


ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-19-34
УДК 629.5.035.55

А.В. Пустошный¹ , В.О. Борусевич¹, А.В. Бушуев², Ф.И. Габерцеттель¹

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт Петербург, Россия

² Головной филиал «НПО «Винт» ОАО «ЦС «Звездочка», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВИНТОВ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются винты регулируемого шага (ВРШ) различных конструкций. Цели – обобщение результатов работ по ВРШ в России и за рубежом, а также выявление научных задач, которые необходимо решить для развития производства и проектирования ВРШ в России.

Материалы и методы. Проанализированы экспериментальные исследования, проведенные в глубоководном бассейне и кавитационных трубах Крыловского центра. Проведен анализ результатов расчетных исследований гидродинамических и прочностных характеристик ВРШ с использованием современных методов вычислительной гидродинамики и метода конечных элементов (МКЭ).

Основные результаты. Рассмотрение истории развития проектирования и производства ВРШ в России позволяет утверждать, что в стране имеется значительный опыт создания ВРШ, которые могут эксплуатироваться в самых сложных условиях. Анализ опыта мирового судостроения показал, что ВРШ позволяют обеспечить не только оптимальный режим работы пропульсивного комплекса «двигатель – движитель» в условиях изменяющейся гидродинамической нагрузки винта, но и возможность улучшения кавитационных и виброакустических характеристик винтов за счет применения лопастей с умеренной и высокой саблевидностью. Саблевидность лопастей ВРШ может быть существенно выше, чем у винтов фиксированного шага (ВФШ), т.к. у ВРШ на реверсе отсутствует необходимость работы лопастей выходящими кромками вперед, за счет чего снижаются риски возникновения повышенных напряжений и повреждения лопастей с саблевидными лопастями при проведении экстренного реверса.

Изучение результатов испытаний ВРШ, проведенных в гидродинамической и кавитационной лабораториях Крыловского центра, а также результатов зарубежных расчетных исследований позволило обоснованно оценить преимущества ВРШ. Это также позволило выявить проблемы, которые требуют проведения исследований и учета при проектировании ВРШ с высокой саблевидностью лопастей, обеспечивающих улучшение характеристик винтов при их работе на режимах, соответствующих частичной кавитации и возникновению кавитации.

Заключение. В настоящее время в России имеется все необходимое для расширения производства и широкого внедрения отечественных ВРШ. При этом применение лопастей ВРШ с умеренной и высокой саблевидностью обеспечивает определенные резервы улучшения виброакустических характеристик по сравнению с ВФШ. Однако для корректного проектирования таких лопастей с учетом возможных рисков при их применении необходимо использование при проектировании современных расчетных и экспериментальных методов, а также накопление опыта натурных испытаний.

Ключевые слова: винты регулируемого шага (ВРШ), кавитация, саблевидность (skew) лопастей, кавитация, виброактивность.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

NAVAL ARCHITECTURE

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-19-34
UDC 629.5.035.55

Для цитирования: Пустошный А.В., Борусевич В.О., Бушуев А.В., Габерцеттель Ф.И. Применение современных конструкций винтов регулируемого шага и особенности их проектирования. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 19–34.

For citations: Pustoshny A.V., Borusevich V.O., Bushuev A.V., Gaberzettel F.I. Applications and design peculiarities of modern controllable-pitch propellers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 19–34 (in Russian).

A.V. Pustoshny¹ , V.O. Borusevich¹, A.V. Bushuev², F.I. Gaberzettel¹

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² NPO Vint, JSC Ship Repair Centre Zvezdochka, Moscow, Russia

APPLICATIONS AND DESIGN PECULIARITIES OF MODERN CONTROLLABLE-PITCH PROPELLERS

Object and purpose of research. This paper discusses controllable-pitch propellers (CPPs) of various designs. The purpose of this study was to summarize the findings of CPP studies in Russia and abroad, as well as to identify current challenges in Russian CPP design and manufacturing.

Materials and methods. This paper relies on the test data obtained at Deepwater Tank and cavitation tunnels of Krylov State Research Centre. It analyses the results of computational studies for CPP hydrodynamics and strength obtained as per the latest techniques of CFD and FE analysis.

Main results. The history of CPP design and manufacturing in Russia clearly shows that our country has considerable expertise in design of controllable-pitch propellers that can operate in the harshest conditions. Analysis of global shipbuilding experience has shown that CPPs not only ensure optimal operational conditions for “engine-propeller” system in the conditions of variable hydrodynamic load on the propeller, but also feature better cavitation and vibroacoustic performance because the skew of CPP blades can be moderate and high: actually, it can be significantly higher than for fixed-pitch propellers (FPPs) because FPP blades in reversal conditions do not have to operate their trailing edges forward, which reduces the risk of high stresses and damage of skewed blades in crash-stop scenarios.

Analysis of CPP test results obtained at Krylov State Research Centre hydrodynamic and cavitation laboratories, as well as the findings of foreign computational studies enabled justified assessment of CPP advantages. It also highlighted the challenges that require dedicated studies and special consideration in design of skewed CPPs, so as to improve their performance in partial-cavitation and cavitation-inception conditions.

Conclusion. Currently, Russia has all the pre-requisites for increased production and wide application of modern CPPs. Controllable blades with moderate and high skew have a certain potential in terms of improving their vibroacoustic performance as compared to FPPs. However, to design these blades correctly, with consideration of their possible operational risks, it is necessary to use state-of-the art computational and experimental methods, as well as to rely on the experience of full-scale trials.

Keywords: controllable-pitch propellers (CPPs), cavitation, skew, cavitation, vibration.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В последние годы в судостроении России все большее внимание уделяется применению винтов регулируемого шага (ВРШ). Для транспортных судов первым аргументом в пользу ВРШ традиционно [1] считается возможность повышения экономичности за счет обеспечения близкого к оптимальному режима работы двигателей при значительных изменениях гидродинамической нагрузки гребного винта (ГВ) в ходе эксплуатации судна, например в штормовых условиях, когда судно преодолевает дополнительное сопротивление на волнении, при работе с буксируемыми устройствами, при обрастании корпуса.

Другим важнейшим общепринятым аргументом в пользу применения ВРШ является возможность проведения быстрого реверса судна без изменения направления вращения вала. Альтернативный путь реверса – при применении ВФШ с изменением направления вращения вала – требует организации

реверсивной зубчатой передачи, включая разобщающие муфты. Однако такая система не позволяет обеспечить быстрый реверс, т.к. как после сброса мощности, подводимой для вращения вала вперед, необходимо выждать определенное время (как правило, несколько минут), пока обороты винта естественным образом снизятся, и лишь затем начать наращивать мощность реверсивного вращения вала. Если не сделать такой задержки, существует высокая опасность повреждения передачи после начала реверса (перегрев муфты).

Очевидно, что для ВРШ этой проблемы не существует, т.к. изменением шага лопастей можно за короткое время обеспечить реверсивную тягу движителя и быстрое торможение судна. Это преимущество ВРШ используется, например, для транспортных судов при применении считающейся наиболее экономичной пропульсивной компоновки «малооборотный дизель с прямой передачей на вал и ВРШ».

Также ВРШ дает преимущество по времени реверса и существенное упрощение передачи при применении на быстроходных судах и кораблях

нереверсивных турбин. Напомним, что в СССР развитию производства ВРШ большой мощности для скоростных судов не уделялось должного внимания. Применялись ВФШ, для которых быстрый реверс обеспечивался применением производившихся на Украине реверсивных турбин, несмотря на то, что их эффективность по сравнению с нереверсивными турбинами была ниже на величину порядка 7 %. Готовность платить такую цену указывает на важность проблемы реверса.

Следует отметить, что особенностью ВРШ, устанавливаемых в сочетании с газовыми турбинами, является высокая удельная мощностная нагрузка на гребные винты, величина диаметра которых имеет ограничения, связанные с компоновкой кормовой оконечности. Необходимо учитывать, что ВРШ не могут иметь дисковое отношение свыше величины примерно 0,75. При большем дисковом отношении невозможно обеспечить поворот лопастей на реверс – при прохождении положения лопастей с шагом, близким к нулевому, соседние лопасти не должны контактировать друг с другом. Поэтому при проектировании ВРШ должна решаться задача снижения гидродинамической нагрузки ГВ для предотвращения второй стадии кавитации, влияющей на пропульсивные характеристики. При ограничении дискового отношения это возможно только путем увеличения диаметра ГВ с соответствующим этой задаче проектированием корпусов и валовых линий.

Указанные выше преимущества ВРШ являются наиболее очевидными. Однако имеют место не настолько очевидные, но не менее значимые преимущества ВРШ, связанные с возможностью применения лопастей с существенно большей по сравнению с ВФШ саблевидностью (большим углом саблевидности, или, в международной терминологии, – углом skew, определение которого по правилам РМРС [2] показано на рис. 1 как максимального из углов θ_1 и θ_2).

Прежде всего эти преимущества связаны со снижением при применении саблевидных лопастей виброактивности (уровней пульсаций давлений на корпусе, индуцированных кавитирующим ГВ) и шумоизлучения от гребного винта. Этот эффект обусловлен тем, что саблевидная лопасть проходит через зоны максимальной неоднородности потока за корпусом не одновременно всеми радиальными сечениями, так что кавитация на разных радиусах возникает не одновременно, и объем существующих в данный момент каверн существенно уменьшается.

Несколько сложнее обстоит дело с характеристиками возникновения кавитации, т.к. для них

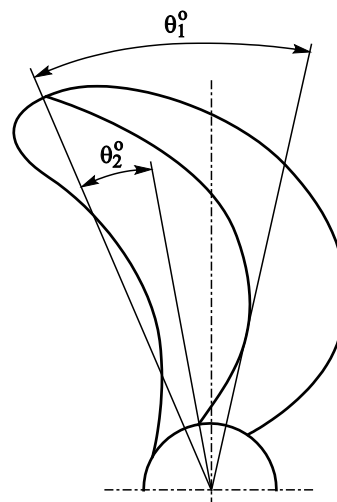


Рис. 1. Определение угла skew по правилам Регистра [2]

Fig. 1. Definition of skew angle as per RS Rules [2]

нельзя указать столь же очевидных причин для возникновения различий по началу кавитации на саблевидных и несаблевидных лопастях. Однако ниже будут приведены соображения, основанные на результатах исследований ряда авторов, свидетельствующих, что на саблевидных лопастях следует ожидать улучшения характеристик начальных стадий кавитации (этот вопрос заслуживает отдельного исследования).

Необходимо отметить, что ВРШ является существенно более сложной технологией по сравнению с традиционными винтами фиксированного шага (ВФШ), т.к. для изменения шага винтов в ступице ВРШ и валопроводе располагается механизм изменения шага (МИШ), как правило, гидравлический. Этот механизм обеспечивает поворот лопастей вокруг их осей, что и приводит к установке лопасти с необходимым для данного режима шагом.

Соответственно, необходимость размещения МИШ приводит к увеличению относительного диаметра ступицы ВРШ по сравнению с ВФШ. Как правило, для ВФШ относительный диаметр ступицы характеризуется величиной порядка 0,2, для ВРШ – порядка 0,3–0,33. Такое различие относительного диаметра ступицы приводит к тому, что КПД ВРШ на 2–3 % ниже по сравнению с КПД равноупорного ВФШ. Существуют небольшие различия в диаметре ступицы у различных производителей ВРШ, но их влияние на КПД незначительно, существенно меньше по сравнению с разницей КПД между ВФШ и ВРШ.

В судостроительных кругах циркулирует мнение, что в России производство ВРШ отсутствует и что сегодня можно рассчитывать только на импортные ВРШ. Однако такое мнение является ошибочным, и учитывая, что в сложившейся геополитической обстановке закупка импортных ВРШ не только затруднительна, но и опасна с точки зрения обеспечения технологической независимости отечественного судостроения, необходимо ускорить и расширить применение отечественных ВРШ.

В связи с этим необходимо напомнить, что ранее в СССР серийное производство ВРШ успешно функционировало на ряде заводов с разделением специализации, в т.ч. на Балтийском, Ижорском и Пролетарском заводах, а также на заводе «Вега», входящем в состав НПО «Винт». Кроме того, ВРШ относительно небольших размеров (диаметром до 4 м) производил завод «Ленинская кузница» (Киев), поставлявший ВРШ для рыболовецкого флота, буксиров и других судов.

На основе этой производственной базы до 1990 г. было изготовлено более 4000 комплектов ВРШ, в т.ч. 6 комплектов на мощность 22 000 кВт (диаметр 8,5 м) для супертанкеров «Крым» и 1 комплект для атомного лихтеровоза «Севморпуть» на мощность 29 000 кВт (диаметр 6,7 м). При этом винты лихтеровоза, а также 6 комплектов ВРШ на мощность около 14 000 кВт (диаметр 5,7 м) для судов арктического снабжения типа «Иван Папанин» были изготовлены на класс УЛА.

Показателем высокой надежности отечественных ВРШ может служить тот факт, что на списываемых судах ВРШ обычно находились в рабочем состоянии. Все они удовлетворяли требованиям Регистра об обеспечении десятилетней эксплуатации без выемки вала. ВРШ из маломангитной стали, поставленные в Индию, прошли 30-летний срок эксплуатации без ремонта. В подтверждение возможностей отечественной промышленности в области производства ВРШ можно привести недавний опыт изготовления образца винта регулируемого шага мощностью 20 МВт. Кроме того, сейчас идет процесс создания ряда крупных ВРШ.

Таким образом, развитие ВРШ в России имеет определенный опыт. При этом ориентировка заказчиков на импорт привела к тому, что наша страна, оставаясь крупным производителем ВФШ, к концу первого десятилетия XXI в. производила только единичные ВРШ диаметром до 3 м на заводе «Вега» НПО «Винт», в основном для удовлетворения потребностей ВМФ и пограничной службы ФСБ.

В настоящее время для создания новых конструкций ВРШ, в т.ч. большой мощности, и для организации их серийного производства формируется новая кооперация. Основные усилия по производству ВРШ берет на себя Центр судоремонта «Звездочка» (силами филиалов НПО «Винт», СОЗ «Вега» и ЦПС). В кооперацию входят также АО «ОНСС», АО «АЭМ-технологии», в перспективе может войти АО «Балтийский завод». Научное обеспечение по-прежнему является прерогативой Крыловского центра, который накопил большой опыт проектирования ВФШ и имеет экспериментальное оборудование и специализированное программное обеспечение, адаптированные к работе с задачами, характерными для ВРШ.

Применение отечественных ВРШ становится принципиально важным элементом создания перспективной продукции судостроения. Опыт развития производства ВФШ показал, что успешное развитие возможно только при заинтересованности заказчиков, производителей и проектантов, а также при постоянной работе по совершенствованию продукции. Для корректных оценок плюсов и минусов применения ВРШ требуется анализ различных аспектов, рассмотрение которых необходимо при выборе и проектировании гребных винтов. Такой анализ представлен в настоящей статье.

Проблемы применения ВРШ с большой саблевидностью лопастей

Operational challenges of skewed controllable-pitch propellers

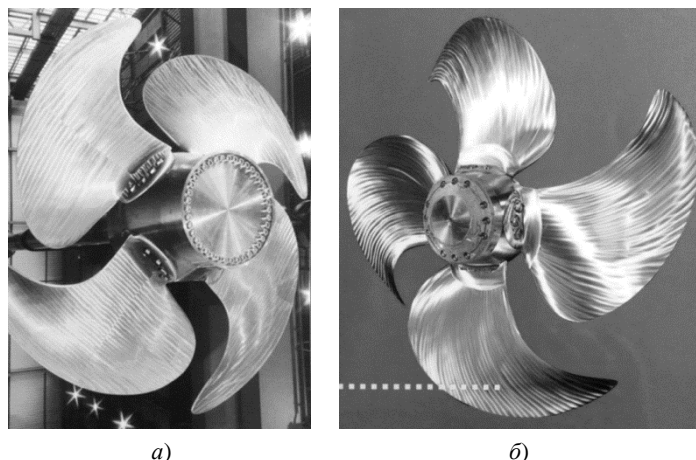
В настоящее время общепринятой является позиция, что увеличение угла саблевидности лопастей гребных винтов, работающих в неоднородном потоке за корпусом, приводит к заметному снижению индуцированных ГВ пульсаций давлений и шумоизлучения. Для ВФШ с большой саблевидностью лопастей это впервые отмечено в работах [3, 4]. Обзор работ по гидродинамике и кавитации винтов с большим skew приведен в [5].

Там же отмечен существенный недостаток лопастей с большой саблевидностью, который приводит к необходимости учитывать риски при их применении – существенное различие картины напряжений в лопастях ВФШ с большим skew на переднем ходу и на реверсе.

Представленные на рис. 2 (см. вклейку) картины напряжений при работе типичных саблевидных лопастей ВФШ, полученные расчетом по методу конеч-

Рис. 4. Примеры винтов регулируемого шага с большим skew из рекламных материалов фирм Schottel (а) и LIPS (б)

Fig. 4. Examples of controllable-pitch propellers with high skew: a) Schottel; b) LIPS



ных элементов (МКЭ) для переднего хода и на реверсе, демонстрируют, что на обоих режимах на лопасти вблизи выходящей кромки формируются концентраторы напряжений. При этом напряжения в концентраторе на реверсе примерно втрое выше, чем при работе на переднем ходу (104 и 38 мПа соответственно).

Для переднего хода указанные концентраторы могут приводить к образованию усталостных трещин, развивающихся от выходящей кромки вглубь лопасти (что имело место на начальных этапах внедрения саблевидных лопастей на ВФШ в 1980-х гг.). На реверсе при некорректном учете риска в проекте винта концентраторы могут провоцировать деформацию лопастей или инициировать образование трещин, которые при дальнейшей эксплуатации ГВ будут развиваться как усталостные. Такие риски повреждений винта повлекли за собой развитие обязательного применения МКЭ при оценке прочности саблевидных лопастей. С помощью таких расчетов уже разработаны методы снижения напряжений в концентраторах при проектировании винта.

Аналогичные исследования напряжений, выполненных для нетипичного для ВФШ применения лопастей со skew свыше 40° (рис. 3, см. вклейку), показали, что в этом случае на реверсе существует опасность распространения высоких напряжений от выходящих кромок поперек всего «уха» (сдвинутой назад концевой части) лопасти. Напряжения на реверсе почти на порядок выше, чем на переднем ходу, и это может привести к загибу «уха» лопасти.

На практике результаты исследований картин напряжений, а также опыт внедрения винтов с саблевидными лопастями привели к тому, что величина skew лопастей ВФШ не превышает $30\text{--}35^\circ$.

В борьбе за снижение пульсаций давлений и шумоизлучения от гребного винта, работающего

в неоднородном потоке, производители и заказчики винтов нашли выход для безопасного с точки зрения прочности лопастей увеличения угла skew – применение таких лопастей в составе ВРШ. Лопасти ВРШ на реверсе по-прежнему работают входящими кромками вперед, и острота прочностных проблем существенно снижается.

ВРШ с большой саблевидностью усиленно продвигали ведущие фирмы – производители гребных винтов – LIPS, Schottel, Kamewa (рис. 4). В их рекламных материалах упоминалось применение лопастей ВРШ со skew $50\text{--}60^\circ$, что по соображениям прочности недопустимо для ВФШ.

Наиболее активно свои достижения в области ВРШ с саблевидными лопастями в первые два десятилетия XXI в. продвигала в России фирма Andritz Hydro. (После ряда поглощений в ее состав вошло предприятие по производству ВРШ Escher Wyss. Ранее оно существовало как самостоятельная фирма, которая в 1934 г. выпустила первые в мире ВРШ.) Сейчас Andritz поставляет по всему миру ВРШ, сохраняя традиционным лейбл Escher Wyss (виден на лопастях на рис. 6), и имеет значительный опыт создания ВРШ для тральщиков, корветов, фрегатов, десантных судов и мегаяхт. В России поставлявшиеся фирмой ВРШ обычно называют по наименованию фирмы-поставщика Andritz, хотя в принципе корректно применение наименования Escher Wyss (в статье применяются оба обозначения).

В рекламных материалах фирмы в качестве примеров продукции Andritz приводится фото семилопастного ВРШ с умеренным skew (рис. 5); прогнозируемо, что увеличение числа лопастей существенно улучшает акустические характеристики. В этих же материалах есть фото пятилопастного

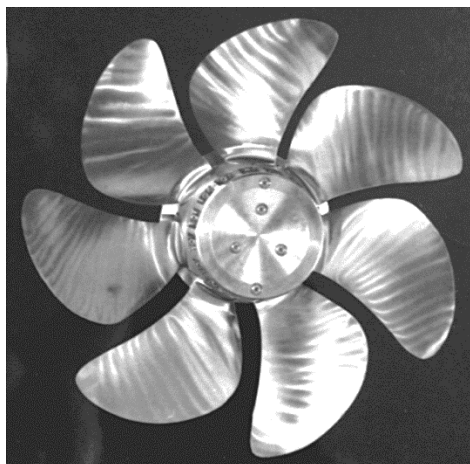


Рис. 5. Семилопастный винт регулируемого шага для снижения шумности, рекламируемый Andritz

Fig. 5. Seven-blade silent controllable-pitch propeller by Andritz

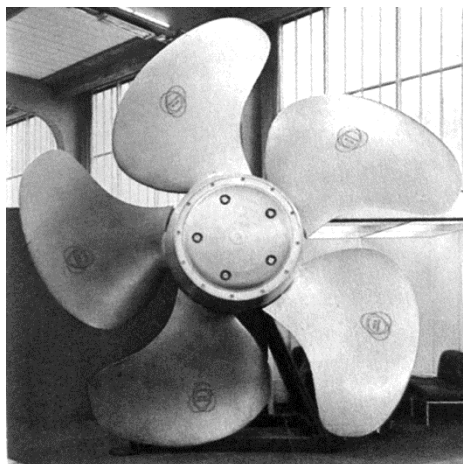
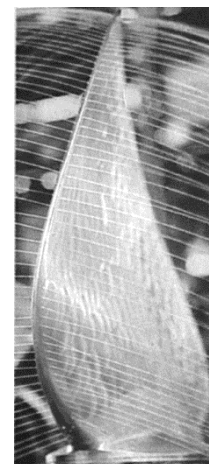


Рис. 6. Пятилопастный винт регулируемого шага с улучшенными акустическими характеристиками, рекламируемый Andritz (слева), и испытания системы подвода воздуха к его лопастям (справа)

Fig. 6. Five-blade silent controllable-pitch propeller by Andritz (left) and tests of air supply system for its blades (right)



ВРШ с традиционным умеренным skew (рис. 6), на котором для снижения кавитационной шумности применяется подвод воздуха к лопастям.

Следует обратить внимание, что на рис. 4 и 5 представлены ВРШ, конструкция которых не предусматривает крепление лопастей с помощью болтов за фланец. Это, по заключению российских специалистов, может вызвать трудности при ремонте на судоремонтных заводах, т.к. для замены лопастей требуется полная разборка ступицы. В качестве альтернативы на рис. 7 представлен также рекламируемый Andritz вид лопасти для НК с болтовым креплением фланца. На рис. 8 представлен тип лопасти «с экстремально саблевидными лопастями», также продвигаемый Andritz. По анализу фото можно оценить угол skew правой лопасти величиной около 60° .

Такой вид лопасти в публикации специалиста фирмы описывается как разработанный для суперяхт [6] (вид ГВ с такими лопастями на суперяхте представлен на рис. 9). По опыту работы Крыловского центра, основные требования для суперяхт – предельно низкие вибрации, т.е. максимальное снижение пульсаций давления на корпусе. Яхты эксплуатируются, как правило, на ограниченном ряде эксплуатационных скоростей (полный ход, малый ход, экономический ход). При этом никаких рабочих процессов, связанных с характеристиками шумоизлучения винтов, например режимов работы с ГАС, для яхт обычно не предусмотрено.

Поэтому перспективы использования таких ВРШ для судов с требованиями по шумоизлучению следует оценивать с большой осторожностью, учитывая, что реальных исследований всех характеристик таких винтов пока не опубликовано.

Существенное облегчение решения проблемы прочности для лопастей с большим skew при применении таких лопастей в составе ВРШ привело к обострению свойственной ВРШ проблемы определения и учета при проектировании МИШ скручивающего момента (момента относительно вертикальной оси лопасти). При применении лопастей с большой саблевидностью назад скручивающие моменты резко увеличиваются.

Работы по определению и снижению скручивающего момента начались в середине 1950-х. В 1980-х гг. в Крыловском центре (на тот момент – ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова) была разработана необходимая аппаратура и проведены систематические измерения этих моментов. Измерения скручивающих моментов стали, как правило, входить в объем модельных испытаний по каждому проекту с ВРШ. Были проведены натурные измерения скручивающих моментов на ВРШ с лопастями различной конструкции и намечены пути снижения скручивающих моментов. В частности, было отмечено, что снижение скручивающих моментов при заданном дисковом отношении возможно посредством уменьшения конструктивного шага, но это ведет к ухудшению пропульсивных и особенно ка-

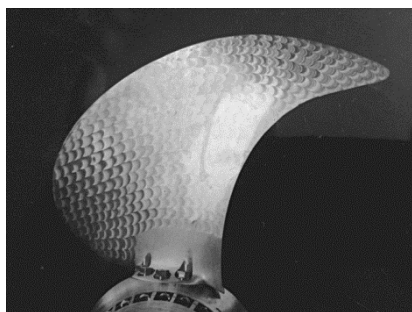


Рис. 7. Лопасть винта регулируемого шага с болтовым креплением фланца к ступице

Fig. 7. Controllable-pitch propeller blade bolted to hub

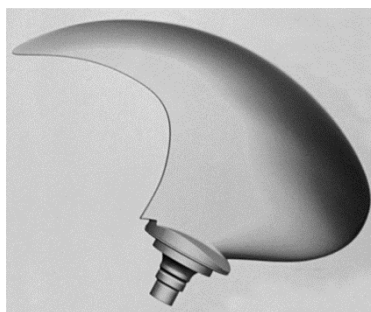
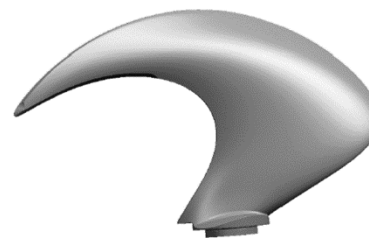


Рис. 8. Лопасти винта регулируемого шага с экстремальным значением skew

Fig. 8. Controllable-pitch propeller blades with extreme skew



витационных качеств ВРШ, так что возможности использования этого метода ограничены.

В качестве эффективной меры для снижения скручивающего момента во всем мире применяются лопасти с балансной саблевидностью. Их конструкция предусматривает, что от ступицы примерно до относительного радиуса 0,5 сечения лопасти сдвинуты вперед относительно ее оси, а при больших радиусах начинается плавный, увеличивающийся к концу лопасти сдвиг сечений назад от оси. Вид балансной саблевидности можно видеть на рис. 1, 5–8. Серийные испытания моделей таких ВРШ проводились в рамках сотрудничества Крыловского центра с Болгарским институтом гидродинамики судна [7].

Экспериментально показано и принято в международной практике, что в качестве расчетных для оценки мощности привода можно принимать моменты на швартовном режиме. Анализ условий работы ВРШ показал, что привод поворота лопастей подвергается наибольшему нагружению при реверсе с заднего на передний ход. На ходовых режимах

максимальные моменты возникают на полном переднем ходу. Эти моменты также необходимы для расчета конструкций механизма поворота лопастей в ступице ВРШ, но не определяют мощность привода. Тем не менее при выборе контура лопасти необходимо добиваться снижения моментов на всех режимах.

Информация о скручивающих моментах, использовавшаяся при проектировании ступиц ВРШ (15–20-летней давности), основана на экспериментальных данных, полученных в Крыловском центре, а также на зарубежных данных, попавших в распоряжение проектантов. Однако при использовании экспериментальных методов следует учитывать, что нестационарность процессов, происходящих на ВРШ при работе на сугубо нерасчетных режимах, соответствующих реверсу (в частности, срыв вихрей при обтекании лопастей), приводит к тому, что экспериментальные данные на этих определяющих нагрузке режимах часто имеют большие разбросы значений, так что их следует рассматривать как достаточно приближенные.

Рис. 9. Винты с экстремальным skew на суперяхте

Fig. 9. Extreme-skew controllable-pitch propellers for a superyacht



На основании результатов испытаний по измерению скручивающих моментов в процессе перекачки лопастей к началу 1980-х гг. был разработан простой и доступный квазистационарный подход к расчету моментов при реальных скоростях перекачки. Ко второй половине 1980-х гг. при разработке метода поверочного расчета ВРШ на основе теории несущей поверхности был также создан метод расчета скручивающих моментов, в т.ч. при значениях шага, отличных от конструктивного.

Данный научный фундамент позволил НПО «Винт», принимавшему участие в его формировании, разработать в 1970–1980-х гг. более 30 проектов ВРШ. Однако результаты указанных исследований по скручивающим моментам можно охарактеризовать как совокупность весьма приближенных расчетных методов, пригодных для анализа лишь общих закономерностей зависимостей скручивающих моментов. Для практического использования задача определения скручивающих моментов требовала развития с помощью современных расчетных методов.

В Крыловском центре был разработан метод [8] определения скручивающих моментов на базе RANS-метода расчета течения вязкой жидкости с использованием коммерческих программных пакетов. Это позволило говорить о выведении расчетного метода на уровень технологии, которая после набора статистических данных позволит отказаться от применения эксперимента и расчетов по приближенным методам.

На рис. 10 (см. вклейку) сопоставлены расчетная и экспериментальная зависимости коэффициента скручивающего момента на лопасти ВРШ C_m от поступи гребного винта J при различных углах поворота лопасти Ψ . Здесь $C_m = M/(\rho n^2 D^3)$; $J = V/nD$; M – момент, действующий на лопасть ВРШ относительно оси поворота лопасти; V – скорость набегающего потока; ρ – плотность жидкости; n – частота вращения гребного винта; D – диаметр гребного винта. Точками на рисунке показаны результаты расчета [8] для данной поступи, сплошными линиями – аппроксимирующие экспериментальные результаты.

Как видно из приведенных результатов, согласование расчета и эксперимента вполне удовлетворительное. Наибольшие погрешности не превосходят 15 % от максимального значения скручивающего момента. Причем в области наибольших моментов, т.е. на поступях, близких к швартовному режиму, и при угле поворота лопасти 45° , погрешности не превышают 5–7 %. Таким образом, достиг-

нутая точность достаточна для практического использования результатов расчета.

Анализ публикации [6] с описанием инструментария, применяемого фирмой Andritz для проектирования ВРШ, показал, что набор методов в области гидродинамики весьма близок к применяемому в Крыловском центре.

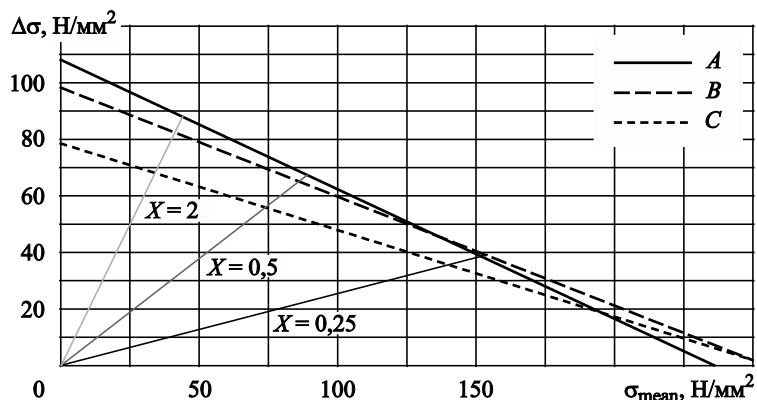
На первой стадии проектирования в фирме используется вагенингенская В-серия. Однако, учитывая ряд недостатков серии, по ней определяются только основные параметры, по которым выбирается только один из наиболее близких винтов, ранее произведенных фирмой, или проектируется стандартный для фирмы винт расчетными методами. Дальнейшее уточнение распределения шага, кривизны, skew и толщины проводится панельным методом. Для более точных расчетов могут применяться RANS-методы расчета вязкой жидкости, которые рассматриваются как все более важные для расчета пропульсивных характеристик, включая расчет и учет при проектировании характеристик винтов на не-проектных режимах.

Однако, как отмечено в [6], их использование существенно увеличивает время подготовки и расчетов (что является препятствием также для повседневного использования RANS-методов в текущем проектировании винтов в Крыловском центре). Специалисты Andritz участвовали в развитии ряда компьютерных методов для решения задач гидродинамики. Поскольку требования по подводному шуму становятся все более востребованным фактором, а признанные компьютерные оценки подводного шума пока не разработаны, Andritz осуществляет расчеты методами RANS в сочетании с акустическими расчетными программами. При этом даже с учетом наличия передовых расчетных методов Andritz настоятельно рекомендует проведение модельных испытаний на соответствующих экспериментальных установках, что полностью совпадает с позицией Крыловского центра.

Представляется интересным описанный в статье [6] подход по оценке прочности лопастей, которая, как и в отечественной практике, рассматривается как интегральная часть проектирования винтов. Толщина лопастей обычно рассчитывается по правилам классификационного общества и дополнительно проверяется расчетом по методу конечных элементов, что рассматривается как обязательная процедура. Изменяющиеся во времени нагрузки при работе лопастей в неоднородном поле скоростей закладываются в расчет с помощью програм-

Рис. 11. Диаграмма Хэя [6]

Fig. 11. Haigh diagram [6]



мы ANSYS для расчета напряжений Мизеса. При этом выделяются среднее, максимальное и минимальное напряжения: σ_{mean} , σ_{max} , σ_{min} .

Оценка продолжительности жизненного цикла винта осуществляется по диаграмме Хэя (Haigh) (рис. 11), которая в России не применяется.

На диаграмме абсцисса представляет среднее напряжение, а ордината – амплитуду изменения напряжения. Для входа в диаграмму Хэя используются формулы:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{mean}} \quad (1)$$

$$X = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{mean}}) / \sigma_{\text{mean}} \quad (2)$$

Формула (1) определяет ординату на диаграмме Хэя, а формула (2) определяет постоянный градиент наклонных прямых на рис. 11 при различных средних напряжениях и позволяет определить положение расчетной точки на диаграмме. Линии A, B, C являются пограничными для различных материалов винта. Запас против разрушения представляет собой дистанцию между операционной точкой и пограничной линией для данного материала. Запас против усталостных разрушений можно определить исходя из соотношения расстояний: а) между началом координат и точкой пересечения постоянной линии; б) между расчетной точкой и началом координат.

В России оценка прочности в большей степени базируется на оценках не долговечности, а экстремальных нагрузок на нерасчетных режимах (прежде всего, при аварийном реверсе с полного вперед на полный назад). Такое проектирование позволяет обеспечить достаточные запасы прочности.

Отметим, что возможность применения конфигурации лопасти с экстремальным и даже умеренным skew в условиях России требует специального рассмотрения с точки зрения опасности взаимодей-

ствия со льдом. По опыту судов типа «река – море» европейской постройки даже при случайных контактах с легким льдом высока опасность загиба «уха» лопасти, так что винт придется менять или ремонтировать. В то же время при компоновке кормы, которая допускает, что часть диска винта располагается ниже ватерлинии, вопрос взаимодействия со льдом может стоять менее остро.

В этой связи при принятии решения о выборе skew необходимо учитывать, имеется ли опасность взаимодействия со льдом в течение жизненного цикла (для большинства традиционных винтов быстроходных судов такой вопрос даже не ставился). В обоснование безопасности целесообразно также провести исследование вероятности взаимодействия винтов со льдом при заданной конфигурации кормы.

Особенности гидродинамики лопастей винта регулируемого шага с большим skew

Hydrodynamic peculiarities of high-skew controllable-pitch propellers

Особенности работы лопастей с большим skew могут быть проиллюстрированы результатами [9] расчетного исследования обтекания винтов с тремя значениями skew, как показано на рис. 12.

Сопоставление обтекания концевых сечений лопастей со skew 31° и 62° (рис. 13, см. вклейку) показывает, что при умеренном skew концевой вихрь формируется на самом конце лопасти и за ней. В то же время для винта с большим skew формирование вихря начинается ранее, не у конца лопасти, и поток на засасывающей стороне направлен от концевой кромки внутрь лопасти. Концевой вихрь за лопастью с экстремально большим skew начинает закручиваться, охватывая ее конец.

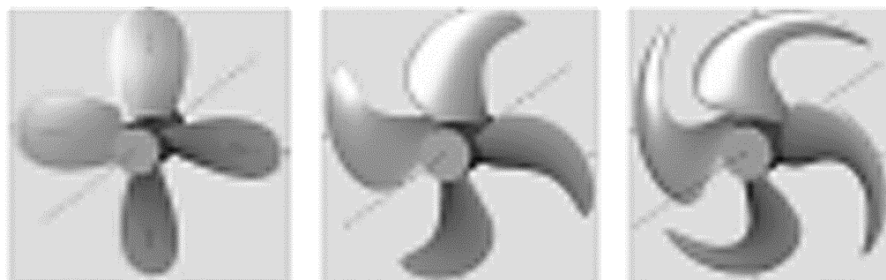


Рис. 12. Вид лопастей, исследованных в [9]. Слева направо – skew 0°, 31°, 62°

Fig. 12. Blades studied in Reference [9]. Left to right: skew angle 0°, 31°, 62°

Это подтверждается картиной кавитации концевое вихря на модельном фото рис. 14 и дает основание предполагать, что наличие плоской пластины – части лопасти внутри концевое вихря – должно снижать его интенсивность и отдалять образование кавитации концевое вихря.

Дополнительно, на рис. 15 (см. вклейку), показано расчетное распределение коэффициента давления на лопастях с различным skew [9]. Видно, что с увеличением skew заметно ниже максимальное разрежение на засасывающей стороне лопасти (в верхней части графиков, т.к. по оси ординат дана величина C_p), что также указывает на снижение опасности возникновения кавитации концевое вихря. Так, при переходе от skew 31° к 62° снижение коэффициента максимального разрежения на концевых радиусах C_p (относительно $(nD)^2$) составляет порядка 15 % на относительном радиусе 0,9 и около 18 % на радиусе 0,95, что существенно для возникновения кавитации на периферии лопасти.



Рис. 14. Картина образования концевое вихря на лопасти с большим skew (конец лопасти полностью охвачен концевым вихрем). Фото [10]

Fig. 14. Tip vortex generation on high-skew blade (blade tip entirely occupied by the vortex). Photograph as per [10]

Российские исследования влияния саблевидности лопастей на гидродинамические и кавитационные характеристики винта регулируемого шага

Russian studies of skew effect upon hydrodynamics and cavitation of CPPs

В России винты с экстремально большой саблевидностью лопастей не применялись. В Крыловском центре проводились работы по исследованию гидродинамических и кавитационных характеристик винтов с умеренно саблевидными лопастями, которые позволили накопить опыт, полезный для проектирования таких лопастей, в т.ч. для ВРШ.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние умеренного skew на кавитационные характеристики, можно привести результаты исследования [11], выполненного в обеспечение проектирования ВРШ, предназначенных, в частности, для работы в режиме позиционирования. Соответственно, испытанные модели ВРШ имели небольшой конструктивный шаг 0,7 и дисковое отношение 0,7. Для изучения влияния skew были выполнены гидродинамические и кавитационные испытания двух моделей ВРШ (№ 7017 и 7277) с одинаковым распределением всех геометрических характеристик, кроме skew лопастей, величины которого составляли соответственно 10° и 19°. При этом для модели № 7277 для сохранения скручивающего момента на лопасти было применено балансное распределение skew – 9° вперед на радиусе 0,5 и 10° назад на конце лопасти.

Исследования показали, что при одинаковом шаге ВРШ увеличение skew приводит к существенному снижению коэффициента упора K_t винта, т.е. лопасть разгружается. Для сравнения, равноупорными являются конструктивный шаг 0,7 для винта с малым skew (модель № 7017) и шаг 0,87 для модели № 7277. При равном упоре КПД винта η_0

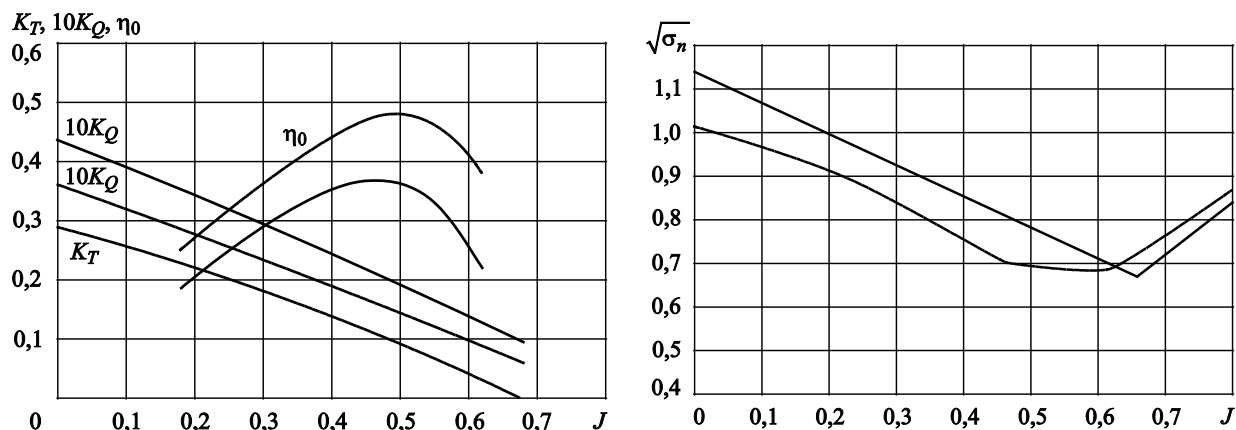


Рис. 16. Сопоставление гидродинамических и кавитационных характеристик винтов № 7017 и 7277 при равноупорном шаге. Шаг винта № 7017 – 0,7 (пунктир); шаг винта № 7277 – 0,87 (сплошная линия) [11]

Fig. 16. Hydrodynamic and cavitation performance of Propellers No. 7017 and 7277 at thrust-identity pitch. Propeller No. 7017: pitch 0.7 (dashed curve); Propeller No. 7277: pitch 0.87 (solid curve) [11]

с более высоким skew существенно ниже (рис. 16). При увеличении установочного шага до величины порядка 1,3 оба винта становятся равноупорными.

При равных установочных шагах левая ветка кавитационной диаграммы $\sqrt{\sigma_n}(J)$ винта со skew 19° сдвигается влево по поступи. Однако корректно сравнивать равноупорные винты, для которых (рис. 16) левая ветка кавитационной диаграммы винта с большим skew расположена даже несколько правее, чем для винта с меньшим skew. Это противоречие с общей тенденцией о разгрузке конца лопасти при увеличении skew, что должно сопровождаться сдвигом левой ветки в сторону больших нагрузок (влево), для данной пары сравниваемых винтов может объясняться их небольшим конструктивным шагом (следовательно, и относительно небольшой абсолютной величиной сброса шага на конце лопасти). Таким образом, при проектировании ВРШ с увеличенным skew для улучшения кавитационных характеристик проектанту необходимо отслеживать баланс между разнона-

правленным изменением кавитационных и пропульсивных характеристик винтов при изменении саблевидности.

Для балансного skew в [11] была выявлена еще одна негативная особенность. При обтекании выдвинутой вперед части лопасти на радиусах 0,5–0,6 (где имеет место skew вперед) на входящей кромке образуется достаточно сильное влияние радиальных скоростей. Из щели, образующейся при skew вперед между входящей кромкой лопасти и ступицей, отмечалось образование потока, направленного от ступицы к большим радиусам, что способствовало появлению кавитации на малых радиусах.

Следует отметить, что указанные результаты частично подтверждаются данными расчета гидродинамических характеристик в работе [9]. С одной стороны, как следует из таблицы, Kt изменяется от skew не монотонно. Однако, с другой, если исключить из рассмотрения результаты для симметричных лопастей (skew = 0), при изменении skew с 31° до 62° Kt изменяется в сторону уменьшения на 4,5–5 %

Таблица. Влияние угла skew на величину коэффициента упора по данным [9]

Table. Skew effect upon thrust coefficient as per [9]

J	Kt	Skew 0°	Skew 31°	Skew 62°	Skew 62° (с сохр. толщины)
0,6	Эксперимент	0,175	0,180	0,172	–
	Расчет	0,1697	0,1819	0,1695	0,1693
0,2	Эксперимент	0,330	0,350	0,300	–
	Расчет	0,3201	0,3462	0,3041	0,3147

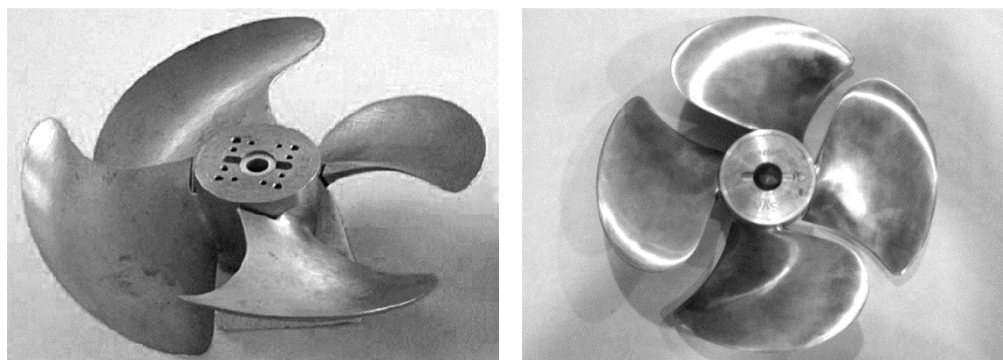


Рис. 17. Вид модели исходного (слева) и модифицированного (справа) винтов, представленных фирмой Andritz для испытаний
Fig. 17. Model of initial (*left*) and modified (*right*) Andritz propellers submitted for tests

на поступи 0,6 и на 16 % на поступи 0,2, что в принципе согласуется с данными [11]. Сопоставление двух левых столбцов таблицы также позволяет оценить влияние на Kt дополнительного утолщения лопастей, необходимого при увеличении skew из условий прочности.

Цитированное исследование [9] показывает, что при проектировании ВРШ с требованием низкого уровня пульсаций и шумоизлучения необходимо учитывать указанные отличия обтекания лопастей с умеренным и большим skew. Так, анализ фото на рис. 5, 6, 8 показывает, что передняя кромка вплоть до средних радиусов выполнена практически по прямой. Можно предположить, что это позволяет избежать образования узкой щели между носиком корневых сечений лопасти и ступицей. Также необходимо специальное проектирование профилей, чтобы избежать кромочной кавитации с одной из сторон на выступающем вперед участке входящей кромки. Очевидно, что для проектирования лопастей с высоким skew требуются специальные методики с привлечением современных методов компьютерной гидродинамики.

В Крыловском центре было проведено также исследование гребных винтов с достаточно большим skew (точное значение не предоставлялось, по оценкам – около 40°), что было связано с началом поставок ВРШ Andritz в Россию. Результаты первых натурных испытаний судна с ВРШ Andritz показали серьезные проблемы с величиной скорости полного хода. Испытания модели с достаточно большим skew, предоставленной фирмой (рис. 17, слева), показали, что КПД винта был существенно (на 7 %) ниже ожидавшегося в проекте.

Фирма представила модернизированный вариант винта с очевидно меньшим skew за счет уменьшения протяженности «уха» (рис. 17, справа). Форма контура стала скорее ближе к каплановской, с обрезанным концом лопасти. Кроме того, уменьшился сброс шага на конце лопасти.

По данным испытаний модели этого винта в Крыловском центре его КПД был на 4 % выше (рис. 18), однако характеристики начала кавитации были совершенно неприемлемы (рис. 19), что вынудило специалистов предупредить об опасности возникновения вибраций на судне. Крыловский



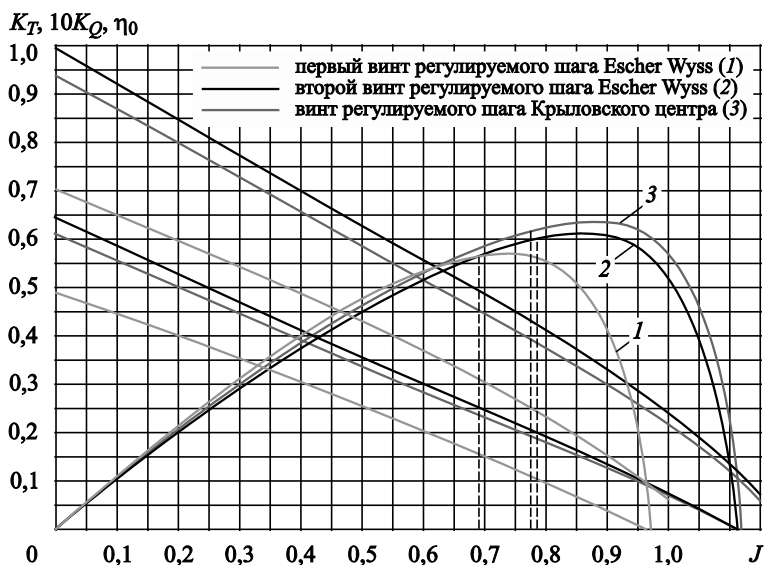
Рис. 18. Контур лопасти альтернативного винта Крыловского центра

Fig. 18. Blade outline of alternative Krylov State Research Centre propeller

Рис. 19. Сопоставление результатов гидродинамических испытаний моделей винта регулируемого шага Andritz и Крыловского центра

Fig. 19. Hydrodynamic test results for controllable-pitch propeller models: Andritz vs Krylov State Research Centre

Режим полной скорости хода
Первый ВРШ Escher Wyss
 $J = 0,6887; K_T = 0,3118; 10K_Q = 0,3118;$
 $\eta_0 = 0,563$
Второй ВРШ Escher Wyss
 $J = 0,7849; K_T = 0,2038; 10K_Q = 0,4224;$
 $\eta_0 = 0,603$
ВРШ ЦНИИ
 $J = 0,7736; K_T = 0,1966; 10K_Q = 0,3932;$
 $\eta_0 = 0,616$



центр спроектировал лопасти альтернативного ВРШ с применением профилировки ИК-80, обеспечивающей достижение хороших кавитационных характеристик, и традиционным контуром с умеренным (29°) skew (рис. 18).

Сопоставление результатов испытаний моделей Andritz (Escher – Wyss) и альтернативного проекта Крыловского центра представлено на рис. 19 и 20. Указанные результаты показали, что винты Крыловского центра обладали на 3 % более высоким КПД по сравнению с исходным винтом. Кавитационная корзина первого винта Andritz шире, чем винта Крыловского центра (хотя существенную роль при определении левой ветки кавитационной диаграммы играет кромочная кавитация, левая ветвь которой значительно сужает корзину по сравнению с кавитацией концевой вихря). Кавитацион-

ные характеристики второго, модифицированного, винта несопоставимо хуже.

Проведенные испытания показали, что применение лопастей с большим skew позволяет реализовать определенные резервы улучшения виброакустических характеристик винтов по сравнению с ВРШ с умеренным skew, который традиционно применяется в Крыловском центре, базируясь на опыте проектирования ВФШ. Однако необходимо весьма осторожно применять лопасти ВРШ с большим skew, поскольку, согласно представленным результатам исследований, это может приводить к негативным эффектам по ходкости. Кроме того, всегда следует проверять экстремальные режимы работы винта по прочности.

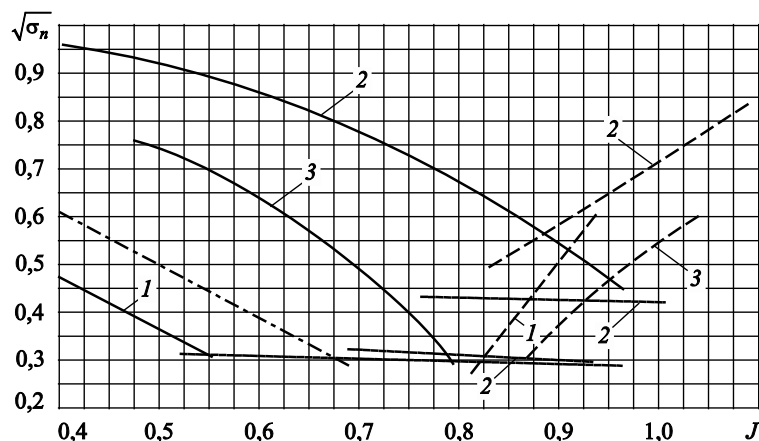
Таким образом, прямое сравнение в ходе модельных испытаний показало, что характеристики

Рис. 20. Кавитационные диаграммы трех моделей винтов регулируемого шага

Fig. 20. Cavitation buckets for the three controllable-pitch propeller models

1 – первый винт регулируемого шага Escher Wyss; 2 – второй винт регулируемого шага Escher Wyss; 3 – винт регулируемого шага Крыловского центра

— концевой вихрь с засасывающей стороны
- - - - - кромочная кавитация на засасывающей стороне
— пузырчатая кавитация
- - - - - кромочная кавитация на нагнетающей стороне



винтов, спроектированных Крыловским центром, представляют удачный компромисс по сравнению с характеристиками винта одной из ведущих мировых компаний.

Итак, в статье представлены данные, полученные в ходе различных исследований, а именно:

- сопоставление кавитационных диаграмм гребных винтов с различным контуром лопастей (рис. 20);
- расчеты из работы [7] (рис. 15), показывающие снижение максимального разрежения на концевых сечениях лопастей с увеличением skew;
- сопоставление кавитационных диаграмм ВРШ с различным skew [11] (рис. 16).

Указанные данные свидетельствуют о том, что увеличение skew позволяет рассчитывать на некоторое (по-видимому, ограниченное) улучшение характеристик начала кавитации.

Этот вывод совпадает с результатами, опубликованными в анализе кавитации различных винтов [12]. В работе сравниваются результаты испытаний двухлопастных винтов с умеренной саблевидностью и без саблевидности с прямой входящей кромкой. Показано, что наличие саблевидности приводит к сдвигу ветви кавитационной диаграммы, соответствующей вихревой кавитации на засасывающей стороне в сторону больших нагрузок (примерно на 0,01–0,02 по Kt). Автор [12] объясняет это особенностями формирования и развития кавитации на саблевидных лопастях [7]. Под концевым вихрем на саблевидных лопастях понимается вихрь, охватывающий конец лопасти.

Кроме того, вследствие обтекания входящей кромки лопасти с саблевидностью аналогично стреловидному крылу на входящей кромке возникает завихренность, приводящая к появлению кромочного вихря, развивающегося вдоль входящей кромки лопасти. Автор [12] обращает внимание на необходимость учета кромочного вихря при проектировании винта. Для отдаления начала кавитации предпочтительно, чтобы кромочный и концевой вихри образовывались одновременно, при этом первый развивался бы не отрываясь от входящей кромки (что достигается выбором ее конфигурации), плавно сливаясь с концевым вихрем. Для предотвращения отрывных каверн вблизи кромки толщина концевых сечений саблевидных лопастей увеличивается (согласно [12] с обычных 3 примерно до 6 %).

Таким образом, приведенные данные позволяют предполагать, что применение саблевидных лопастей при должном проектировании может спо-

собствовать не только снижению виброактивности и шума, но и отдалению кавитации. По крайней мере, этот вопрос в отечественной практике требует дополнительного исследования и накопления опыта, что важно при проектировании ВРШ.

Заключение

Conclusion

1. Одной из важнейших потребностей отечественного судостроения является ускоренное развитие производства ВРШ на отечественных заводах и их применение на кораблях и судах отечественной постройки. В России производство и проектирование ВРШ имеет достаточно большой опыт работы, прежде всего НПО «Винт» и Крыловского центра. Ориентация на экспортные ВРШ в современных условиях некорректна.
2. Приведенный в статье анализ позволяет говорить, что инструментарий и качество проектирования ВРШ с умеренной саблевидностью лопастей в России, по крайней мере, не уступает уровню проектирования ведущих мировых фирм, а в ряде случаев может более комплексно удовлетворить требованиям отечественных заказчиков.
3. Применение ВРШ с большой саблевидностью лопастей, продвигаемое ведущими зарубежными фирмами – производителями ВРШ, по данным анализа, проведенного в настоящей статье, имеет определенные резервы улучшения виброактивности и шумоизлучения по сравнению с лопастями с умеренным skew, принятыми в отечественной практике. Однако проектирование таких лопастей должно производиться по технологиям, учитывающим особенности работы саблевидных лопастей и использующим современные компьютерные технологии. В обеспечение разработки отечественных технологий, которые позволят наиболее полно применять указанные резервы, необходимо проведение гидродинамических и кавитационных исследований, посвященных гидродинамике, кавитации и прочности лопастей ВРШ с большой саблевидностью.

Список использованной литературы

1. Справочник по теории корабля : В 3 т. Т. 1 : Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.

2. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2. Ч. VII. Разд. 6. Двигатели : НД № 2-020101-072 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2013. 719 с.
3. *Cumming R.A., Morgan W.B., Boswell R.J.* Highly skewed propellers // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1972. Vol. 80. P. 98–135.
4. *Boswell R., Cox G.* Design and evaluating of highly skewed propeller for a cargo ship. DTSNSRDC Report 3672. Feb.1974.
5. *Пустошный А.В.* Кавитация гребных винтов транспортных судов. Исследования XXI века: монография. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2022. 260 с.
6. *Zarbock O.* Controllable pitch propellers for future warships and mega yachts // Proceedings of the 1st International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09). Trondheim, Norway. June 2009.
7. Проектирование и испытание серии моделей ВРШ с балансным контуром лопасти : техн. отчет / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 1990. № 32815.
8. *Лобачев М.П., Овчинников Н.А., Русецкий А.А.* Численное определение скручивающих моментов на лопастях винтов регулируемого шага // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 73–84.
9. *Krasilnikov V., Sun J., Halte K.H.* CFD Investigation in scale effect on propeller with different magnitude of skew in turbulent flow // Proceedings of the 1st International Symposium of Marine Propulsors (SMP'09). Trondheim, Norway. June 2009.
10. *Beretta D., Savio L., Viviani M.* Experimental Characterization of Two CP propellers at Different Pitch Setting, Considering Cavitation Behaviour and Related Noise Phenomena // Proceedings of the 2nd International Symposium on Marine Propulsors (SMP'11). Hamburg, Germany. June 2011.
11. *Пустошный А.В.* Проектирование двигателей для многорежимных судов с учетом особенностей их работы на различных эксплуатационных режимах : дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Пустошный ; ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2001. 158 с.
12. *Kuiper G.* New developments around sheet and tip vortex cavitation on ships' propellers // Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation (CAV2001). Pasadena, California, USA. March 2001. Lecture 007. 20 p.
- [*Ya. Voitkunsky et al.*]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (*in Russian*).
2. Rules of classification and construction of sea vessels. Vol. 2, part VII, section 6. Propellers : ND No. 2-020101-072 / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2013. 719 p. (*in Russian*).
3. *Cumming R.A., Morgan W.B., Boswell R.J.* Highly skewed propellers // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1972. Vol. 80. P. 98–135.
4. *Boswell R., Cox G.* Design and evaluating of highly skewed propeller for a cargo ship / Department of the navy, Naval ship research and development center. Maryland, 1974. 53 p. (NSRDC Report ; № 3672).
5. *Pustoshny A.V.* Propeller cavitation of cargo carriers. Research of the XXI century. Monograph. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2022. 260 p. (*in Russian*).
6. *Zarbock O.* Controllable pitch propellers for future warships and mega yachts // Proceedings of the 1st International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09). Trondheim, 2009. P. 91–96.
7. Design and testing of CPP model series with balance blade outline / Krylov Central Research Institute Report No. 32815. St. Petersburg, 1990 (*in Russian*).
8. *Lobachev M.P., Ovchinnikov N.A., Rusetsky A.A.* Numerical determination of torsion moments on controlled-pitch propeller (CPP) blades // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2012. Vol. 69(353). P. 73–84 (*in Russian*).
9. *Krasilnikov V., Sun J., Halte K.H.* CFD Investigation in scale effect on propeller with different magnitude of skew in turbulent flow // Proceedings of the 1st International Symposium of Marine Propulsors (SMP'09). Trondheim, 2009. P. 25–40.
10. *Beretta D., Savio L., Viviani M.* Experimental Characterization of Two CP propellers at Different Pitch Setting, Considering Cavitating Behaviour and Related Noise Phenomena // Proceedings of the 2nd International Symposium on Marine Propulsors (SMP'11). Hamburg, 2011. P. 328–335.
11. *Pustoshny A.V.* Design of propulsors for multi-mode vessels taking into account the specific of their operation in different conditions : Dr. Sci. theses : 05.08.01 / A.V. Pustoshny ; Krylov Central Research Institute. St. Petersburg, 2001, 158 p. (*in Russian*).
12. *Kuiper G.* New developments around sheet and tip vortex cavitation on ships' propellers // Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation (CAV2001). Pasadena, California, USA. March 2001. P. CAV2001:Lecture.007. 20 p.

References

1. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydromechanics. Ship resistance. Ship propulsors /

Сведения об авторах

Пустошный Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник-консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: a.pustoshny@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Борусевич Валерий Олегович, к.т.н., заместитель начальника отделения гидродинамики по направлению ходкости, ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-41. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Бушуев Алексей Витальевич, заместитель главного инженера, головной филиал «НПО «Винт» ОАО «ЦС «Звездочка». Адрес: 121099, Россия, Москва, Новинский б-р, д. 11. Тел.: +7 (499) 255-49-01. E-mail: A.bushuev@vintpo.ru.

Габерцеттель Федор Иванович, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-62. E-mail: fgaberz@yandex.ru.

About the authors

Alexander V. Pustoshny, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Principal research scientist – consultant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: a.pustoshny@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Valery O. Borusevich, Cand. Sci. (Eng.), Deputy head of hydrodynamic division of propulsion branch, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-41. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Alexey V. Bushuev, Deputy chief engineer, Head office NPO Vint, JSC Ship Repair Centre Zvezdochka. Address: 11, Novinsky av., Moscow, Russia, post code 121099. Tel.: +7 (499) 255-49-01. E-mail: A.bushuev@vintpo.ru.

Fedor I. Gabertsettel, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-62. E-mail: fgaberz@yandex.ru.

Поступила / Received: 01.02.23
Принята в печать / Accepted: 06.06.23
© Коллектив авторов, 2023

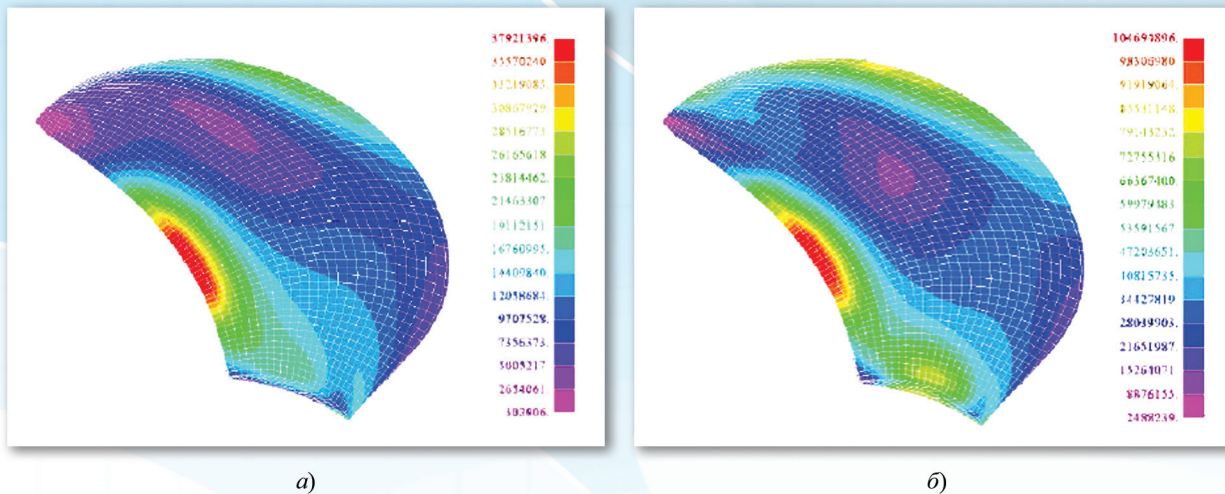


Рис. 2. Картины напряжений в лопастях гребных винтов фиксированного шага: а) на переднем ходу; б) на реверсе
Fig. 2. Fixed-pitch propeller blade stresses: a) ahead running; b) reversal

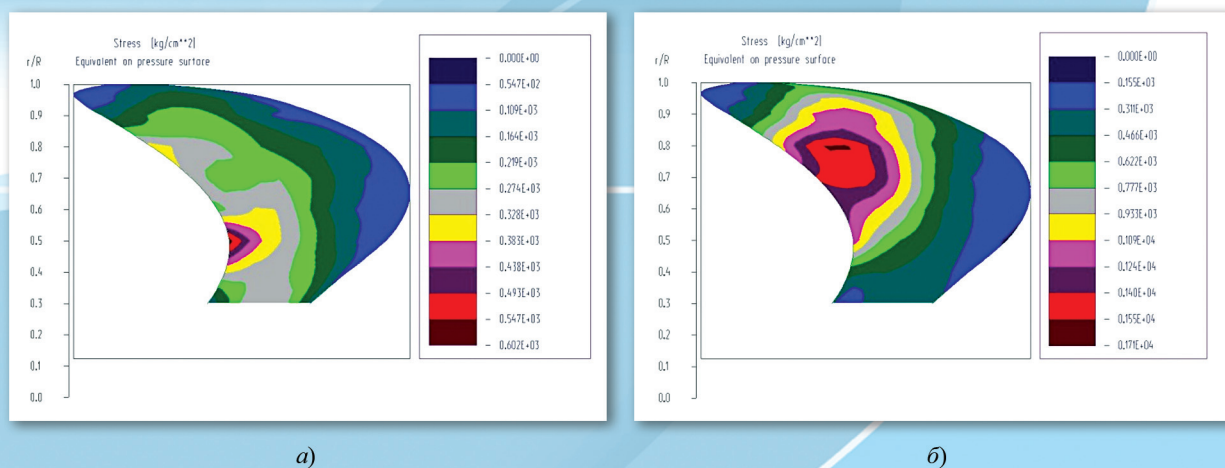
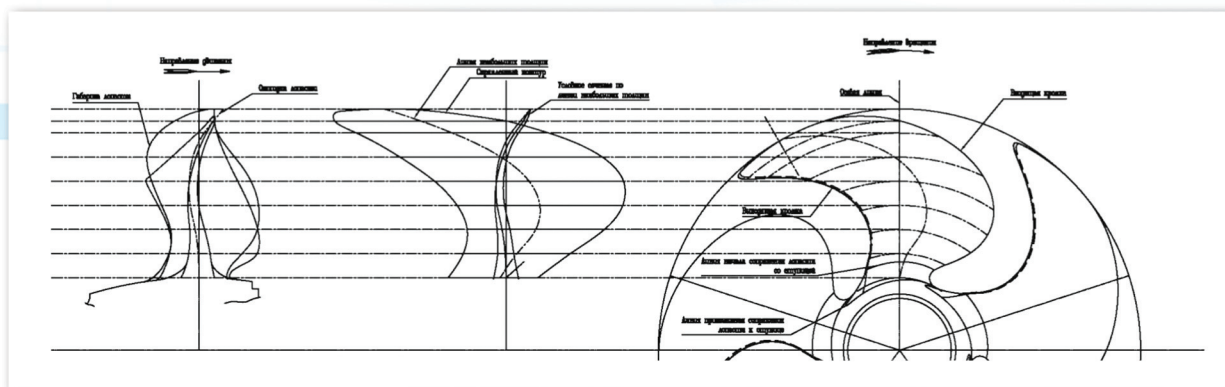


Рис. 3. Сопоставление напряжений на переднем ходу и при реверсе для лопасти со skew 40°:
а) на переднем ходу; б) на реверсе
Fig. 3. Stresses in the blade with skew angle 40°: a) ahead running; b) reversal

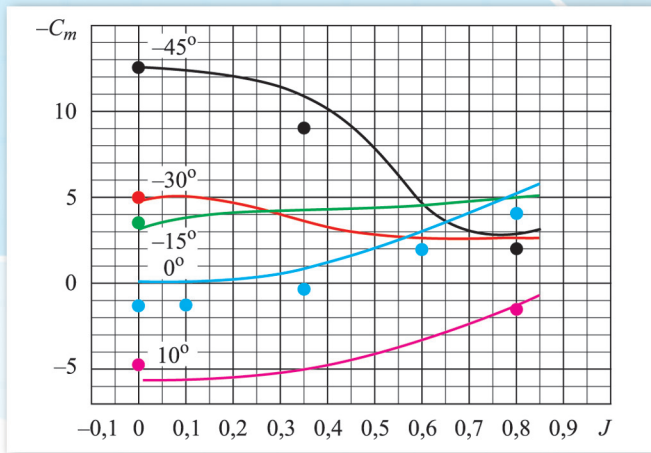


Рис. 10. Зависимость коэффициента скручивающего момента на лопасти винта регулируемого шага от поступи ГВ при различных углах поворота лопасти

Fig. 10. Blade torsion coefficient vs advance of controllable-pitch propeller at different blade angles

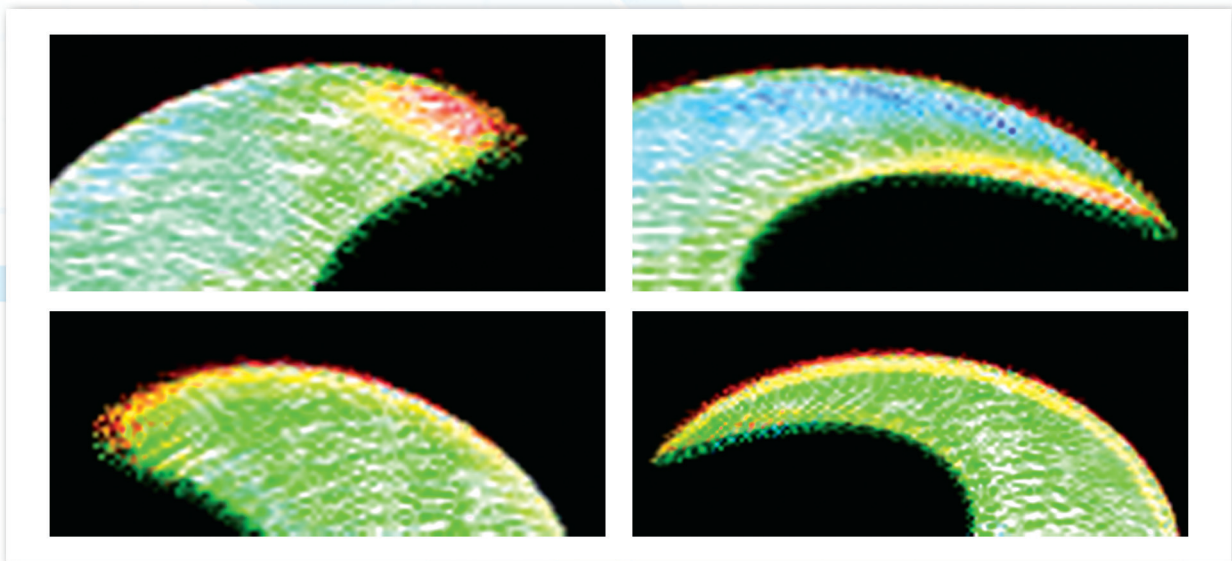


Рис. 13. Направление развития потока при поступи $J = 0,2$ вблизи конца лопасти для винтов со skew 31° (слева) и 62° (справа). Вверху – засасывающая сторона, снизу – нагнетающая. Данные расчета [9]

Fig. 13. Direction of flow evolution at advance $J = 0.2$ near blade tip for skew angles 31° (left) and 62° (right). Top – suction side, bottom – pressure side. Calculation results as per [9]

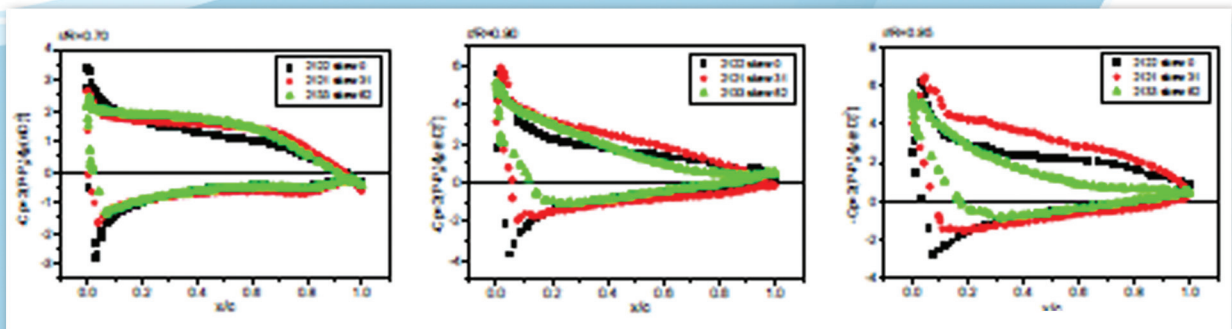


Рис. 15. Распределение давлений на лопастях гребных винтов с различным skew. Слева направо – относительные радиусы 0,7; 0,9 и 0,95. Данные [9]

Fig. 15. Pressure distribution on propeller blades with different skew angles. Left to right: relative radii 0.7; 0.9 and 0.95 (as per [9])