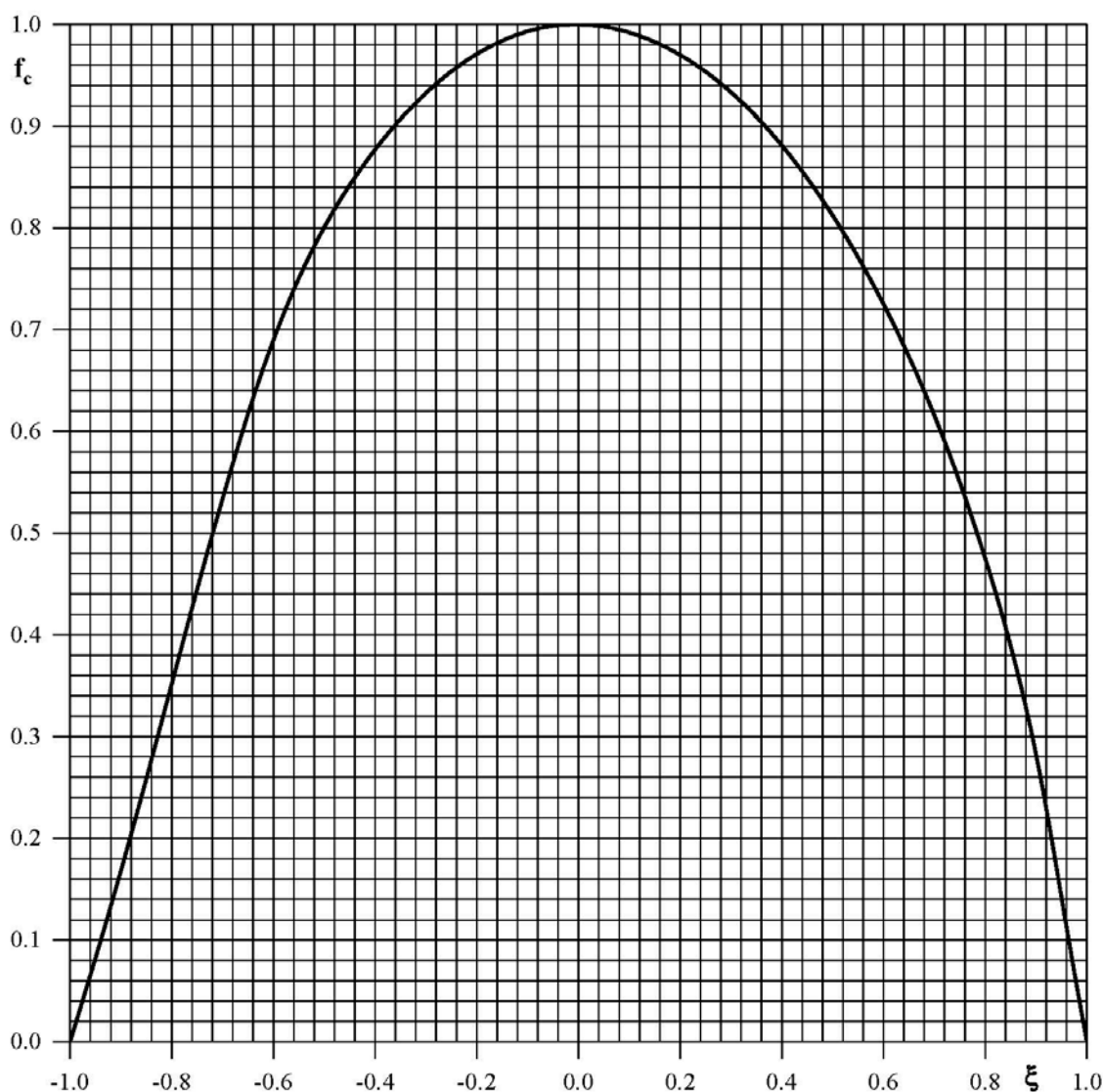


Рисунок 48 – Распределение кривизны гребного винта с профилями ИК82

Расчеты обтекания профилей были выполнены в программном комплексе Star-CCM+. Граничные условия, параметры расчетной сетки и критерии для расчета выбирались в соответствии с параграфом 4.2. На рисунке 49 в качестве

примера представлены результаты расчетов распределения давления на профилях цилиндрических сечений лопасти для $r/R = 0.7$ при угле атаки 3.28° .

По результатам расчета распределения давления для каждого радиуса в несколько итераций была откорректирована кривизна в носике профиля. Корректировка выполнялась таким образом, чтобы минимальное давление было равно давлению парообразования. Данный достаточно «мягкий» критерий был выбран с учетом того, что слишком сильное увеличение кривизны может спровоцировать более раннее наступление кавитации на нагнетающей стороне.

Полученная картина распределения давления для скорректированного профиля представлена на рисунке 49. В результате корректировки локальной кривизны в области носика профиля удалось существенно увеличить минимальное давление на засасывающей стороне, так, что он стал равным давлению насыщенных паров воды.

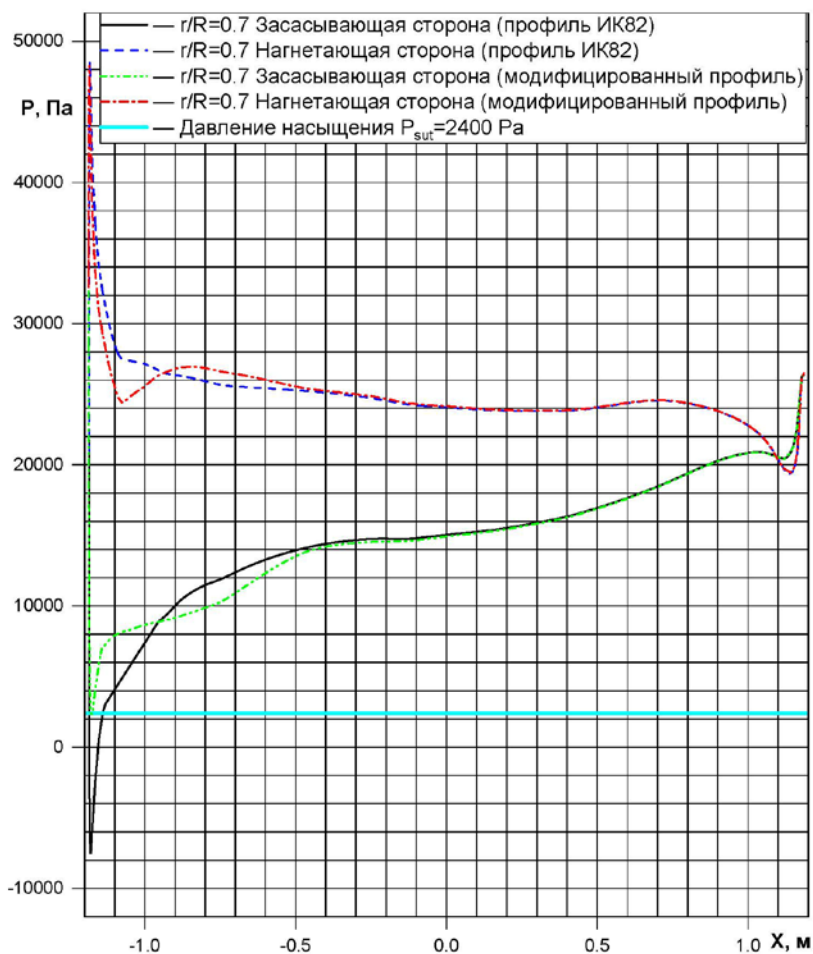


Рисунок 49 – Распределение давления $r/R=0.7$, верхнее положение лопасти. Угол атаки – 3.28°

На рисунках 50 и 51 представлено итоговое распределение кривизны модифицированных профилей в носике профилей и распределение кривизны вдоль профилей соответственно. То есть благодаря данным расчетам были получены новые профили, которые спроектированы исходя из режимов работы лопасти гребного винта в неоднородном поле скоростей в диске гребного винта для верхнего положения, где поток максимально подторможен.

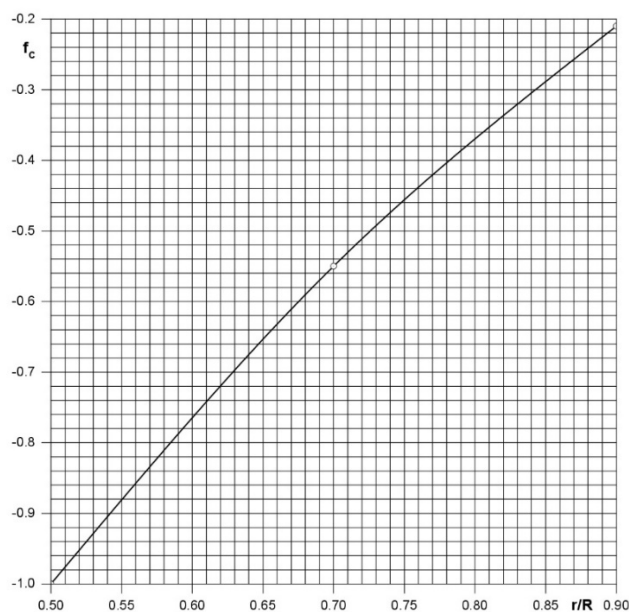


Рисунок 50 – Распределение новой кривизны в носике профиля

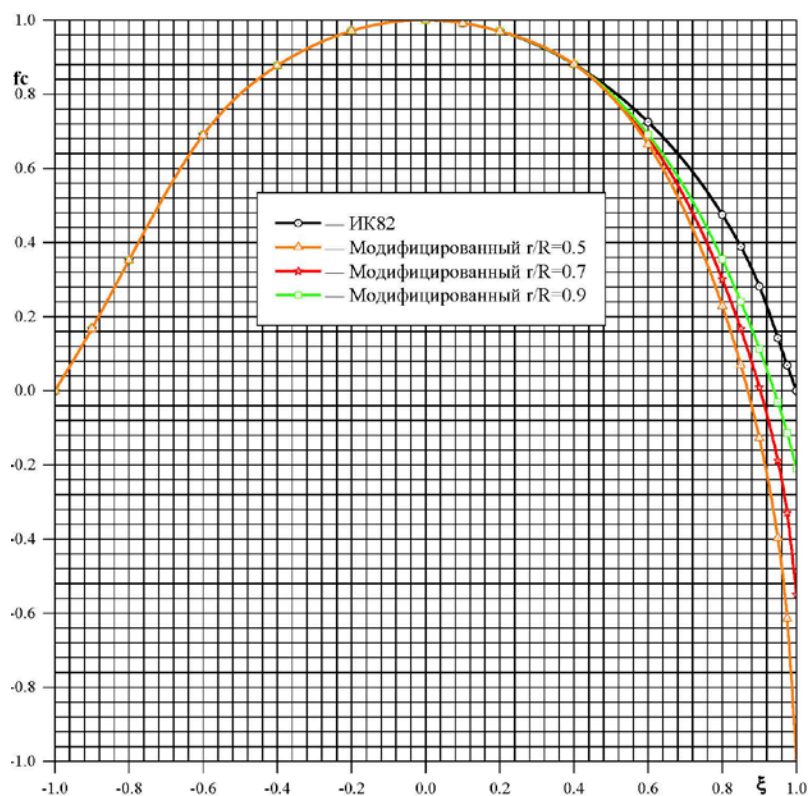


Рисунок 51 – Распределение кривизны вдоль профилей

Дополнительно были выполнены расчеты для проверки на кавитацию с нагнетающей стороны. Они осуществлялись на отрицательные углы атаки в соответствии с таблицей 10 при больших значениях мгновенной поступи (рисунок 52). Приведенные расчеты не выявили опасности появления с кавитации с нагнетающей стороны. Такую проверку всегда необходимо проводить при применении корректировки кривизны, так как опасность появления кавитации на нагнетающей стороне ставит определенные ограничения для увеличения кривизны в носике. При этом следует заметить, что еще в работах [42] и [43] показано, что негативное влияние на кавитацию с нагнетающей стороны может быть в существенной степени снижено дополнительной корректировкой поверхности вблизи входящей кромки.

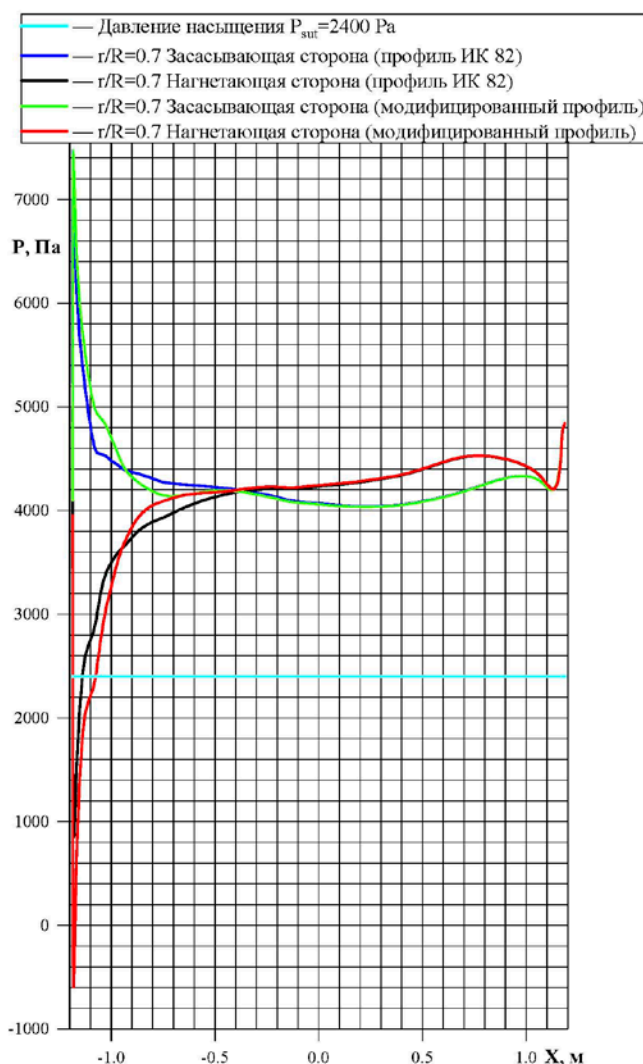


Рисунок 52 – Распределение давления $r/R=0.7$. Угол атаки -0.52°

Важнейшим этапом является сглаживание распределения кривизны. До настоящего времени при проектировании винта применялся подход, когда использовалась либо единое распределение для всех радиусов кривизны и толщины профиля, либо не единое распределение только толщины (для профилей ИК82), при едином распределении кривизны. В предлагаемой методике применяется уникальное распределение кривизны для каждого гребного винта, что является качественным отличием от ранее применявшейся геометрии. Поэтому важным элементом при проектировании становится процедура сглаживания геометрии лопастей. На рисунке 53 продемонстрирован результат сглаживания профиля сечения $r/R = 0.7$.

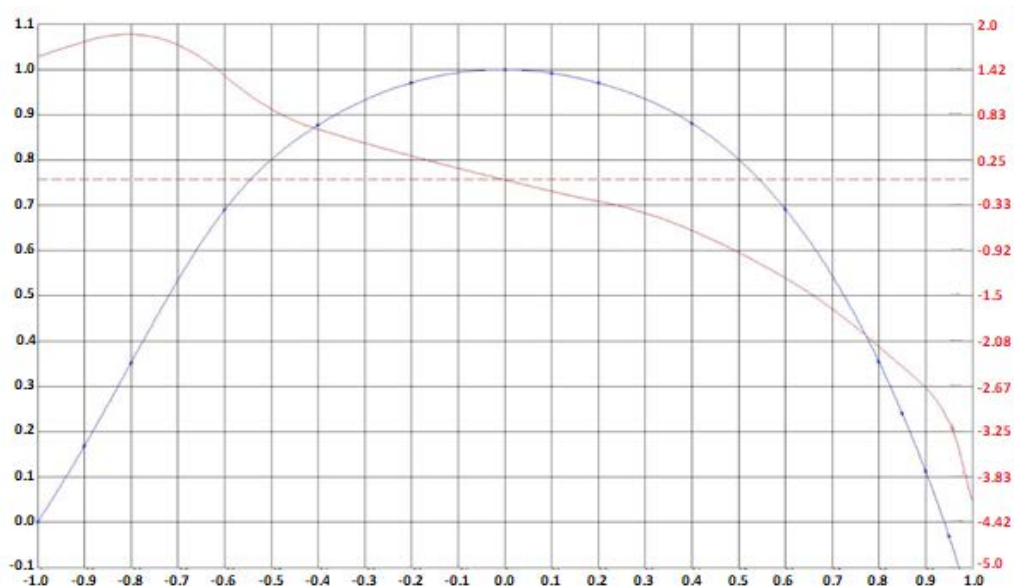


Рисунок 53 – Сглаженное распределение кривизны профиля. Синий цвет – распределение кривизны, красный – производная

Далее было выполнено проецирование распределения кривизны на остальные радиусы согласно методу, описанному в предыдущем параграфе. На рисунке 54 в качестве примера показано проецирование распределение кривизны на $r/R = 0.8$.

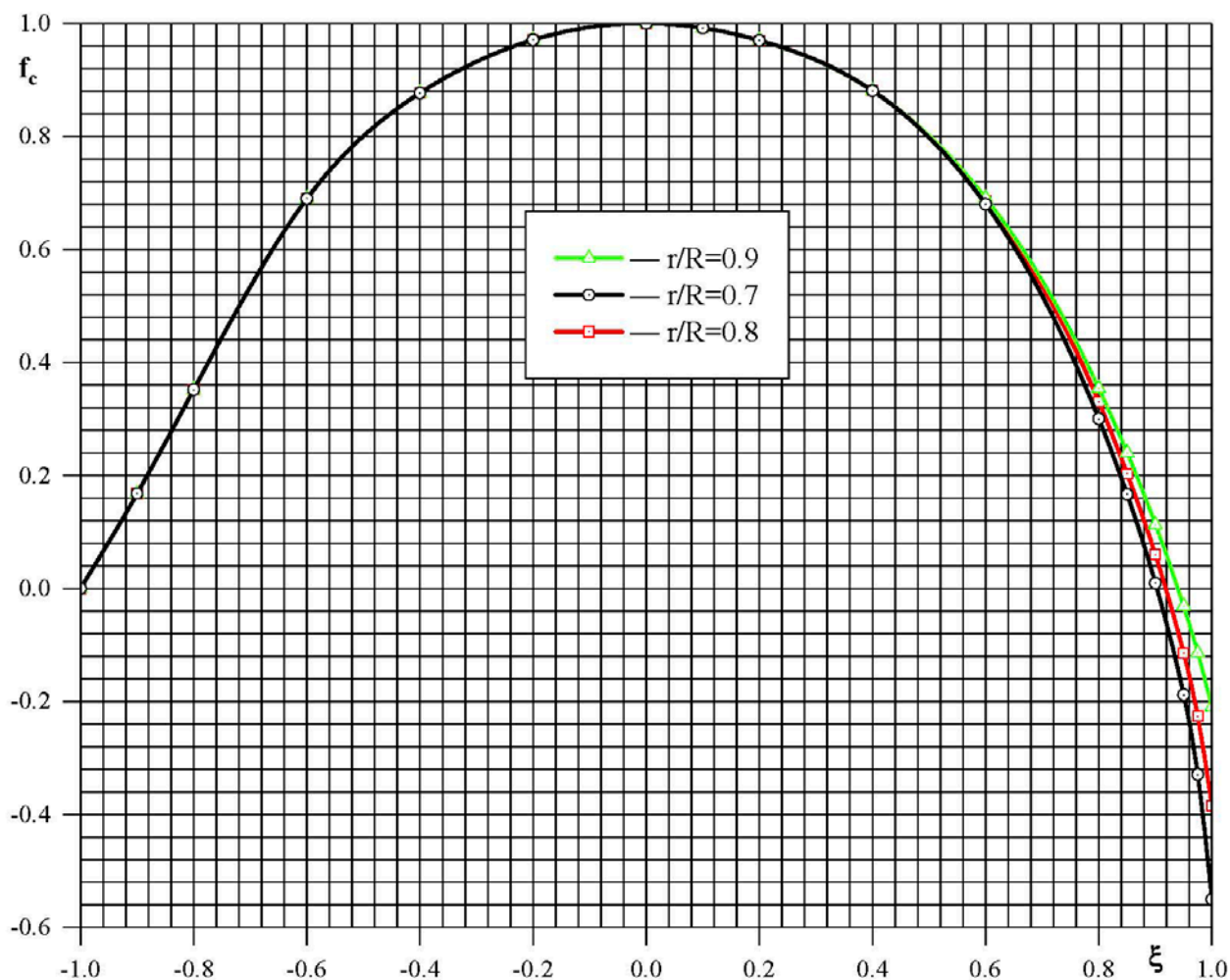


Рисунок 54 – Проецированное распределение кривизны на $r/R = 0.8$

После проецирования распределения кривизны на все радиусы было выполнено согласование кривизны вдоль лопасти при всех значениях координаты профиля – ξ , где $\xi = 1$ и -1 соответствуют входящей и выходящей кромке профиля.

По итогам проектирования для проведения испытаний была изготовлена модель ледового гребного винта № 3. Геометрические характеристики полностью соответствовали характеристикам модели № 1, однако в качестве профилей использовались профили, которые были разработаны, как описано выше. Таким образом, ледовый винт № 3 может рассматриваться как модификация ледового винта № 1. Модель гребного винта прошла цикл испытаний, аналогичный циклу винта-прототипа.

На рисунке 55 представлены результаты испытаний модели гребного винта № 3 в свободной воде в сравнении с результатами испытаний модели гребного винта № 1.

Как видно из результатов испытаний, применение модифицированной профилировки практически не оказывает влияние на гидродинамические характеристики, наблюдается незначительный сдвиг максимума КПД влево, а также его небольшое повышение на поступях от 0.1 до 0.7. Для оценки гидродинамических характеристик на швартовном режиме был рассчитан коэффициент Бендемана – $\frac{K_T}{K_Q^{2/3}}$. В таблице 11 представлено сравнение коэффициента для моделей гребных винтов.

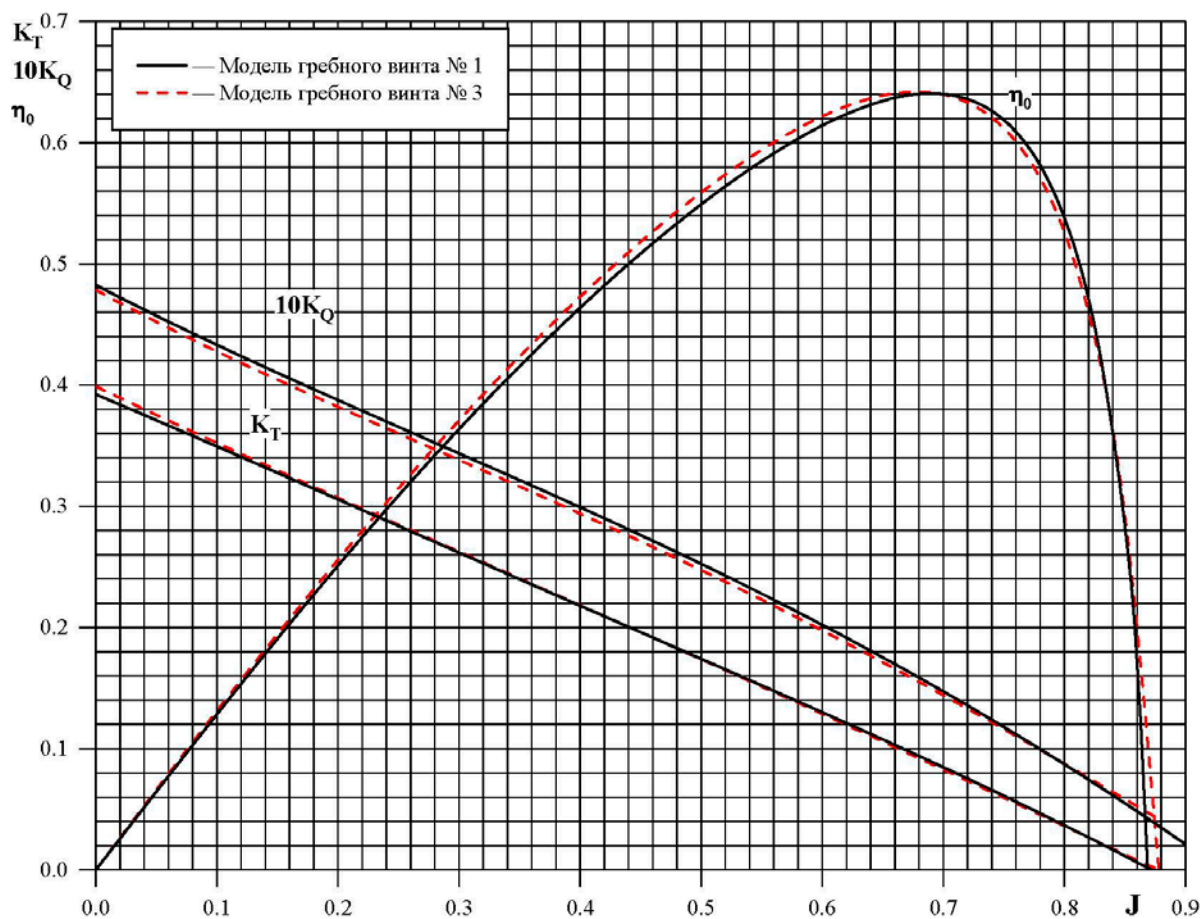


Рисунок 55 – Результаты испытаний моделей гребных винтов № 1 и № 3 в свободной воде

Таблица 11 – Коэффициент Бендемана

Модель гребного винта	K_T	$10K_Q$	$\frac{K_T}{K_Q^{2/3}}$
№ 1	0.3923	0.4825	0.6377
№ 3	0.3931	0.4710	0.6494

Из таблицы видно, что у модели №3 эффективность на швартовном режиме повысилась на ~1.8 %, что и следовало ожидать с учетом увеличения кривизны.

Для оценки кавитационных характеристик были выполнены квазиакустические испытания в средней кавитационной трубе КГНЦ (без применения шероховатости). На рисунке 56 приведены кавитационные диаграммы для моделей гребных винтов без применения шероховатости.

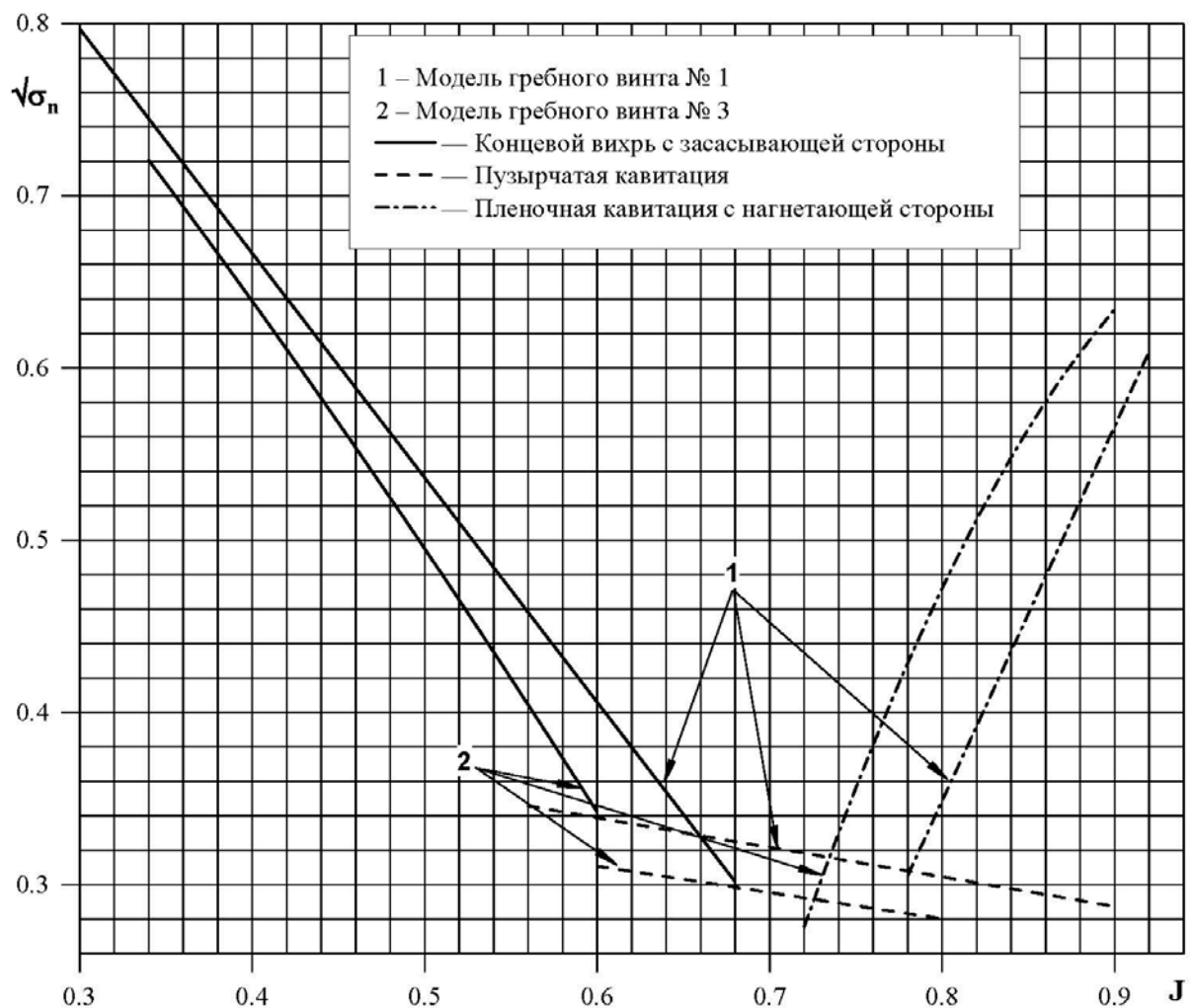


Рисунок 56 – Результаты квазиакустических испытаний моделей гребных винтов № 1 и № 3 без применения шероховатости

Результаты квазиакустических испытаний свидетельствуют о том, что модификация профилей позволяет сдвинуть всю кавитационную корзину влево, а также опустить горизонтальную ветвь, соответствующую пузырьчатой кавитации.

Сопоставление результатов испытаний ледовых гребных винтов № 1 и № 3 в средней кавитационной трубе с применением шероховатости входящей кромки приведены на рисунке 57. В соответствии с анализом, приведенным в главе 2, применялась шероховатость величиной 30 мкм на область 2.5 % от длины хорды.

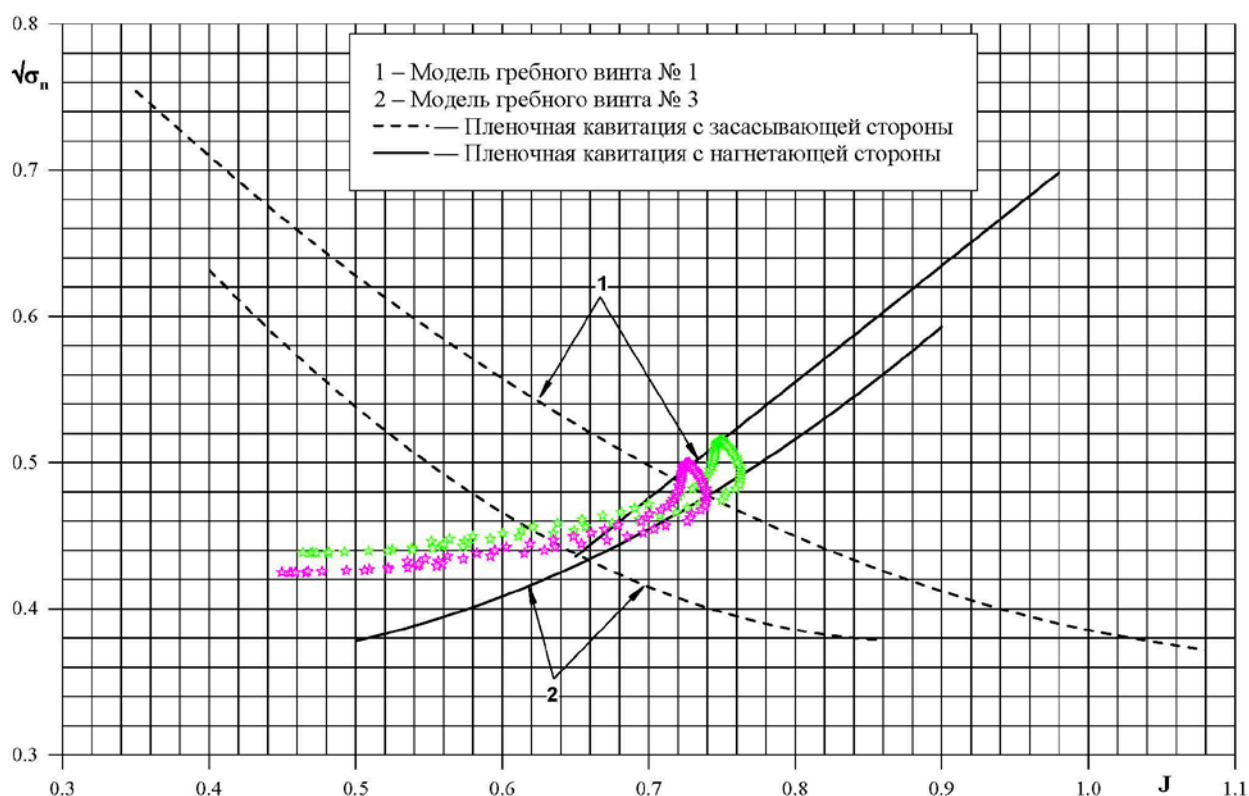


Рисунок 57 – Результаты квазиакустических испытаний моделей гребных винтов с применением искусственной шероховатости. Пленочная кавитация с засасывающей и нагнетающей стороны

Представленные результаты испытаний с применением шероховатости свидетельствуют о том, что данный подход позволяет обеспечить значительное снижение ветви соответствующей пленочной кавитации с засасывающей стороны, при этом лопасть в широком диапазоне угловых положений освобождается от кавитации (где «петля» зависимости мгновенного числа кавитации от мгновенной поступи находится выше новой левой ветви кавитационной диаграммы за шероховатостью). Вид кавитации за шероховатостью, согласно данным

зарубежных источников, а также результатам сопоставления картин кавитации модели и натурального гребного винта на рисунке 9 может приниматься как приближенный вид картины кавитации в натуральных условиях.

Также стоит обратить внимание на то, что модификация профилей не оказывает значительного влияние на кавитацию с нагнетающей стороны вблизи реальных величин поступи ($J = 0.6 - 0.7$).

На рисунке 58 представлены фотографии кавитации моделей гребных винтов с шероховатости входящей кромки и без нее. Как видно из рисунка модифицированные профили позволяют убрать кавитацию с нижних радиусов (в случае модели гребного винта № 1 кавитация начинается с $r/R = 0.5$, у модели гребного винта № 3 с $r/R = 0.75$) и сократить длину каверны на верхних радиусах. В принципе, по итогам испытаний кривизна периферийных сечений может быть увеличена дополнительно.

Такое изменение кавитации по проведенным расчетным оценкам позволит снизить пульсации на корпусе на 25 – 30 %, что существенно сказывается на санитарных условиях обитаемости. Кроме того, 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.

Обращает на себя внимание тот факт, что без шероховатости обе модели гребных винтов показывают отсутствие кавитации на лопастях, что подтверждает данную в работе рекомендацию дополнить испытания гладких моделей винтов испытаниями моделей винтов с применением шероховатости.

Модель гребного винта № 3



Модель гребного винта № 1



(а)



(б)

Рисунок 58 – Кавитация с засасывающей стороны лопасти $J = 0.409$

$$\sqrt{\sigma_n} = 0.512:$$

(а) – с шероховатостью; (б) – без шероховатости

Таким образом, можно сказать, что данная модификация позволяет значительно улучшить кавитационные характеристики гребного винта без влияния на гидродинамические характеристики.

4.5. Расчет прочности лопастей под действием ледовой блочной нагрузки

Дополнительно для оценки влияния внесенных изменений в профилировку были выполнены сравнительные расчеты прочности лопастей гребных винтов № 1 и № 3 под действием ледовой блочной нагрузки. Гребные винты были спроектированы исходя из требований ледового класса Arc7 по классификации РМРС (Российский морской регистр судоходства).

Гребной винт прототип имеет следующие основные характеристики геометрии и режима работы:

Диаметр D_p , м	6.0
Диаметр ступицы d , м	1.5
Число лопастей Z	4
Дисковое отношение A_E/A_0 (EAR)	0.592
Номинальная частота вращения на МДМ RPM, об/мин	132.7

Так как в Правилах РМРС для категории ледовых усилений Arc7 отсутствуют данные для определения ледовой нагрузки, то величины ледовой нагрузки и сценарии нагружения приняты по РМРС для категории ледовых усилений РС3, приблизительно соответствующей, согласно [2], категории усилений Arc7 гребного винта прототипа.

Для расчетов прочности лопастей гребного винта РМРС определяют две силы – F_b и F_f . Сила F_b — максимальная за весь срок службы сила на лопасти гребного винта, изгибающая лопасть назад, возникающая при взаимодействии гребного винта со льдом, включает в себя гидродинамическую нагрузку. Направление силы перпендикулярно хорде сечения на относительном радиусе $r/R = 0.7$ (см. рисунок 59).

Сила F_f — максимальная за весь срок службы сила на лопасти гребного винта, изгибающая лопасть вперед, возникающая при взаимодействии гребного винта со льдом, включает в себя гидродинамическую нагрузку. Направление силы перпендикулярно хорде сечения на относительном радиусе $r/R = 0.7$.

F_b и F_f происходят от различных явлений при взаимодействии гребного винта со льдом и не возникают одновременно, поэтому должны прикладываться к лопасти отдельно.

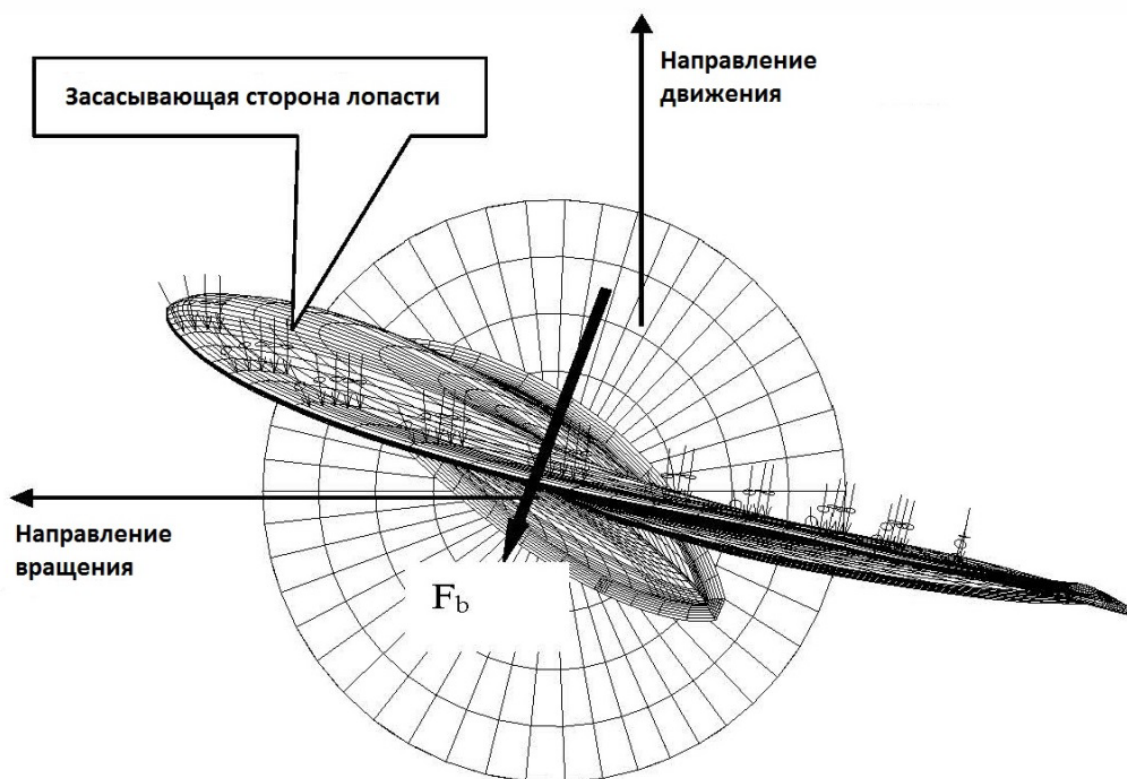


Рисунок 59 – Направление силы F_b

Для вычисления сил F_b и F_f , действующих на лопасти открытого гребного винта, предлагаются следующие формулы:

Максимальная сила F_b , изгибающая лопасть назад для открытого гребного винта:

$$D < D_{lim} \quad F_b = 27 \cdot S_{ice} \cdot [n \cdot D]^{0.7} \cdot \left[\frac{EAR}{Z} \right]^{0.3} \cdot D^2, \text{ [кН];}$$

$$D \geq D_{lim} \quad F_b = 23 \cdot S_{ice} \cdot [n \cdot D]^{0.7} \cdot \left[\frac{EAR}{Z} \right]^{0.3} \cdot D \cdot H_{ice}^{1.4}, \text{ [кН];} \quad D_{lim} = 0.85 \cdot H_{ice}^{1.4}.$$

Максимальная сила F_f , изгибающая лопасть вперед для открытого гребного винта:

$$D < D_{\text{lim}} \quad F_f = 250 \cdot \left[\frac{\text{EAR}}{Z} \right] \cdot D^2, \text{ [кН]};$$

$$D \geq D_{\text{lim}} \quad F_f = 500 \cdot \left[\frac{\text{EAR}}{Z} \right] \cdot D \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{d}{D}\right)} \cdot H_{\text{ice}}, \text{ [кН]}; \quad D_{\text{lim}} = \frac{2}{\left(1 - \frac{d}{D}\right)} \cdot H_{\text{ice}}.$$

В данных формулах

D [м] – диаметр гребного винта;

d [м] – диаметр ступицы гребного винта;

EAR – дисковое отношение;

H_{ice} – толщина льда для проектирования машинной установки по прочности;

S_{ice} – индекс прочности льда для определения ледовой силы на лопасти;

n [об/сек] – 85 % номинальной скорости вращения гребного винта (при МДМ в условиях свободного хода) для гребного винта фиксированного шага (независимо от типа главного двигателя);

МДМ – максимальная длительная мощность.

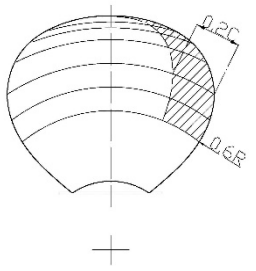
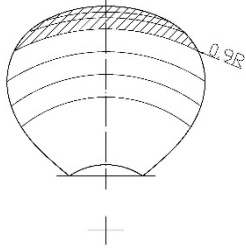
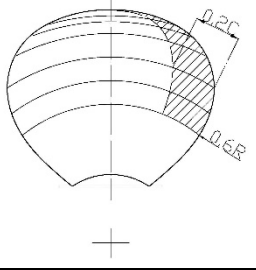
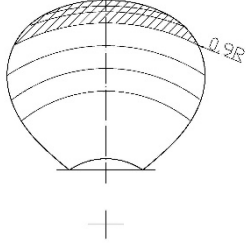
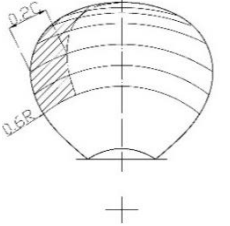
В таблице 12 приведены значения проектной толщины льда и индекса прочности льда для использования в оценке ледовой нагрузки на гребном винте.

Таблица 12 – Коэффициенты ледового класса

Ледовый класс	H_{ice} [м]	S_{ice} [-]
РС-3	3.0	1.1

Для гребных винтов фиксированного и регулируемого шага должны быть рассмотрены сценарии нагружения 1 – 4, приведенные в таблице 13. Сценарий нагружения 5 применяется для гребного винта с реверсируемым направлением вращения.

Таблица 13 – Сценарии нагружения для открытого гребного винта

Сценарий нагружения	Сила	Зона нагружения	Гребной винт правого вращения, вид сзади
LoadCase 1	F_b	Равномерное давление на засасывающей стороне лопасти в зоне от $0.6R$ до конца и на 0.2 длины хорды от входящей кромки	
LoadCase 2	$0.5F_b$	Равномерное давление на засасывающей стороне лопасти на конце выше радиуса $0.9R$	
LoadCase 3	F_f	Равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти в зоне от $0.6R$ до конца и на 0.2 длины хорды от входящей кромки	
LoadCase 4	$0.5F_f$	Равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти на конце выше радиуса $0.9R$	
LoadCase 5	$0.6\max\{F_b, F_f\}$	Равномерное давление на нагнетающей стороне лопасти в зоне от $0.6R$ до конца и на 0.2 длины хорды от выходящей кромки	

В таблице 14 представлены результаты расчета по формулам для категории ледовых усилений РС3 получены величины сил F_b и F_f .

Таблица 14 – Расчет сил Fb и Ff

H_{ice} , m		3.0
S_{ice}		1.1
D_{lim} , m		3.957
Fb, kN	$D < D_{lim}$	3455.996
	$D \geq D_{lim}$	2284.314
D_{lim} , m		8.571
Ff, kN	$D < D_{lim}$	1575.0
	$D \geq D_{lim}$	2250.0
Принято в расчет		
Fb, kN		2284.314
Ff, kN		1575.0

В таблице 15 приведены для сценариев нагружения LoadCase 1 – LoadCase 5 принятые в расчет значения ледовой блочной нагрузки, Н.

Таблица 15 – Принятые величины ледовых блочных нагрузок

Сценарий нагружения	Величина ледовой блочной нагрузки, Н
Load Case 1	2284314
Load Case 2	1142157
Load Case 3	1575000
Load Case 4	787500
Load Case 5	1370589

Расчет напряжений в лопасти гребного винта выполнен по методу конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса Siemens FEMAP v.11. Геометрическая модель лопасти включает в себя собственно лопасть, галтельное сопряжение лопасти со ступицей и часть ступицы под лопастью. Часть ступицы введена в модель для отдаления зоны определения граничных условий от лопасти с целью исключения влияния реактивных сил в закреплении на картину напряжений в лопасти. Сетка конечных элементов содержит 792076 сплошных параболических тетраэдрических элементов, построенных на 1147907 узлах.

Блочная ледовая нагрузка приложена в виде равномерного давления на наружных гранях элементов, лежащих в зонах нагружения, соответствующих показанным выше сценариям нагружения.

Расчетная модель гребного винта № 3 аналогична расчетной модели гребного винта № 1 и также включает в себя собственно лопасть, галтельное сопряжение лопасти со ступицей и часть ступицы. Сетка конечных элементов содержит 700867 сплошных параболических тетраэдрических элемента, построенных на 1017723 узлах.

В таблице 16 приведен сравнительный анализ эквивалентных напряжений гребных винтов № 1 и № 3. Картины распределения эквивалентных напряжений в лопастях гребных винтов приведены на рисунках 60 – 64.

Таблица 16 – 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

В результате анализа можно видеть следующее.

Из сопоставления значений эквивалентных напряжений для вариантов нагрузки Load Case 1 – Load Case 3 можно видеть, что модифицирование профилей лопасти гребного винта № 3 приводит к увеличению напряжений в лопасти на 3.2 – 3.8 % по сравнению с гребным винтом № 1 для вариантов нагрузки Load Case 1 и Load Case 3. В случае Load Case 2 и Load Case 4 происходит уменьшение напряжений на 0.5 – 0.6 %. Максимальная амплитуда изменения напряжений обусловленных ледовой нагрузкой при этом увеличивается на 0.5 %. Картины

распределения напряжений в лопастях гребных винтов при данных вариантах нагрузки практически не отличаются.

В случае варианта нагрузки Load Case 5 как наибольшие эквивалентные напряжения, так и картины распределения напряжений не отличаются.

Таким образом, несмотря на возросшие напряжения, для вариантов нагрузки Load Case 1 и Load Case 3 гребной винт № 3 полностью соответствует требованиям РМРС для ледового класса РС3.

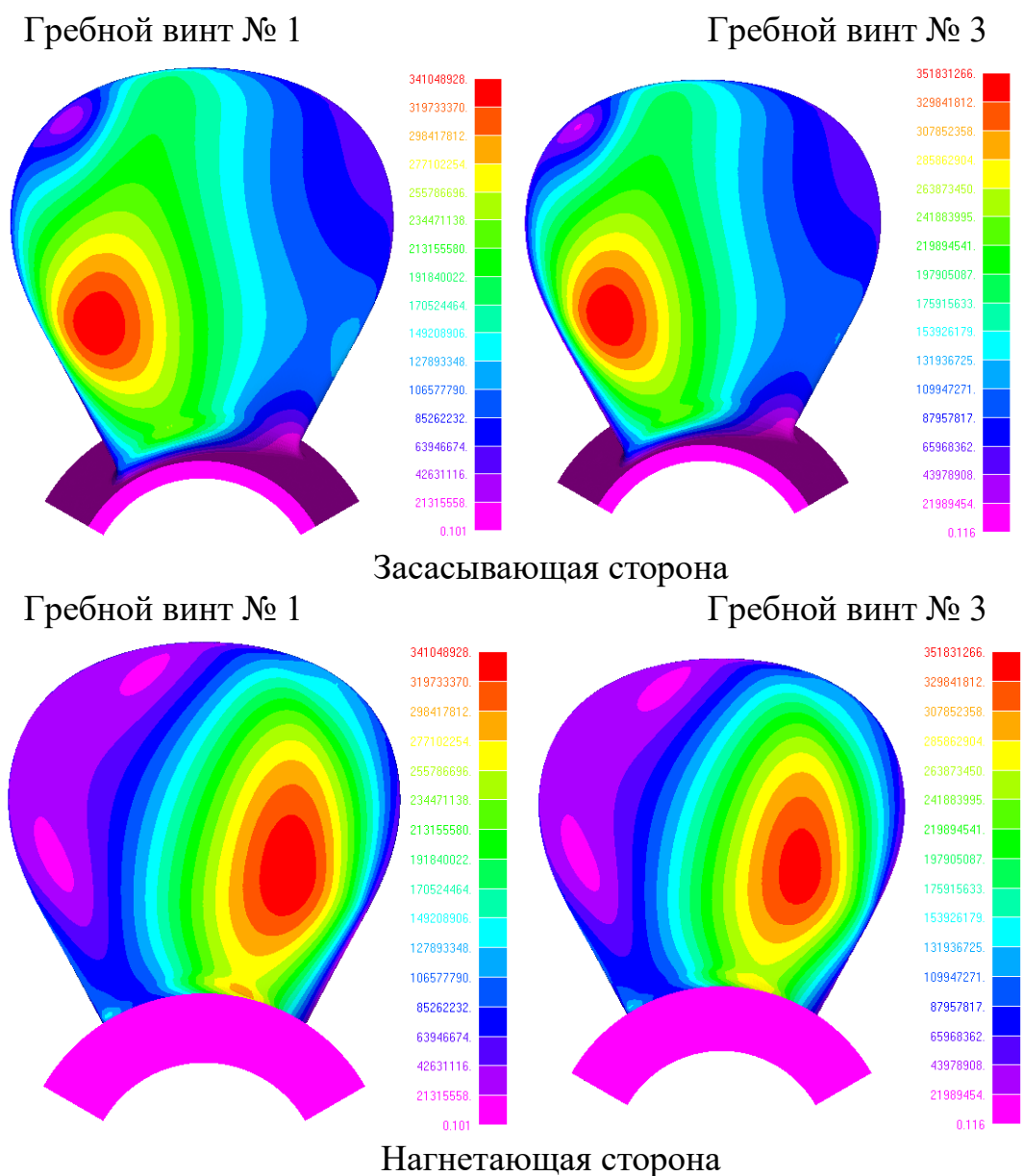
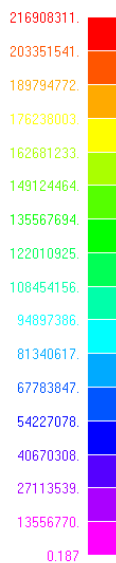
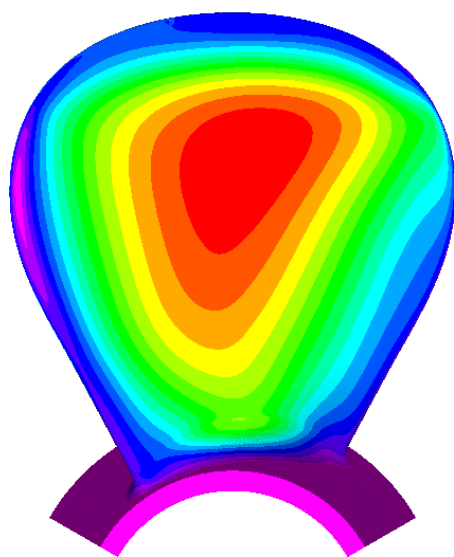
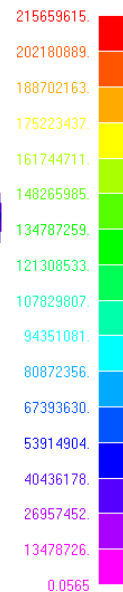


Рисунок 60 – Эквивалентные напряжения в лопасти гребного винта.
Load Case 1

Гребной винт № 1

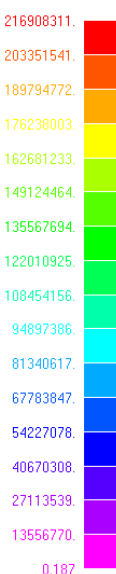
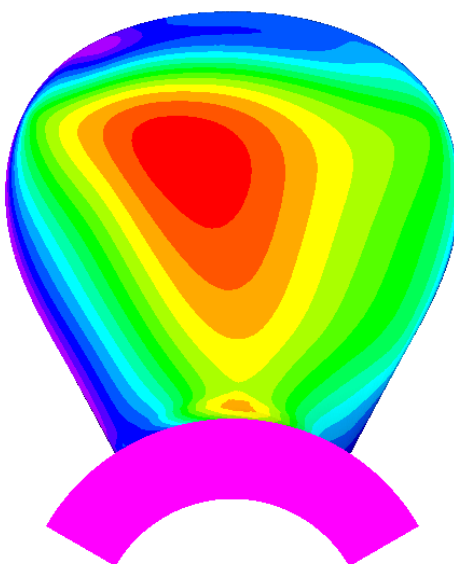


Гребной винт № 3

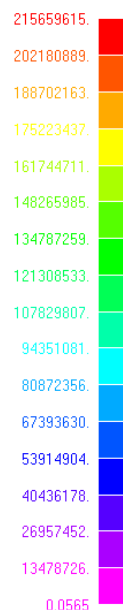
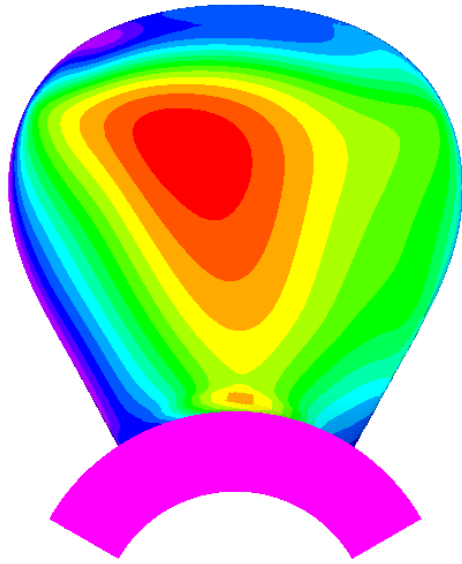


Засасывающая сторона

Гребной винт № 1



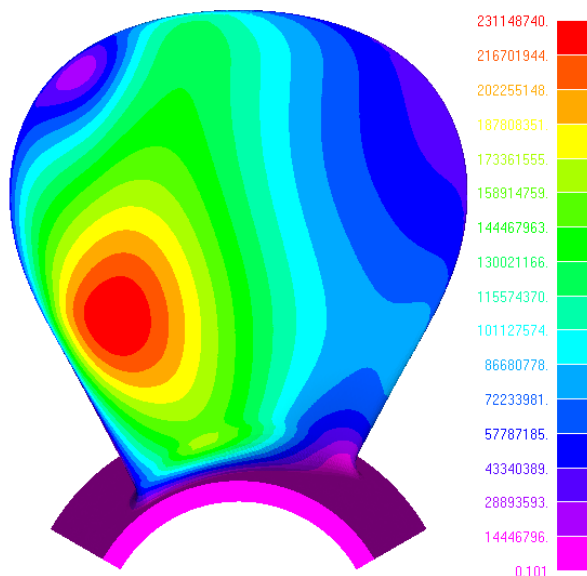
Гребной винт № 3



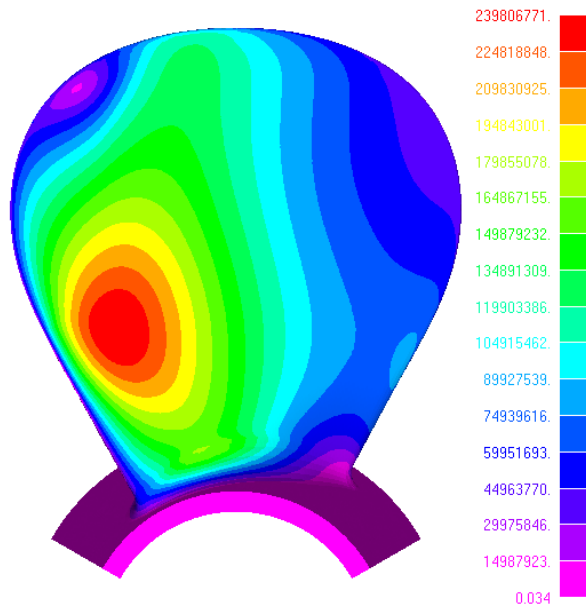
Нагнетающая сторона

Рисунок 61 – Эквивалентные напряжения в лопасти гребного винта.
Load Case 2

Гребной винт № 1

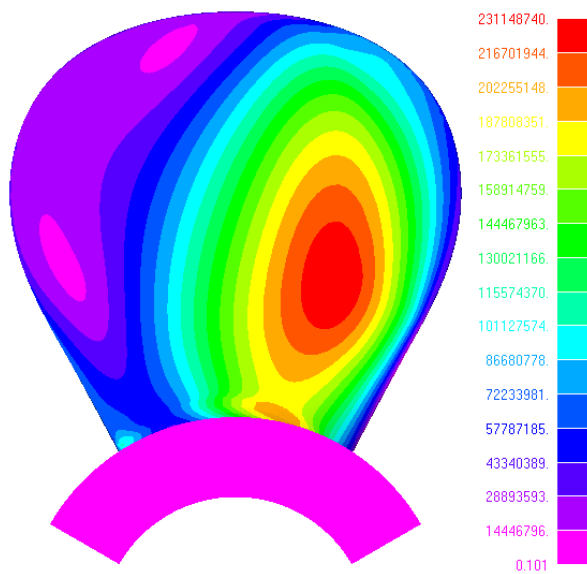


Гребной винт № 3

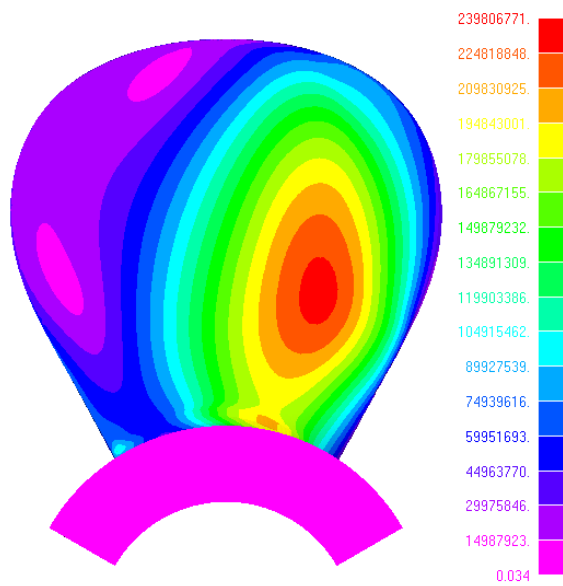


Засасывающая сторона

Гребной винт № 1



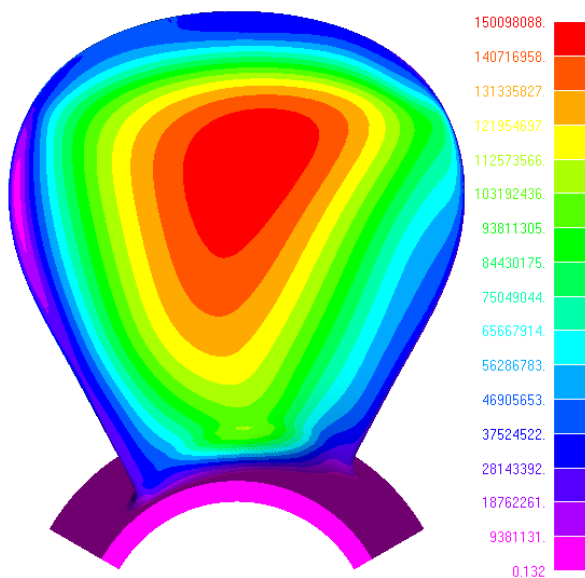
Гребной винт № 3



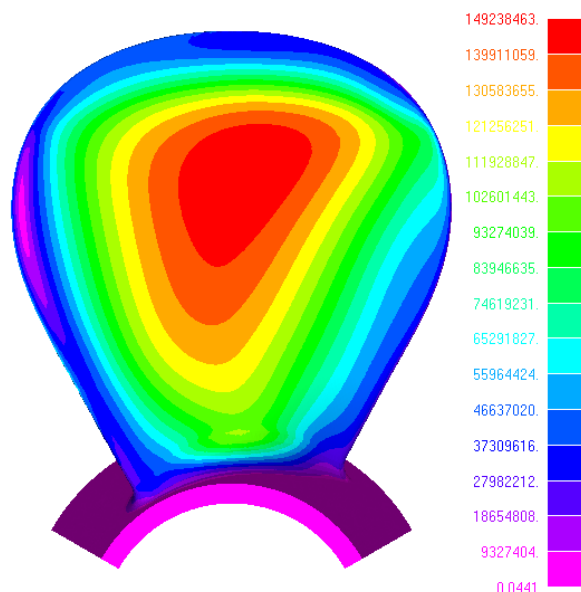
Нагнетающая сторона

Рисунок 62 – Эквивалентные напряжения в лопасти гребного винта.
Load Case 3

Гребной винт № 1

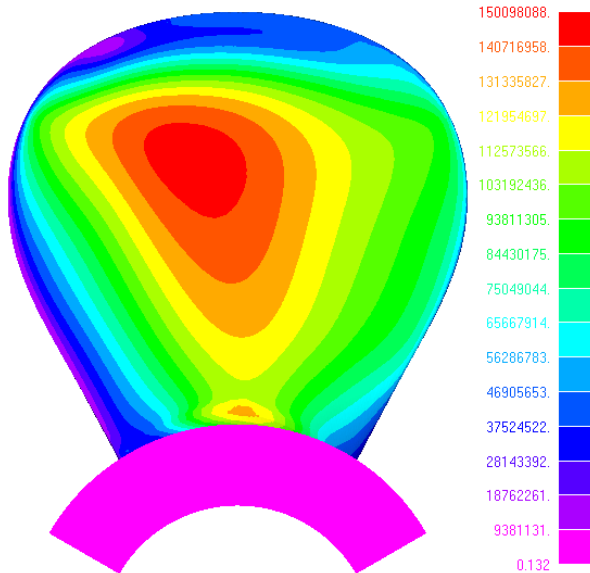


Гребной винт № 3

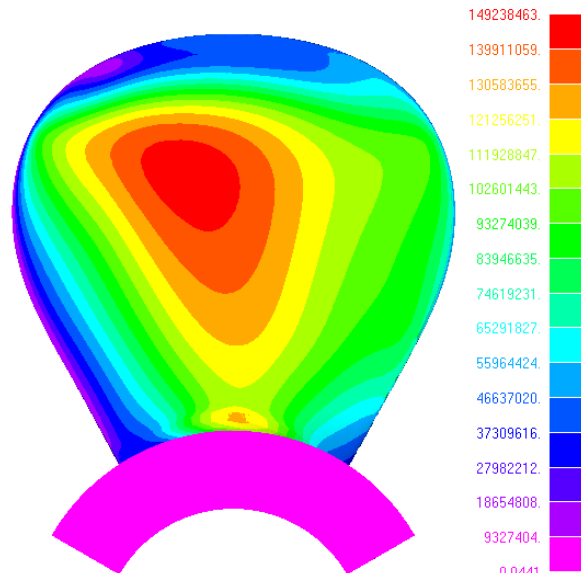


Засасывающая сторона

Гребной винт № 1



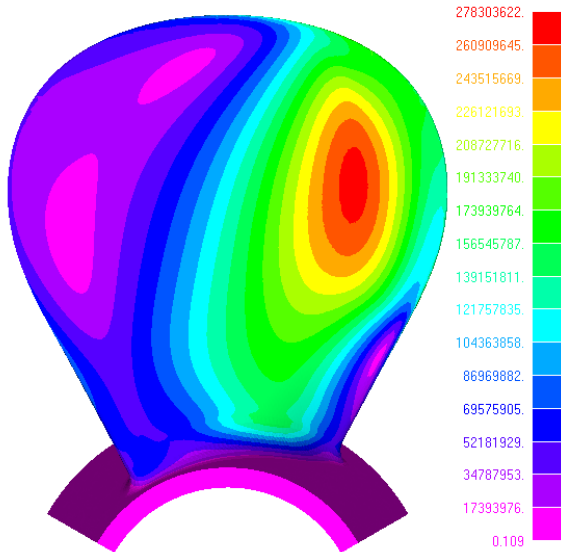
Гребной винт № 3



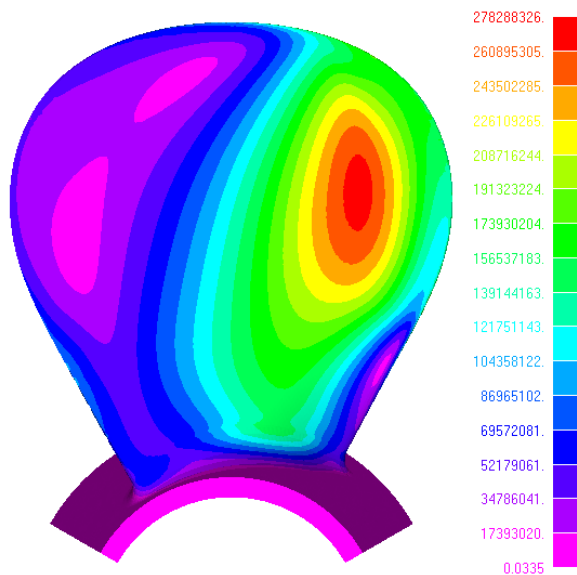
Нагнетающая сторона

Рисунок 63 – Эквивалентные напряжения в лопасти гребного винта.
Load Case 4

Гребной винт № 1

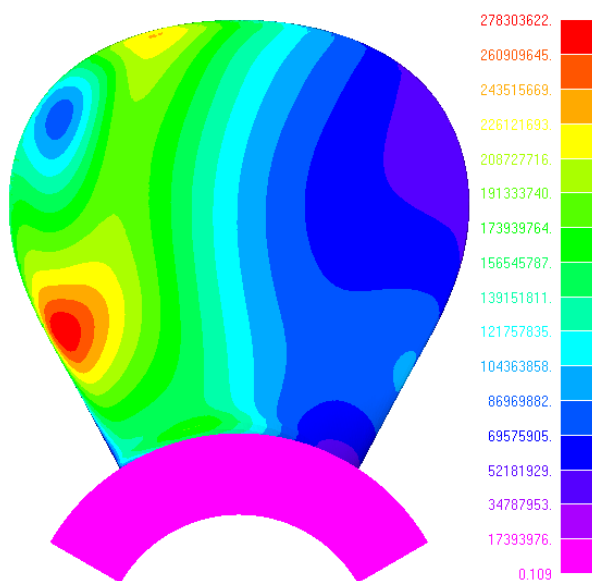


Гребной винт № 3

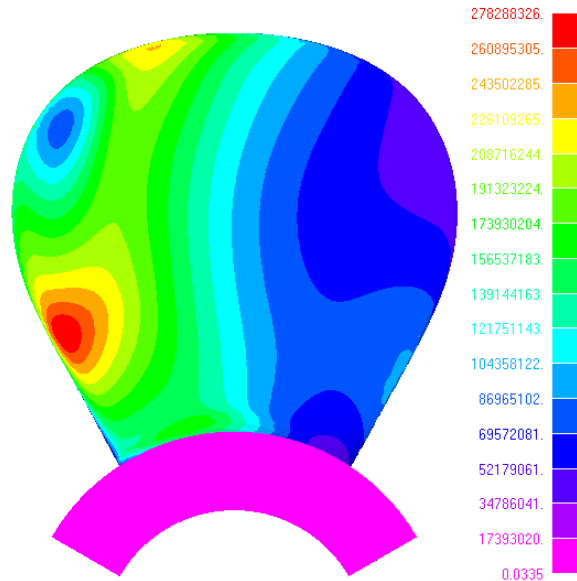


Засасывающая сторона

Гребной винт № 1



Гребной винт № 3



Нагнетающая сторона

Рисунок 64 – Эквивалентные напряжения в лопасти гребного винта.
Load Case 5

4.6. Технология проектирования гребных винтов с улучшенными кавитационными характеристиками по развитой кавитации на режимах движения в свободной воде

В данном параграфе 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 методу, разработанному и описанному 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 методу, описанному 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.

На рисунке 65 технология представлена в виде схемы.

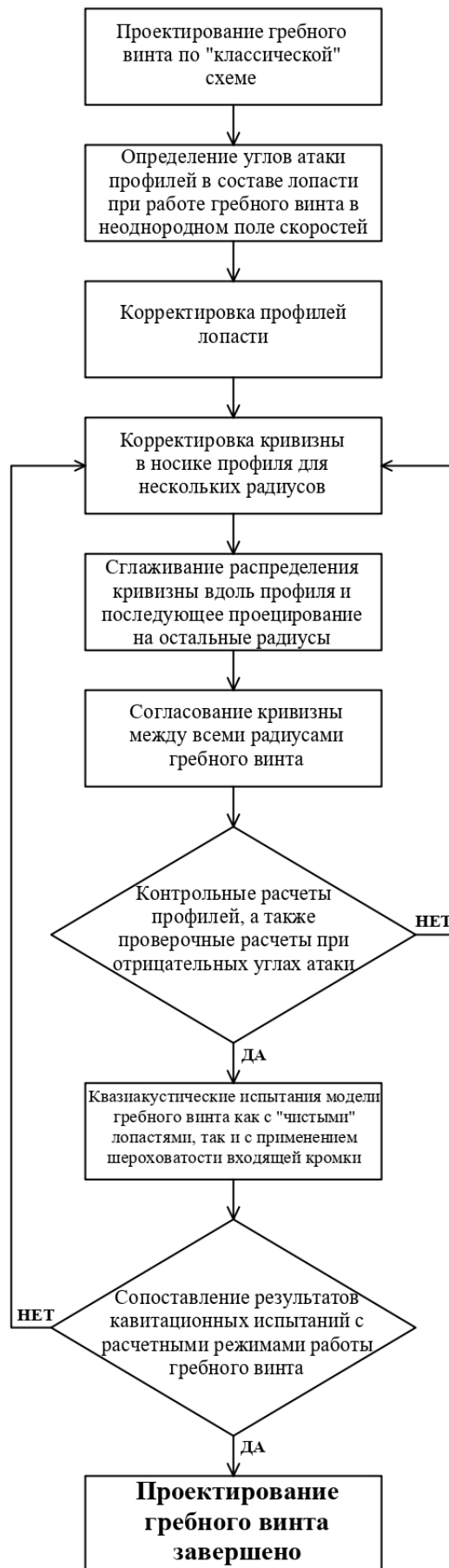


Рисунок 65 – Схема проектирования гребного винта по представленной технологии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы получены следующие основные результаты:

- проанализированы, а также сопоставлены с результатами натуральных 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:
 - корректированную 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 накопление данных по результатам натуральных наблюдений за кавитацией на гребных винтах с использованием современных бороскопических технологий и

уточнение методов моделирования кавитации за корпусом модели в отечественных кавитационных трубах и прогнозирования натуральных характеристик кавитации по данным модельных и натуральных испытаний.

Список использованной литературы

1. Артюшков Л.С., А.Ш. Ачкинадзе, А.А. Русецкий. Судовые движители. Ленинград «Судостроение», 1988 – 296 с.
2. Бавин В. Ф., Завадовский Н. Ю., Левковский Ю. Л., Мишкевич В. Г. Гребные винты. Современные методы расчета, Л.: Судостроение, 1983.
3. Багаев Д.В., Егоров С.В., Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Таранов А.Е. «Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений» Труды Крыловского ГНЦ №4 (382), 2017 стр. 46-56.
4. Базилевский Ю.С., Титов И.А. Совершенствование методик буксировочных и самоходных испытаний моделей надводных кораблей. Вопросы кораблестроения, вып., 52, 1983.
5. Басин А.М. Некоторые вопросы теории водометных движителей, Труды Академии речного транспорта, вып. 2, Водтрансиздат, 1953.
6. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л. Судостроение, 1963.
7. Бовис А. Морская гидродинамика. Теория и модели. Т. 2, Издательство ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2015 г, 178 с.
8. Вишневский Л.И., Тогуняц А.Р. Корабельные лопастные движители – новые технические решения, результаты исследований. СПб.: Судостроение, 2012.
9. Горшков А.С., Русецкий А.А., Борусевич В.О. Кавитационные трубы. Монография. Издательство ЦНИИ им.А.Н.Крылова, Санкт петербург, 2007 г, 250 стр.
10. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости, Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1961.
11. Денисихина Д.М., Лобачев М.П., Овчинников Н.А., Таранов А.Е. Опыт использования программного комплекса Star CD для расчета характеристик течения вязкой жидкости. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 31(315). СПб, 2007.
12. Дробленков В.В., Каневский Г.И., Карулина М.М., и др. Подъемная сила и вязкостное сопротивление винтовых профилей в вязкой жидкости и

- масштабный эффект гидродинамических характеристик гребных винтов – В сб.: Вопросы судостроения, 1982, вып. 32, с 93 – 102.
13. Жуковский Н.Е. Вихревая теория гребных винтов. – Избр. соч., т. 2, М. – Л., ГИТТЛ. 1948.
14. Завадовский Н.Ю., Титов И.А. Гидродинамические характеристики четырехлопастных гребных винтов для скоростных транспортных судов. – В сб.: Вопросы судостроения, 1974, вып. 5. с. 3 – 14.
15. Завадовский Н.Ю., Русецкий А.А. Метод расчета давлений на лопастях гребных винтов. – Труды НТО Судпрома. Л., Судостроение. 1977, вып. 253, с. 65 – 77.
16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям, Машиностроение, 1992.
17. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф. Метод расчета влияния шероховатости гребных винтов на винтовые характеристики двигателя – В кн.: Научно-технический сборник. Регистр СССР. Л., Транспорт. 1981, вып. 11, с. 39 – 51.
18. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Л.: Судостроение, 1972 – 320 с.
19. Кнэпп Р., Дейли Дж., Ф. Хэммит. Кавитация. «Мир», 1974, 687 с.
20. Копеецкий В.В. Теория идеального движителя. ЛКИ, 1960.
21. Король Ю.М., Корнелюк О.Н. Влияние лопастных и профильных характеристик на гидродинамическую эффективность гребных винтов. Наука и прогресс транспорта, 2017, 80 – 88 с.
22. Куликов С.В. К вопросу об определении момента наступления кавитации гребного винта, Судостроение, №5, 1958.
23. Курбацкий А.Ф. Моделирование турбулентных течений [обзор] // Известия сибирского отделения АН СССР. 1989. Вып.5. С.119–146.
24. Лаврентьев В.М. Судовые движители. М. – Л., Морской транспорт, 1949.
25. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М., Механика жидкостей. Москва: Мир, 1971 г., 669 с.

26. М.П. Лобачев, Н.А. Овчинников, А.Е. Таранов, И.А. Чичерин. Масштабный эффект в задачах судостроения – современные возможности оценки. Суперкомпьютерные дни в России 2016 с. 232 – 244.
27. Лобачев М.П., Сазонов К.Е., Чичерин И.А. Модельный и численный эксперимент в теории корабля. -Проблемы масштабного эффекта в гидродинамике. Сборник статей к 100-летию со дня рождения Ю.В.Кривцова. СПб, 2001, с. 33-45.
28. Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003 г.
29. Мавлюдов М.А. и др. Движители быстроходных судов. Л. Судостроение, 1982.
30. Мишкевич В.Г. Нелинейная вихревая теория гребного винта в однородном потоке идеальной жидкости. – В сб.: Вопросы судостроения, 1978, вып. 19, с. 70 – 82.
31. Мишкевич В.Г., Титов И.А. Об учете закручивания струи при расчете гидродинамических характеристик гребных винтов, работающих в равномерном и неравномерном потоках. – В сб.: Вопросы судостроения, 1977, вып. 15, с. 73 – 78.
32. Никущенко Д.В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT, СПГМТУ, СПб, 2006.
33. Новожилов В.В., Павловский В.А. Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости, СПГМТУ, СПб, 1998.
34. Пирсол И. Кавитация. Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева. М., «Мир», 1975. 95 с.
35. А.В. Пустошный. Проблемы ходкости транспортных судов. Монография, изд. Крыловский ГНЦ, Санкт-Петербург 2016.
36. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1971, 287 с.
37. Титов И.А. Проблемы прикладной гидродинамики. Л.: Судостроение, 1975.
38. В.К. Турбал, В.С. Шпаков, В.М. Штумпф. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов. Ленинград "Судостроение" 1983 г.

39. Achkinadze A.Sh., Krasilnikov V.I., Berg A., Stepanov I.E. Numerical analysis of podded and steering systems using a velocity based source boundary element method with modified trailing edge. Proceeding of Propeller. Shafting 2003 pp.12-1-12-22.
40. Achkinadze, A.S., Berg, A., Krasilnikov, V.I., and Stepanov, I.E. 2001 Numerical and Experimental Verification of the SPA/QSPA-POD Velocity-Based BEM Program for Steady and Quasi-Steady Analysis of the Podded Propellers. In Proceedings of SP'2001 Conference (Lavrentiev's Lectures), St Petersburg, Russia, June 19-21.
41. Achkinadze, A.A., Krasilnikov, V.I., 1997, "A Generalized Optimum Condition of Wake Adapted Propellers", Propellers/Shafting '97 Symposium, Virginia Beach.
42. Alexandrov K., Semionicheva E. Improvement of cavitating and vibroacoustic characteristics of blade hydraulic apparatus by optimization of the blades cylindrical section. St.Petersburg. Proc. Of ISC'94,1994.
43. Alexandrov, K., 1981, "Designing of Cavitating Profiles, Working in Predeterminate Range of Angles of Attack", Theses of XXX Krylov's Conference, Sudostroenie, Leningrad. (in Russian)
44. Arndt R.E.A., Song C.C.S., Kjeldsen M., He J., and Keller A., 'Instability of Partial Cavitation: A Numerical/Experimental approach', 2000.
45. Backstrom M., Juurma K., Wilkman G. New icebreaking tanker concept for the Arctic (DAT). Proceeding of POAK 95 Murmansk, Russia,1995.
46. Bensow R. E., Huuva T., Bark G., Liefvendahl, M. Large Eddy Simulation of Cavitating Propeller Flows. Proceedings of the 27th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 2008.
47. Bulten, N. and Oprea A.I., 'Consideration on deviations in torque prediction for propellers and waterjets with RANS codes', RINA, 2005.
48. Carlton J. Marine Propellers and Propulsion 3th Edition. Hardcover ISBN: 9780080971230. P. 544.
49. Deter D.R. SEDCO 445: Propulsion System for Dynamic Positioning

50. Feindt E.G. Untersuchungen über die Abhängigkeit des Umschlages laminar-turbulent von der Oberächenrauigkeit und der Druckverteilung // Jahrbuch STG. 1956. Bd. 50. P. 180–205.
51. Foeth E. J. 2008, 'The structure of Three-Dimensional Sheet Cavitation', PhD thesis at Delft University of Technology, The Netherlands, 2007.
52. Foeth E. J. and van Terwisga T. 2006, 'An attached cavity on a three-dimensional hydrofoil', CAV2006, Wageningen, The Netherlands, 2006.
53. Franc Jean-Pierre, Michel Jean-Marie. Fundamentals of Cavitation. Dordrecht: Kluwer Academic, 2004, 306 p. ISBN 1402022328.
54. Healey A.J., Rock S.M., Cody S.E., Miles D., Brown J.P. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 20(4), 1995, pp. 354-361.
55. Hydrodynamics: Computations, Model Tests and Reality, Wageningen, The Netherlands, May, 1992, p.497-509, p.539-555.
56. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test. 7.5 - 02 03-02.21. Page 1 of 9. Effective Date 2002.
57. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. 1978 ITTC Performance Prediction Method. 7.5 - 02 03-01.14. Page 1 of 9.
58. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Model – Scale Cavitation Test. 7.5 - 02 03-03.1 Page 1 of 9. Effective Date 2011.
59. Jessup S.D. et al. Local Propeller Blade Flow in Uniform and Sheared Onset Flows Using LDV Techniques. Proceedings of the 15 –th Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, 1985.
60. Jung-Kyu Choi, Hyoung-Gil Park, Hyoung-Tae Kim. A Numerical Study on Performance of Podded Propeller of Tractor Type. – Proceedings of the PRADS2013, 20-25 October, 2013, pp. 45 – 52.
61. Kerwin J.E., Lee C.S. Prediction of Steady and Unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory. Transactions, 1978, vol. 86, pp. 218 – 253.

62. Kuiper G. Scale Effects on Propeller Cavitation Inception. Naval Hydrodynamics. Washington, DC 1979, pp. 400 – 429.
63. Kim S.H., Choi G.H., Go S.C. Model Test and Numerical Simulation for Open-Water Characteristics of Podded Propulsion System. – Proceedings of the PRADS2013, 20-25 October, 2013, pp. 1148 – 1153.
64. KLEBANOFF, P.S., SCHUBAUER, G.B., TIDSTROM, K.D., 1955, Measurements of the Effect of Two-dimensional and Three-dimensional Roughness Elements on Boundary Layer Transition, J. Aeron. Sciences.
65. Knapp R.T., Daily J.W., Hammit F.G. Cavitation. New York: McGraw-Hill, 1970, 578 p.
66. Koop A., 2008, ‘Numerical Simulation of Unsteady Three-Dimensional Sheet Cavitation’, PhD thesis, at University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2008.
67. Korkut, E., Atlar, M., 2000, On the Importance of Effect of Turbulence in Cavitation Inception Tests of Marine Propellers, Proceedings of Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol.458 , pp. 29-48.
68. Krasilnicov V., Ponkratov D., Crepier P. A Numerical Study on the Characteristics of the System Propeller and Rudder at Low Speed Operation. Second International Symposium on Marine Propulsors smp’11, Hamburg, Germany, June 2011.
69. Krasilnikov V. I., Sun, J. (2008). Verification of an unsteady RANSE method for the analysis of marine propellers for high-speed crafts. Proceedings of the International Conference SuperFAST’2008.
70. Langtry, R.B., Menter, F.R. “Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes”, AIAA Journal, 2009, Vol. 47, No. 12, pp. 2894-2906.
71. Li, D.-Q. Validation of RANS predictions of open water performance of a highly skewed propeller with experiments // Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. 2004. 9 p.
72. Lightelijn J.T., Van Der Kooij J., Kuiper G., Van Gent W. Research on propeller-hull interaction in the depressurized towing tank. Hydrodynamics: computations,

- modeltests and reality. Amsterdam-London –NY-Tokyo:Elsevier Science Publishers,1992 pp 539-556.
- 73.Lobachev M., Ovchinnikov N., Pustoshnyy A. Supercomputer calculations as new tool in hydrodynamic routine: abilities, problems, perspectives – X International Conference on Hydrodynamics ICHD-2012, St.-Petersburg, Russia, Vol 1, 2012, pp. 13 – 20.
- 74.Menter F. R. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference. 1993. p. 2906.
- 75.Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994, vol. 32. pp. 1598-1605.
- 76.Menter, F.R., Langtry, R., Kuntz, M. “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”, Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (CD-ROM Proceedings). Redding, CT: Begell House Inc., 2003. pp. 625 – 632.
- 77.Meyne K. Untersuchungen der Propellergrenzschichtströmung und der Einfluss der Reibung auf die Propellerkenngrößen, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Band 66, 1972.
- 78.Nallasamy M., Yamamoto O., and Warsi S., Large-Scale Advanced Propeller Blade Pressure Distributions: Prediction and Data, NASA Technical Memorandum 102316 AIAA-89-2696.
- 79.Oprea A.I., Bulten N., Cavitation modelling using RANS approach WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011 University of Warwick, UK, 4th-6th July 2011.
- 80.Panov D., Smirnov E., Taranov A., and Lobachev M., “Simulation of laminar-turbulent approach in numerical determination of propeller performance curves,” Transactions of the Krylov State Research Centre, vol. 78 (362), pp. 29–42, 2013.
- 81.Reboud J.L., Stutz B. and Coutier-Delagosha O., ‘Two phase flow structure of cavitation: experiment and modeling of unsteady effects’, Third International Symposium on Cavitation, 1998.
- 82.Report of the Propulsor Committee, 20-th ITTC, 1993.

83. Sasajima T. A Study on the Propeller Surface Flow in Open and Behind Conditions. XIV ITTC, v.3, 1975.
84. Sparenberg J.A. Elements of hydrodynamic propulsion. Kluwer Academic Publication, 1983, 296 p. ISBN 9024728711.
85. Speziale C.G. On nonlinear K-1 and K-e models of turbulence. J. Fluid Mech., vol 178, pp. 459-475.
86. Stephen J. J. Ships In Ice - A Review. 25th Symposium on Naval Hydrodynamics St. John's, Newfoundland and Labrador, CANADA, 8-13 August 2004.
87. Tagori T. A Study Turbulence Stimulation Device in the Model Experiment on Ship Form. Proceedings Tenth ITTC, v.2, 1963.
88. Taranov A., Lobachev M. Influence of the Laminar-Turbulent Transition on the Accuracy of the Propeller Characteristics Prediction in the Model Scale. 978-1-4799-6824-4/15/\$31.00 c2015 IEEE.
89. Tsuda T. et al. Effect of Propeller Reynolds Number on Self-Propulsion Performance. J., of the Kansai Society of Naval Architects Japan, №169, 1978.
90. Validation of STAR-CCM+ for External Aerodynamics in the Aerospace Industry. Электронный ресурс. Режим доступа:
https://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/CD-adapco_AeroValidation_v7.pdf.
91. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method, Second Edition, Pearson Prentice Hall, 2007.
92. Wilcox, D.C. Simulation of transition with a two-equation turbulence model. AIAA Journal, 1994, vol. 32, pp. 247-255.
93. Yazaki et al. Effect of Turbulent Stimulator of Model Propeller on Propulsive Performances. XIV ITTC, v.3, 1975.
94. Young-Ha Pak et al. Influence of Stimulators on the Hydrodynamics Characteristics of 2-D Hydrofoil. J. of Ships and Ocean Engineering, v.28, №9, 1999.