DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-13-24
УДК 532.528+629.5.035

А.В. Пустошный, А.Е. Таранов, С.П. Шевцов, А.А. Рудниченко
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ГРЕБНОГО ВИНТА НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

Объект и цель научной работы. Целью является гибридное (расчетно-экспериментальное) исследование поля скоростей вблизи винта, работающего на швартовном режиме. Рассматриваются физические особенности формирования потока и развитие кавитации на режиме нулевой поступи винта. В качестве объектов исследования выбраны типовые гребные винты ледоколов.

Материалы и методы. Экспериментальная часть работы выполнена в глубоководном и кавитационном бассейнах Крыловского государственного научного центра. Для расчетного определения гидродинамических характеристик используются методы вычислительной гидродинамики, базирующиеся на решении методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых двухпараметрической полуэмпирической моделью турбулентности.

Основные результаты. Приводятся экспериментальные данные, характеризующие особенности формирования потока вблизи винта, работающего на швартовном режиме. Приведены экспериментально зарегистрированные картины кавитации, соответствующие режимам частичной и развитой кавитации на швартовах. Единственной формой кавитации, зафиксированной на этих режимах, является концевой вихрь. Его развитие при снижении числа кавитации приводит к падению упора, т.е. к наступлению второй стадии кавитации. Экспериментально-расчетным способом показано, что в отличие от работы винта на ходовых режимах, где винт в основном увеличивает скорости потока в струе, натекающей спереди, на швартовном режиме упор винта в значительной степени формируется за счет ускорения жидкости, которая засасывается сбоку от винта, что существенно меняет направление течения вблизи концевых сечений винта. Расчет обтекания винта позволил получить картины формирования потока и кавитации на винте, близкие к экспериментальным данным.

Заключение. Совместное использование расчетных и экспериментальных методов исследования позволило детально проанализировать связь между формой кавитации и наступлением второй стадии кавитации. Результаты расчетов продемонстрировали высокую точность численного определения характеристик второй стадии кавитации и картин кавитации. Показано, что применение суперкомпьютерных расчетов позволяет значительно, по сравнению с экспериментом, расширить возможности исследования физических особенностей кавитационных течений на таком сложном непроектном режиме работы гребного винта, как швартовный.

Ключевые слова: кавитация, швартовный режим, экспериментальные исследования, численное моделирование.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-13-24
UDC 532.528+629.5.035

A. Pustoshny, A. Taranov, S. Shevtsov, A. Rudnichenko
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

PHYSICAL ASPECTS OF PROPELLER OPERATION AT BOLLARD PULL

Для цитирования: Пустошный А.В., Таранов А.Е., Шевцов С.П., Рудниченко А.А. Физические аспекты работы гребного винта на швартовном режиме. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 13–24.

For citations: Pustoshny A., Taranov A., Shevtsov S., Rudnichenko A. Physical aspects of propeller operation at bollard pull. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 13–24 (in Russian).

Object and purpose of research. This study is a hybrid, i.e. both analytical and experimental, wake survey of the propeller operating in bollard-pull conditions. It discusses physical peculiarities of flow generation and cavitation development at zero advance ratio. The study is performed on icebreaker propellers.
Materials and methods. The experiments were performed in KSRC Deepwater basin and Cavitation test tank. Hydrodynamic parameters are calculated as per CFD methods based on from the solution (as per finite-volume method) of unsteady Reynolds equations closed by a bi-parametric semi-empirical turbulence model.
Main results. This study describes the peculiarities of flow generation near the propeller operating in bollard-pull conditions and gives experimentally recorded cavitation patterns corresponding to partial and thrust-breakdown cavitation at bollard pull. The only form of cavitation observed in these condition is tip vortex that develops as cavitation number reduces, thus resulting in thrust breakdown. Experiments and calculations have shown that, in contrast to running conditions, where the propeller mostly accelerates its inflow, bollard-pull thrust largely depends by the acceleration of fluid attracted from the sides, which considerably changes flow direction near blade tip sections. Calculated generation patterns for flow and propeller cavitation were close to the experimental ones.
Conclusion. Joint application of analytical and experimental research methods made it possible to thoroughly analyse the link between cavitation form and thrust-breakdown cavitation inception. Calculation results confirmed the high accuracy of obtained numerical parameters for thrust-breakdown cavitation, as well as for cavitation patterns. The study shows that supercomputer-based calculations significantly widen research capabilities (as compared to purely experimental investigations) in the studies dealing with physical peculiarities of cavitating flows in highly complex off-design propeller operation conditions, like bollard pull.
Keywords: cavitation, bollard pull, experimental studies, numerical simulation.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение
Introduction

В последние годы нулевая и близкая к нулю скорость становится одним из основных эксплуатационных режимов для все большего количества судов. К таким судам относятся суда снабжения, суда для буровых работ и добычи полезных ископаемых, различного рода поисковые и спасательные суда, ледоколы и ледовые транспортные суда.

Несмотря на это, существует лишь очень ограниченный круг работ, посвященных изучению работы движителей на швартовах. Прежде всего, интерес к ним проявлялся в России, и связан он был с изучением развитой кавитации на швартовах применительно к важной практической задаче обеспечения необходимого упора винта на швартовах без потерь на кавитацию для ледоколов. Вопрос проектирования винта ледоколов специально рассмотрен в наиболее ранней «классической» книге по гребным винтам А.М. Басина и И.Я. Миниовича [1]. Теория работы гребных винтов на различных режимах в ходе реверса (включая швартовный режим) развита в книгах А.А. Русецкого (например, [2]). Физические аспекты работы винта на швартовном режиме и начальные стадии кавитации рассмотрены в экспериментальных работах А.В. Пустошного [3] применительно к судам, работающим на режиме позиционирования.

В 2014–2017 гг. при разработке ледоколов в кавитационном бассейне Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) были получены новые данные о развитии кавитации на лопастях вплоть до режимов, соответствующих падению упора винтов при работе на швартовном режиме (второй стадии кавитации), что особенно важно для ледовых гребных винтов. В частности, в работе [4] применительно к винтам ледокола представлены данные о поведении упора и момента при развитой кавитации на швартовах и предложена методика определения запасов на вторую стадию кавитации для ледоколов.

Работа движителей судов на швартовном режиме имеет ряд особенностей, осложняющих исследования. Используемые до настоящего времени модели вихревой теории для расчетов гребных винтов обычно строятся в предположении о легкой или средней гидродинамической нагрузке гребных винтов, что существенно облегчает построение вихревой пелены. На швартовном режиме записанный в традиционном виде коэффициент гидродинамической нагрузки гребного винта по упору

$$C_T = T/[(\pi D2/4)(\rho V^2/2], \quad (1)$$

где T – упор винта; D – его диаметр; V – скорость натекающего потока; ρ – плотность жидкости), равен бесконечности. Формально бесконечная нагрузка должна подразумевать работу винтов с очень большими углами атаки профилей лопастей на всех радиусах с появлением на них отрывных явлений и сильной кромочной кавитации. Однако ничего подобного на швартовном режиме не наблюдается.

Сложности экспериментального исследования кавитации на швартовах в кавитационной трубе

заключаются в том, что швартовный режим сохраняется в трубе только короткое время, а потом вызванные скорости от гребного винта начинают развивать течение в самой трубе и режим уже не может быть назван чисто швартовным. Поэтому публикации по экспериментальному изучению обтекания и кавитации винтов на швартовах также крайне ограничены и относятся в основном к исследованиям в вакуумных бассейнах и в больших кавитационных трубах (с диаметром рабочего участка 1,5–2 м), где модель винта диаметром 200 мм достаточно долго не может разогнать поток во всей трубе, и, таким образом, швартовный режим сохраняется в течение нескольких десятков секунд, необходимых для проведения замеров.

В настоящее время в ходе развития методов компьютерной гидродинамики вязкой жидкости (согласно международной терминологии – CFD, Computational Fluid Dynamics) проводятся многочисленные расчеты гидродинамических диаграмм гребных винтов RANS-методами (Reynolds Averaged Navier – Stokes), и в этом случае, в отличие от расчетов по методам вихревой теории, швартовный режим ничем не выделяется среди других расчетных режимов. Поэтому в современных публикациях, как правило, специально изучение швартовного режима не выделяется.

Тем не менее в связи с решением ряда прикладных задач, связанных, например, с гребными винтами ледоколов, развивающиеся в последнее время методы вычислительной гидродинамики позволяют на новом уровне изучить работу гребного винта на швартовном режиме [5, 6]. Однако даже они, в целом правильно отражая происходящие процессы, пока не дают полного представления об обтекании винта при работе на швартовном режиме, особенно при возникновении кавитации.

В настоящей работе на основании как экспериментальных, так и расчетных методов, проанализированы физические особенности формирования потока вблизи винта на швартовном режиме, включая возникновение и развитие кавитационных процессов.

Экспериментальное исследование поля скоростей вблизи гребного винта, работающего на швартовном режиме

Wake survey near the propeller
in bollard-pull conditions

Экспериментальные исследования поля скоростей вблизи работающего гребного винта проводились

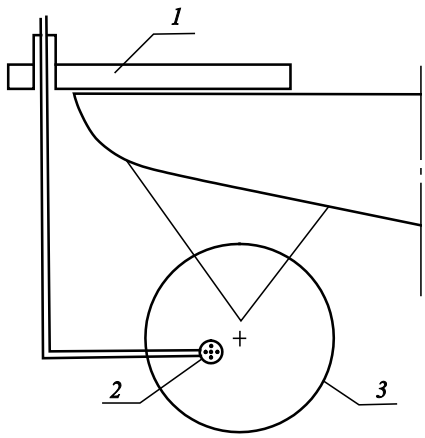


Рис. 1. Схема эксперимента: *1* – координатное устройство; *2* – шаровый пятиточечный зонд; *3* – диск винта двухвальной модели

Fig. 1. Test setup: *1* – coordinate device; *2* – five-point ball probe; *3* – propeller disk of twin-shafted model

на двухвальной самоходной модели с установкой на ней гребного винта с шаговым отношением около 0,7. Предварительная визуализация потока вблизи винта на швартовном режиме с помощью вводимого в поток стержня с ниточками показала, что при приближении к винту, особенно на внешних радиусах, имеет место сильное влияние на формирование потока радиальных скоростей. «Сбоку» от винта на концевом радиусе ниточки вставали практически перпендикулярно к оси винта, за винтом на относительном радиусе выше 1 имело место даже возвратное течение, линии тока которого устремлялись в струю за винтом, разворачиваясь почти на 180° в кормовой половине осевой протяженности винта. Вблизи корпуса (в верхней части диска винта) влияние радиальных скоростей на картину течения было существенно слабее.

Такие резкие изменения направления потоков заставили применить для измерений поля скоростей в диске гребного винта сферический пятиточечный зонд типа Пито (схема эксперимента представлена на рис. 1), характеристики которого допускали измерения до скосов потока порядка 30–35°. Конструкция зонда для измерений скоростей потока в непосредственной близости от лопастей позволяла, во-первых, подводить зонд с борта модели непосредственно в зону перед лопастями винта и за ними, а во-вторых, при обнаружении больших углов скоса натекающего потока в вертикальной плоскости (из-за наличия сильных радиальных составляющих) поворачивать зонд на определенный угол в вертикальной плоскости навстречу потоку,

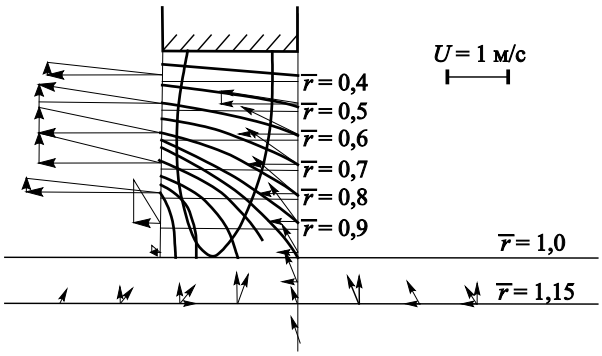


Рис. 2. Векторная диаграмма по результатам измерений перед (справа) и за винтом на швартовном режиме

Fig. 2. Vector diagram of measurement results in front (*right*) and behind the propeller at bollard pull

чтобы избежать существенных погрешностей измерений, характерных для пятиточечных зондов при углах скоса потока к оси зонда более 35°. Было установлено, что в положении зонда по вертикали от центра винта вниз «6 часов» условия работы лопасти соответствовали режиму «в открытой воде», аналогичному испытаниям в открытой воде в кавитационном бассейне.

Векторная картина скоростей потока вблизи винта, работающего на швартовном режиме в условиях открытой воды (нижнее положение зонда), представлена на рис. 2, где нанесены линии тока, построенные с использованием векторов скорости и результатов анализа расхода жидкости. Представленные данные позволяют описать картину течения в межлопастном пространстве при работе на швартовном режиме следующим образом.

Уже на значительном расстоянии перед гребным винтом начинают проявляться вызванные винтом аксиальные и радиальные скорости. В непосредственной близости от винта углы скоса, обусловленные осевой и радиальной составляющей скоростей, изменяются практически от 0 вблизи ступицы до 40° на радиусах 0,7–0,8. На концевых радиусах перед винтом и вблизи входящих кромок происходит разворот потока до 90°, т.е. концевые сечения работают в зоне, где аксиальные компоненты вызванных скоростей близки к 0. Проведенные оценки на основании закона сохранения импульса показали, что примерно 30 % упора на швартовном режиме обусловлено ускорением жидкости, поступающей «сбоку» от диска винта.

В этом принципиальное различие работы винтов на швартовном и ходовом режимах. Проведенные аналогичные исследования потока вблизи винта на ходовых режимах (при значениях поступи 0,18 и 0,36) позволили получить картины линий тока (рис. 3), которые показывают, что на ходовых режимах линии тока вблизи концевых течений идут близко к цилиндрическим сечениям лопастей. Вариация в ходе экспериментов частоты вращения гребных винтов показала, что соотношения радиальных и осевых скоростей сохраняются независимо от частоты вращения винта.

По полученным значениям скорости были оценены углы натекания потока на носик профилей цилиндрических сечений как разность угла скоса потока, натекающего на носик профиля, и шагового угла профиля на данном радиусе винта (см. таблицу). При расчете углов скоса скорости, вызванные гребным винтом, не выделялись, поэтому приведенные величины названы не углом атаки, а углом скоса в носике профиля. Здесь следует отметить, что в основном различия угла скоса обусловлены изменением аксиальных скоростей, т.к. тангенциальные скорости перед винтом крайне незначительны и составляют 2–3 % от аксиальных. Как видно из приведенных данных, если для поступи 0,36 угол скоса в носике потока составляет порядка 3°, то на

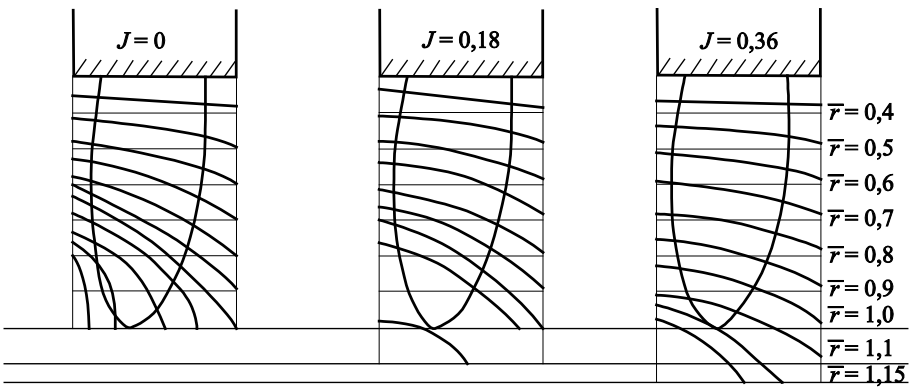


Рис. 3. Линии тока осредненного потока вблизи гребного винта при различных значениях поступи (поток справа налево)

Fig. 3. Averaged flow lines near the propeller at different advance ratios (flow direction from right to left)

Сопоставление углов скоса в носике профилей сечений лопастей (по измерениям вблизи входящей кромки) на швартовном режиме и при поступях 0,18 и 0,36

Flow obliquities at blade tips (as per the measurements near the leading edge) at bollard pull and at J = 0.18 and 0.36

Относительный радиус	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Свободная вода, угол скоса град.	7	7	6,4	5	8,8
Поступь J = 0,18, угол скоса, град.	6,2	4,2	4,7	4,8	4,6
Поступь J = 0,36, угол скоса, град.	5,6	3,6	3,0	3,2	3,2

швартовном режиме его величина на некоторых радиусах доходит до 7–8° (рис. 4).

Следует отметить, что проведенные испытания позволили получить картину осредненного потока вблизи лопастей гребного винта, формирующуюся в основном под влиянием сил инерционной природы. Картина обтекания пристеночных слоев жидкости, формирующаяся в непосредственной близости от лопастей под воздействием сил вязкости и центробежных сил на лопасти, совершенно другая. Пристеночные линии тока, полученные в результате испытаний методом красок, представлены на рис. 5. Видно, что на засасывающей стороне линии тока направлены наружу по сравнению с линиями цилиндрических сечений под углом примерно 23–27°, на нагнетающей поверхности имеется ярко выраженная зона перехода. Напомним, что на вращающихся дисках ламинарные течения имеют направление 33° к касательной, турбулентные течения – 11° (согласно [7]). Таким образом, показано очень сильное влияние ламинарных участков на обеих сторонах лопасти (испытания проходили в бассейне при относительно небольших оборотах (менее 15 об/мин) во избежание полного размывания краски).

Столь существенное несоответствие направлений пристеночного и осредненного потоков является, как правило, причиной образования мощных вихревых структур. В эксперименте эти структуры можно наблюдать в кавитационной трубе.

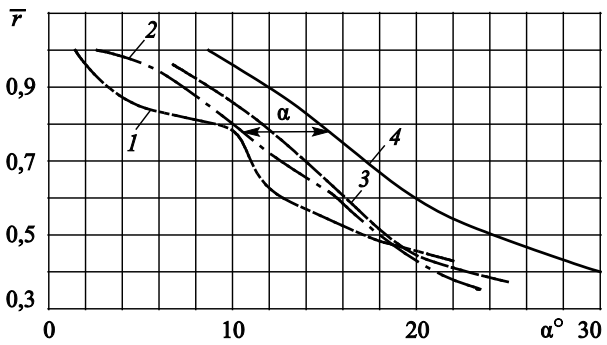


Рис. 4. Определение углов скоса в носике профилей лопасти на различных режимах по данным эксперимента: *1* – швартовный режим; *2* – J = 0,17; *3* – J = 0,36; *4* – распределение шагового угла

Fig. 4. Flow obliquities at blade tip in different conditions (experimental data): *1* – bollard pull; *2* – J = 0.17; *3* – J = 0.36; *4* – pitch angle distribution

Кавитационные испытания гребных винтов на швартовах

Bollard-pull cavitation tests of propellers

Многочисленные испытания различных гребных винтов в кавитационной трубе показали, что вблизи швартовного режима, несмотря на существенно большие углы атаки лопастей, возникает только один вид кавитации – концевой вихрь (по крайней

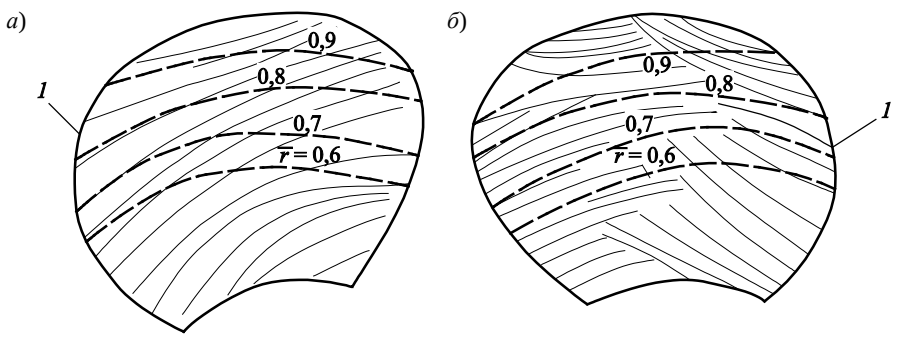


Рис. 5. Пристеночные линии тока, полученные методом красок на швартовном режиме: *а*) засасывающая сторона; *б*) нагнетающая сторона; *1* – входящая кромка

Fig. 5. Boundary flow lines obtained as per the paint-flow method at bollard pull: *a*) suction side; *b*) pressure side; *1* – leading edge

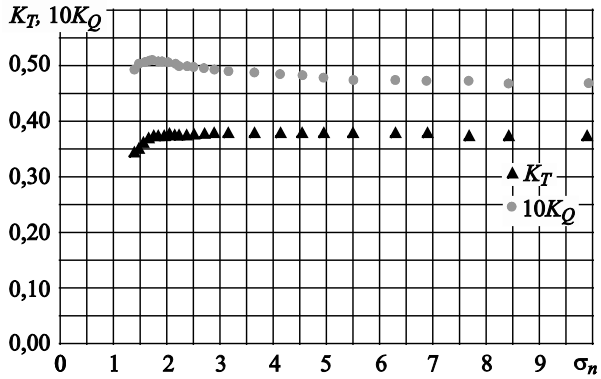


Рис. 6. Коэффициент упора (K_T) и момента (K_Q) на швартовном режиме для различных чисел кавитации. Передний ход

Fig. 6. Bollard-pull thrust (K_T) and torque (K_Q) coefficients for various cavitation numbers. Ahead running

мере, он заметен до фазы второй стадии кавитации, когда наблюдения в эксперименте значительно затруднены из-за присутствия в потоке многочисленных «осколков» каверн, образующихся в потоке при разрушении вихревой кавитации). Очевидно, это связано с отмеченной выше особенностью формирования потока вблизи концевых сечений. Также известна важная особенность развития концевого вихря: при умеренной нагрузке винта (поступи, близкой к расчетной) концевой вихрь образуется вблизи конца лопасти. С увеличением нагрузки точка его образования перемещается вдоль входящей кромки в сторону меньших радиусов. Как можно предполагать, при перемещении точки возникновения концевого вихря вдоль входящей кромки от концевых радиусов к радиусам 0,7–0,8 вихрь предотвращает развитие кромочной кавитации даже при достаточно больших углах атаки (при этом кавитация вблизи кромок должна возникать, но каверна не распространяется вдоль хорды лопасти в виде пленки, а засасывается концевым вихрем, проходящим вдоль входящей кромки).

Развитие кавитации на швартовном режиме было исследовано в кавитационном бассейне КГНЦ, где такой режим может устанавливаться на длительное время без влияния вызванных винтом скоростей, как это имело бы место при изучении работы винта на швартовном режиме в кавитационной трубе, но одновременно возможно создание вакуума для изучения кавитационных явлений. Основной целью эксперимента, важного для ледовых винтов, было определение момента наступления второй стадии кавитации (влияния кавитации на упор) и вида кавитации, соответствующего этому моменту.

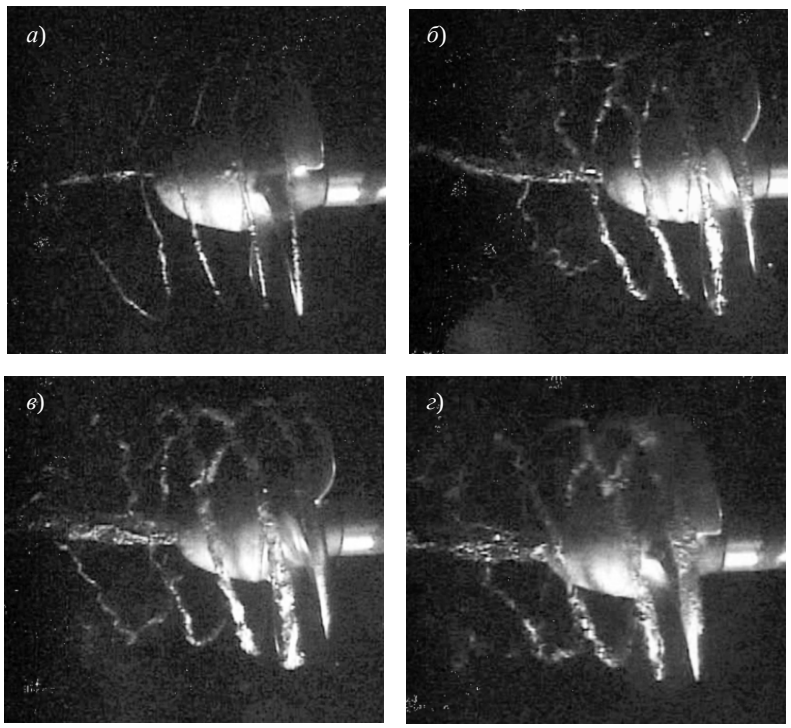


Рис. 7. Картина кавитации на швартовном режиме ледового гребного винта (передний ход). Число кавитации:
а) σ_n = 5,5; *б*) σ_n = 3,6; *в*) σ_n = 2,1; *г*) σ_n = 1,8

Fig. 7. Bollard-pull cavitation patterns for an icebreaker propeller (ahead running), cavitation numbers:
a) σ_n = 5.5; *b*) σ_n = 3.6; *c*) σ_n = 2.1; *d*) σ_n = 1.8

Картины кавитации регистрировались с использованием скоростной видеосъемки и компьютерной записи результатов в кавитационном бассейне при различных значениях числа кавитации:

$$\sigma_n = 2(p - p_v)/(\rho n^2 D^2), \quad (2)$$

где p и p_v – давление в потоке и давление насыщенных паров воды соответственно; ρ – плотность воды; n и D – обороты и диаметр винта.

Испытывались ледовые винты на макете кормовой оконечности. На рис. 6, 8 представлены результаты фиксации коэффициента упора и момента на переднем и заднем ходу с выраженными точками, характеризующими начало падения упора на швартовах под действием кавитации. Рис. 6 соответствует работе винта за макетом (передний ход), рис. 8 – работе винта на задний ход (обтекание соответствует испытанию в свободной воде – обтекателем вперед). Учитывалось, что по требованиям для ледовых винтов всегда проверяется кавитация на швартовах как на переднем, так и на заднем ходу, поэтому данные результаты равнозначны для практики.

Картины кавитации, соответствующие различным режимам на указанном графике, представлены на взятых из видеосъемки сериях фото при различных числах кавитации. Рис. 7 соответствует режимам, представленным на рис. 6, рис. 9 – представленным на рис 8. Указанные в подрисуночных подписях значения чисел кавитации позволяют видеть соответствие картин кавитации и поведения кривой K_T на данном режиме.

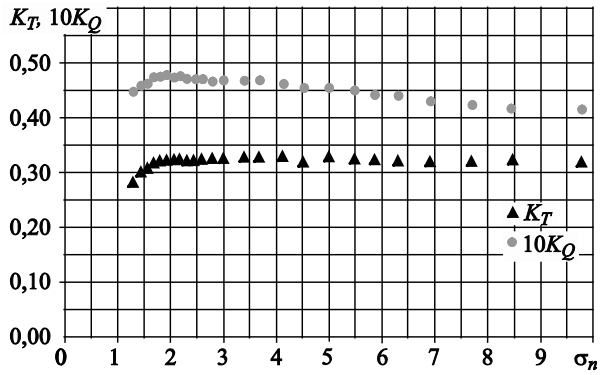


Рис. 8. Коэффициент упора (K_T) и момента (K_Q) на швартовном режиме для различных чисел кавитации. Задний ход

Fig. 8. Bollard-pull thrust (K_T) and torque (K_Q) coefficients for various cavitation numbers. Astern running

Как видно из фотографий, с уменьшением числа кавитации на винте появляется сначала достаточно тонкий концевой вихрь. При дальнейшем

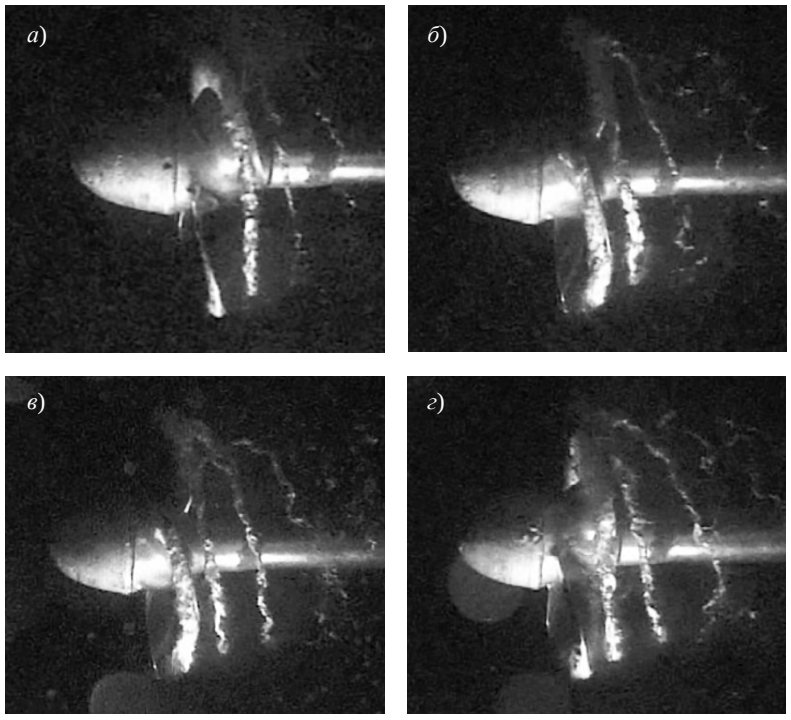


Рис. 9. Картина кавитации на швартовном режиме ледового гребного винта (задний ход). Число кавитации:
а) σ_n = 5,6; *б*) σ_n = 3,7; *в*) σ_n = 2,15; *г*) σ_n = 2,0

Fig. 9. Bollard-pull cavitation patterns for an icebreaker propeller (astern running), cavitation numbers:
a) σ_n = 5.6; *b*) σ_n = 3.7; *c*) σ_n = 2.15; *d*) σ_n = 2.0

уменьшении числа кавитации толщина кавитирующего вихря растет, точка его образования постепенно сдвигается в сторону меньших радиусов вдоль входящей кромки.

На определенном этапе вихрь становится настолько толстым, что его обтекание начинает сказываться на гидродинамических характеристиках лопастей, что сначала приводит к некоторому росту коэффициента момента (считается, что увеличивается кривизна системы профиль + вихрь). Затем наступает момент второй стадии кавитации с падением и упора, и момента – вихрь становится настолько толстым, что не может отойти от поверхности лопасти вблизи кромки, он начинает взаимодействовать с поверхностью лопасти при движении вдоль входящей кромки, частично разрушается, его границы становятся размытыми, он теряет ранее четкую форму кавитационного шнура. При этом на рис. 9 в позиции *4*, соответствующей значительному падению коэффициента упора, можно заметить ряд вспышек кавитации в межлопастном пространстве (очевидно, это фрагменты, отделившиеся от вихря). Таким образом, поставленные эксперименты позволили определить картину кавитации, соответствующей началу второй стадии кавитации гребного винта (началу падения упора из-за кавитации).

Расчетное определение кавитации на гребном винте на швартовном режиме

Calculation of bollard-pull propeller cavitation

Для прогнозирования характеристик моделей гребных винтов методами вычислительной гидродинамики в суперкомпьютерном центре математического моделирования КГНЦ применяется коммерческий пакет Star-CCM+, разработанный фирмой CD-Adapco (концерн Siemens). Характеристики течения вязкой жидкости вокруг моделей гребных винтов находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых моделью турбулентности. Также этот пакет содержит метод моделирования отсоединенных вихрей (DES, Detached Eddy Simulation), использование которого в некоторых случаях является необходимым условием для корректного моделирования кавитационных течений. Пакет располагает собственным сеткопостроителем, позволяющим строить полиэдральные или гексаэдральные сетки с призматическими слоями вблизи границ.

В изложенных далее численных исследованиях для замыкания уравнений Рейнольдса в качестве модели турбулентности использована *k*-ω SST-модель Ментера [8] в низкорейнольдсовой постановке для режимов бескавитационного либо слабо выраженного кавитационного обтекания [9] и вихреразрешающий подход DES, базирующийся на *k*-ω SST-модели турбулентности [10], для режимов обтекания с развитой кавитацией. При необходимости модели турбулентности дополняются моделью ламинарно-турбулентного перехода [11].

Моделирование двухфазного течения «водяной пар/вода» осуществляется с использованием метода Volume of Fluid (VOF) [12], а для учета эффектов конденсации и парообразования при переносе паровой каверны по пространству в уравнение для концентрации пара добавляется источниковый член согласно модели Рэлея – Плессета в варианте, предложенном в [13]. Учитываются силы поверхностного натяжения. Задачи кавитационного обтекания моделей гребных винтов решаются в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени. Обе фазы имеют постоянную плотность: для воды – 1000 кг/м^3, для пара – 0,595 кг/м^3. Динамическая вязкость воды – 0,001141 Pa·s, пара – $1{,}267 \cdot 10^{-5}$ Pa·s. Давление насыщенных паров постоянно и составляет около 2 кПа.

В процессе исследований были использованы модели гребных винтов № 8441, № 8152 и № 8153, имеющие одинаковые распределения геометрических характеристик, но разные диаметры.

Работа гребного винта в условиях «свободной воды»

Open-water propeller operation

При выполнении численного моделирования обтекания модели гребного винта при его работе на швартовных режимах в условиях «свободной воды» использовалась геометрические модели гребного винта с диаметром 0,22 м и экспериментальной установки, применявшейся при проведении модельных испытаний в кавитационном бассейне, заглубление оси гребного винта и давление на свободной поверхности при этом соответствовали условиям эксперимента. Размерность расчетной сетки составляет около 18,5 млн ячеек.

На рис. 10 представлены безразмерные коэффициенты упора и момента на модели гребного

винта при его работе на швартовных режимах в условиях «свободной воды», полученные расчетным методом. Также приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных в кавитационном бассейне КГНЦ. Расхождение в результатах определения интегральных характеристик не превышает 3 % для коэффициента упора и 4 % для коэффициента момента, что является вполне приемлемой для практики точностью.

На рис. 11 (см. вклейку) представлены линии тока в расчетной области при работе модели гребного винта на швартовном режиме. Цветом показана амплитуда скорости жидкости. Хорошо видно собирание покоящейся жидкости гребным винтом и формирование струи.

На рис. 12, 13 (см. вклейку) представлены формы вихревых структур (серый цвет) и области паровой фазы (голубой цвет) за гребным винтом при его работе на швартовном режиме на передний ход для различных чисел кавитации. Наблюдается описанный в предыдущем разделе процесс развития концевого вихря и смещение его начала к корневому сечению лопасти. Судя по всему, начало концевого вихря и при больших числах кавитации весьма сдвинуто к корневым сечениям, однако его интенсивность изменяется с уменьшением числа кавитации из-за добавления паровой фазы. Данный процесс сопровождается ростом объема сплошных паровых каверн и изменением гидродинамических характеристик гребного винта – наступлением первой (σ_n = 7,94 – 3,77) и второй (σ_n = 2,04 – 1,12) стадий кавитации. На режиме с минимальным числом кавитации (σ_n = 1,12) происходит разрушение концевых вихрей и образование потока разрозненных вихревых структур и каверн.

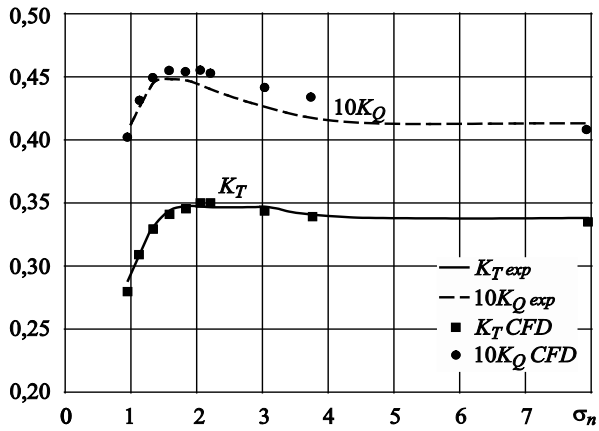


Рис. 10. Коэффициент упора (K_T) и момента (K_Q) гребного винта на швартовном режиме для различных чисел кавитации

Fig. 10. Bollard-pull thrust (K_T) and torque (K_Q) coefficients for various cavitation numbers

Работа гребного винта за корпусом судна

Behind-the-hull propeller operation

При выполнении численного моделирования обтекания моделей гребных винтов за корпусом судна при их работе на швартовных режимах использовались геометрические модели гребного винта с диаметром 0,18 м, расположенные на внешнем и внутреннем валах схематизированной модели (СМ) корпуса судна, которая использовалась при проведении модельных испытаний в кавитационном бассейне. Размерность расчетной сетки составляет около 36,8 млн ячеек.

На рис. 14 приведено сравнение гидродинамических характеристик, полученных в процессе чис-

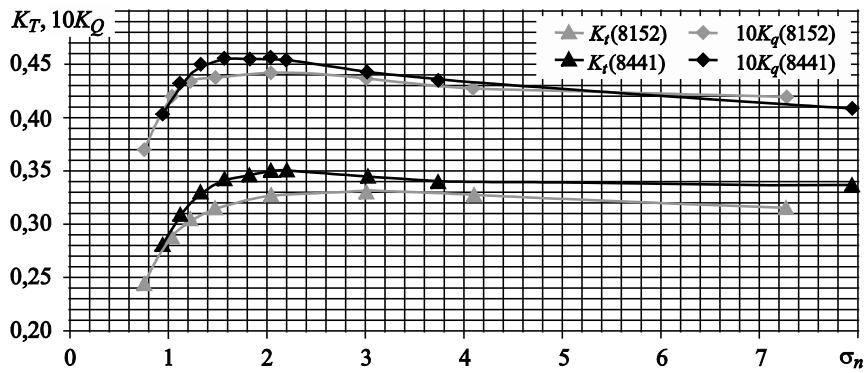
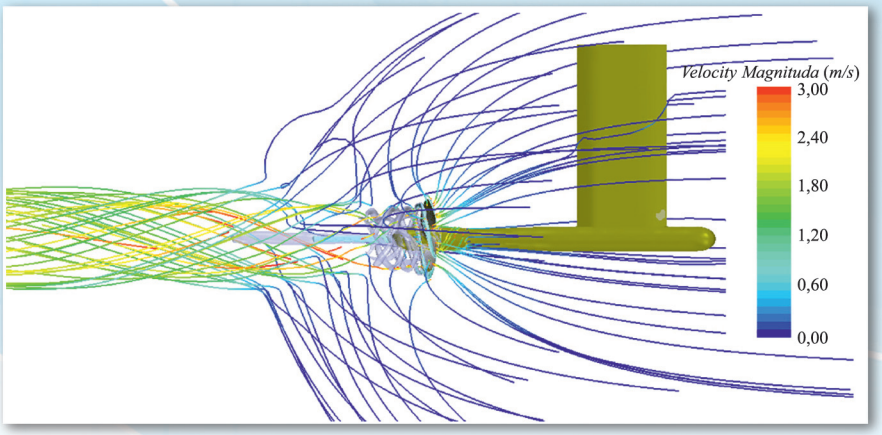


Fig. 14. Bollard-pull hydrodynamic parameters of the propeller model behind a dummy hull (8152) at various cavitation numbers σ_n in comparison with numerical simulation results for open-water conditions (8441)

Рис. 14. Гидродинамические характеристики модели гребного винта, работающей за корпусом схематизированной модели (8152) на швартовном режиме при различных числах кавитации σ_n в сравнении с результатами численного моделирования работы модели гребного винта в условиях «свободной воды» (8441)

Рис. 11. Общий вид линий тока в расчетной области при работе модели гребного винта на швартовном режиме

Fig. 11. General view of flow lines in the calculation domain for the propeller model in bollard-pull conditions



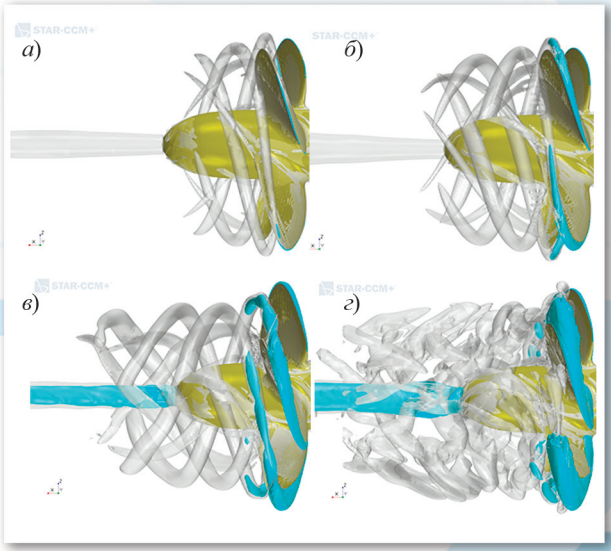


Рис. 12. Вихревые структуры (серый цвет) и кавитационные каверны (голубой цвет) в потоке за моделью гребного винта при его работе на различных швартовных режимах. Вид сбоку.
а) σ_n = 7,94; *б*) σ_n = 3,77; *в*) σ_n = 2,04; *г*) σ_n = 1,12

Fig. 12. Turbulent structures (grey) and cavitation bubbles (blue) in the propeller wake for various bollard-pull conditions. Side view: *a*) σ_n = 7.94; *b*) σ_n = 3.77; *c*) σ_n = 2.04; *d*) σ_n = 1.12

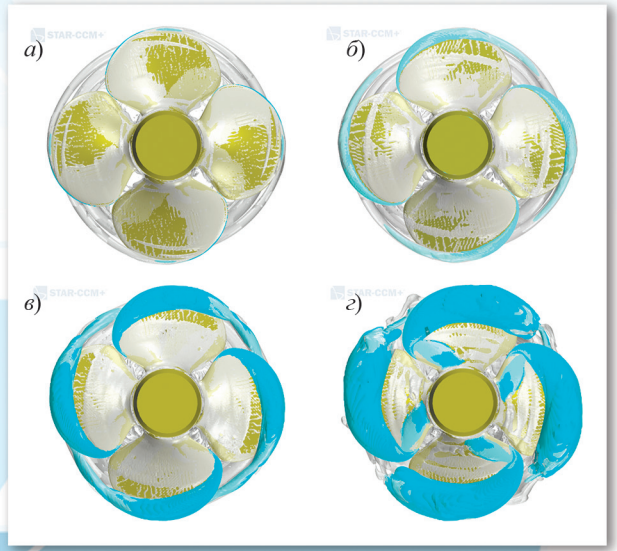
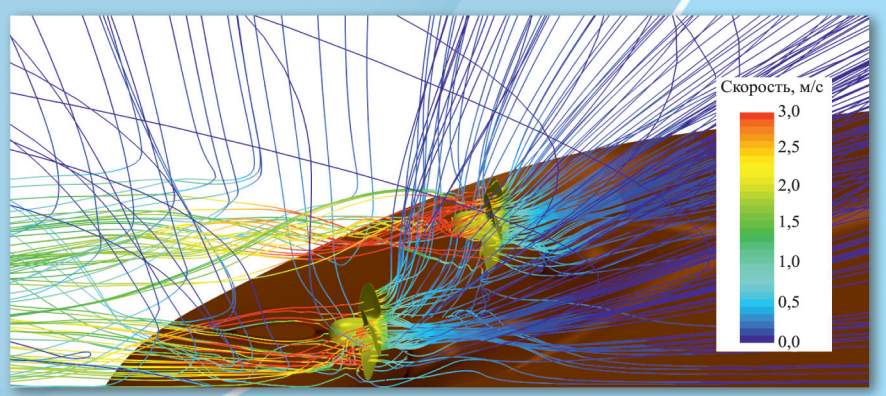


Рис. 13. Вихревые структуры (серый цвет) и кавитационные каверны (голубой цвет) в потоке за моделью гребного винта при его работе на различных швартовных режимах. Вид по потоку (колонка динамометра не показана).
а) σ_n = 7,94; *б*) σ_n = 3,77; *в*) σ_n = 2,04; *г*) σ_n = 1,12

Fig. 13. Turbulent structures (grey) and cavitation bubbles (blue) in the propeller wake for various bollard-pull conditions. Downstream view (dynamometric pod not shown): *a*) σ_n = 7.94; *b*) σ_n = 3.77; *c*) σ_n = 2.04; *d*) σ_n = 1.12

Рис. 15. Общий вид линий тока при работе двух гребных винтов за корпусом схематизированной модели на швартовном режиме, вид снизу

Fig. 15. General pattern of flow lines: two propellers operate at bollard pull behind the dummy hull. Looking upwards



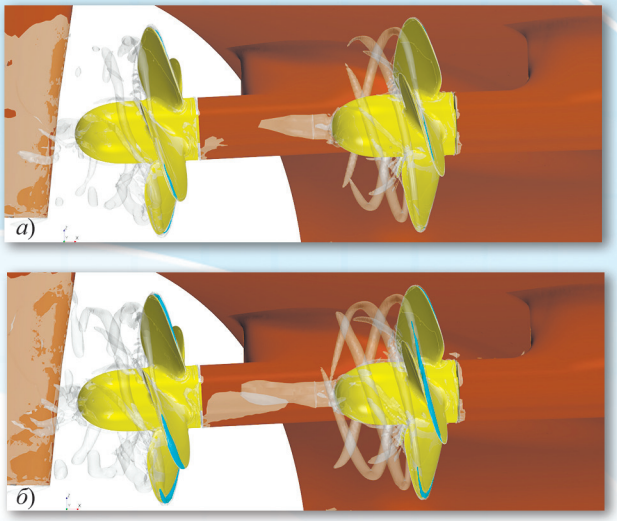


Рис. 16. Вихревые структуры и кавитационные каверны вблизи гребного винта № 8152 (справа, внешний вал) и № 8153 (слева, внутренний вал), вид сбоку на правый борт схематизированной модели, σ_n = 7,28 (*а*) и σ_n = 4,09 (*б*)

Fig. 16. Turbulent structures and cavitation bubbles near propeller Nos. 8152 (right, outer shaft) and 8153 (left, inner shaft): side view (looking starboard) of the dummy hull: σ_n = 7.28 (*a*) and σ_n = 4.09 (*b*)

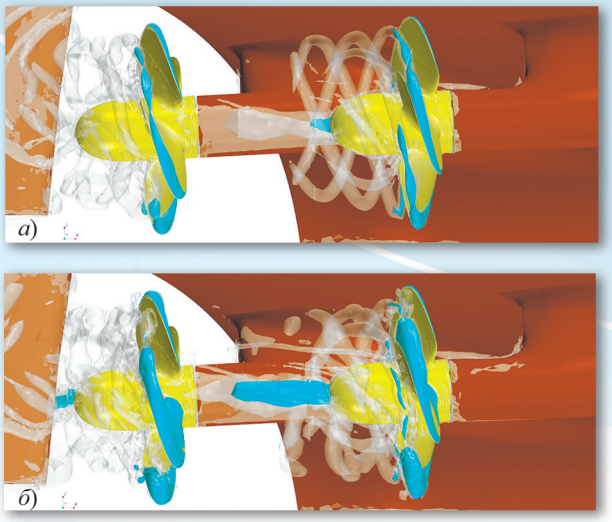


Рис. 17. Вихревые структуры и кавитационные каверны вблизи гребного винта № 8152 (справа, внешний вал) и № 8153 (слева, внутренний вал), вид сбоку на правый борт схематизированной модели, σ_n = 2,04 (*а*) и σ_n = 1,02 (*б*)

Fig. 17. Turbulent structures and cavitation bubbles near propeller Nos. 8152 (right, outer shaft) and 8153 (left, inner shaft): side view (looking starboard) of the dummy hull: σ_n = 2.04 (*a*) and σ_n = 1.02 (*b*)

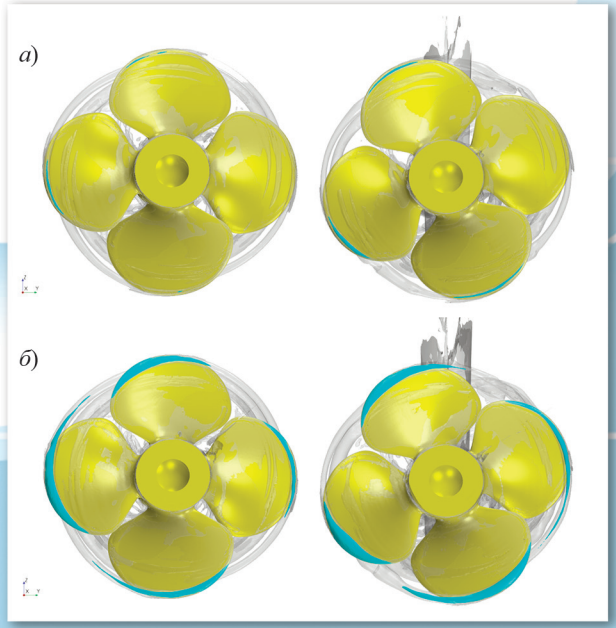


Рис. 18. Вихревые структуры и кавитационные каверны вблизи гребного винта № 8152 (слева, внешний вал) и № 8153 (справа, внутренний вал), вид с носа, σ_n = 7,28 (*а*) и σ_n = 4,09 (*б*)

Fig. 18. Turbulent structures and cavitation bubbles near propeller Nos. 8152 (right, outer shaft) and 8153 (left, inner shaft). Looking aft: σ_n = 7.28 (*a*) and σ_n = 4.09 (*b*)

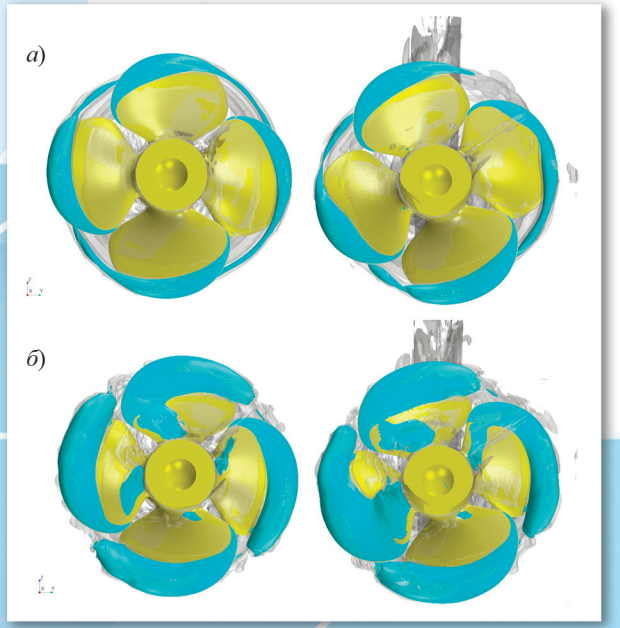


Рис. 19. Вихревые структуры и кавитационные каверны вблизи гребного винта № 8152 (слева, внешний вал) и № 8153 (справа, внутренний вал), вид с носа, σ_n = 2,04 (*а*) и σ_n = 1,02 (*б*)

Fig. 19. Turbulent structures and cavitation bubbles near propeller Nos. 8152 (right, outer shaft) and 8153 (left, inner shaft). Looking aft: σ_n = 2.04 (*a*) and σ_n = 1.02 (*b*)

ленного моделирования, в условиях «свободной воды» и при их работе за корпусом СМ. Заметно незначительное влияние корпуса на кавитационные характеристики гребного винта: начало «отвала» гидродинамических характеристик прогнозируется позже, на $\Delta\sigma_n \approx 0{,}15$–$0{,}20$ для гребного винта, работающего за корпусом СМ.

На рис. 15 (см. вклейку) представлены распределения линий тока при работе моделей гребного винта за корпусом СМ на швартовном режиме при $\sigma_n = 2{,}04$. Цветом показана амплитуда скорости жидкости. Хорошо видно, как гребные винты затягивают жидкость. Перед гребными винтами с увеличением относительного радиуса r/R происходит увеличение радиальной скорости. «Сбоку» от гребного винта (в районе диска винта) поток разворачивается практически перпендикулярно оси винта, аксиальная скорость почти отсутствует, а в сечениях за гребным винтом становится отрицательной.

На рис. 16–19 (см. вклейку) показаны вихревые структуры (серым цветом) и области кавитации – объемной доли пара $V_{\text{пар}}/V > 0{,}5$ (голубым цветом), полученные в процессе численного моделирования при различных числах кавитации. Как видно из представленных рисунков, при числах кавитации $\sigma_n = 7{,}28$ и $4{,}09$, соответствующих первой стадии кавитации, происходит образование кавитационной каверны в концевом вихре, которая уходит на верхнюю кромку. При уменьшении числа кавитации и перехода на вторую стадию кавитации, сопровождающуюся «отвалами» гидродинамических характеристик, каверны, образующиеся вблизи верхней кромки с засасывающей стороны, смещаются в сторону входящей кромки лопасти гребного винта. При числе кавитации $\sigma_n = 1{,}02$ область каверны занимает большую часть засасывающей стороны лопасти, структуры концевых вихрей разрушаются, кавитация в концевом вихре становится неустойчивой, а падение гидродинамических характеристик достигает 15–20 %.

Заключение

Conclusion

Проведенное экспериментальное и расчетное исследование обтекания гребных винтов на швартовном режиме и сопоставительное определение характеристик работы винта на швартовах показывает, что применение гибридных (расчетно-экспериментальных) методов позволяет существенно расширить возможности исследования, включая изучение физических аспектов течения, которые не могут наблюдаться в ходе чисто экспериментальных работ. Для швартовного режима были выявлены такие особенности течения, как возвратные течения на радиусах больше радиуса гребного винта, а также продемонстрирована картина образования и развития концевого вихря.

Результаты расчетов параметров кавитации и их экспериментальная валидация, выполненная в настоящей работе, позволяют рассматривать расчетные методы как перспективный инструмент для определения кавитационных характеристик винтов на швартовном режиме, важных для решения практических задач проектирования движителей и определения пропульсивных характеристик, прежде всего, ледовых судов. При этом, безусловно, во избежание труднопрогнозируемых погрешностей расчетов при работе с винтами различной геометрии, для перехода на расчетные методики необходим период формирования опыта расчетов с обязательным сопоставлением с экспериментальными данными.

Тем не менее результаты данной работы дают повод для оптимизма в отношении применения чисто расчетных методов для определения кавитационных характеристик гребных винтов на швартовном режиме в будущем.

Библиографический список

1. *Басин А.М.*, *Миниович И.Я.* Теория и расчет гребных винтов. Ленинград: Судпромгиз, 1963. 760 с.
2. *Русецкий А.А.*, *Жученко М.М.*, *Дубровин О.В.* Судовые движители. Ленинград: Судостроение, 1971. 288 с.
3. *Пустошный А.В.* Проектирование движителей для многорежимных судов с учетом особенностей их работы на различных эксплуатационных режимах: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001. 158 с.
4. *Каневский Г.И.*, *Клубничкин А.М.*, *Лобачев М.П.*, *Рудниченко А.А.* Разработка методики определения запаса гребных винтов ледоколов на развитую кавитацию // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 49–60.
5. *Lobachev M.P.*, *Saifullin T.I.*, *Taranov A.E.*, *Frolova I.G.* CFD application for and icebreaker propeller design // Proceeding of Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 398–403.
6. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений / *Багаев Д.В.* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 46–56. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-46-56.

7. *Мейне К.* Экспериментальное и теоретическое исследование масштабного эффекта при испытаниях моделей гребных винтов. Ленинград, 1972. 83 с. (Предприятие п/я в-8662; пер. № 183-68). Пер. изд.: Schifftechnik. 1968. Vol.15, №77 (Y). P. 45–59.
8. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. № 32. P. 1598–1605.
9. *Багаев Д.В., Лобачев М.П., Чалов С.А.* Расчет кавитационных явлений в вязкой жидкости // Шестые Поляховские чтения: тезисы докладов международной конференции по механике. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2012. С. 114.
10. *Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K.* A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International J. Heat and Fluid Flow. 2008. Vol.29, № 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
11. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *Menter F.R.* [et al.] // ASME J. Turbomachinery. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
12. *Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, № 1. P. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. *Sauer J.* Instationaer kavitierende Stroemungen: Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing VoF und Blasendynamik: thesis … dr der Ingenieurwissenschaften / Sauer J.; Univeristy of Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau. Kalrsruhe, 2000. 162 p.

References

1. *A. Basin, I. Miniovich.* Theory and calculation of propellers. Leningrad: Sudpromgiz, 1963. 760 p. (*in Russian*).
2. *A. Rusetsky, M. Zhuchenko, O. Dubrovin.* Marine propulsors. Leningrad: Sudostroyeniye, 1971. 288 p. (*in Russian*).
3. *A. Pustoshny.* Design of propulsors for multi-mode vessels taking into account the specific of their operation in different conditions. Doctoral Theses. St. Petersburg: KSRI, 2001. 158 p. (*in Russian*).
4. *G. Kanevsky, A. Klubnichkin, M. Lobachev, A. Rudnichenko.* Developing the procedure for determination of second-stage cavitation margin for icebreaker propellers // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 2(384). P. 49–60 (*in Russian*).
5. *M.P. Lobachev, T.I. Saifullin, A.E. Taranov, I.G. Frolova.* CFD application for and icebreaker propeller design // Proceeding of 5th International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 398–403.
6. *D. Bagaev* et al. Validation of numerical simulation technology for cavitating flows // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 46–56. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-46-56 (*in Russian*).
7. *K. Meine*. Experimental and theoretical investigation of scale effects during propeller model tests. Leningrad, 1972. 83 p. (*in Russian*).
8. *F.R. Menter*. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. № 32. P. 1598–1605.
9. *D. Bagaev, M. Lobachev, S. Chalov*. Cavitation calculation for viscous fluid. Theses of papers for 6th Polyakhov Readings international conference on mechanics. St. Petersburg, 2012, p. 114 (*in Russian*).
10. *M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin.* A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International J. Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29. № 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
11. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *Menter F.R.* [et al.] // ASME J. Turbomachinery. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
12. *C.W. Hirt, B.D. Nichols.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, № 1. P.201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. *J. Sauer.* Instationaer kavitierende Stroemungen: Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing VoF und Blasendynamik: thesis … dr der Ingenieurwissenschaften / Sauer J.; Univeristy of Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau. Kalrsruhe, 2000. 162 p.

Сведения об авторах

Пустошный Александр Владимирович, д.т.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник – консультант отделения гидродинамики отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: 10_otd@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0003-4797-2213.

Таранов Андрей Евгеньевич, к.т.н., начальник Суперкомпьютерного центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: AE_Taranov@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-1325-3838.

Шевцов Сергей Павлович, к.т.н., главный специалист отдела главного конструктора филиала АО «Лазурит» в Санкт Петербурге. Адрес: 191036, Санкт Петербург,

Лиговский проспект, д. 6, корп. 2, лит. «А». Тел.: +7 (812) 207-57-56. E-mail: cdb-spb@cdb-lazurit.ru.
Рудниченко Алексей Андреевич, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Alexander V. Pustoshnyy, Dr. Sci. (Eng.), Corresponded member of Russian academy of science, 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: 10_otd@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0003-4797-2213.
Andrey Ye. Taranov, Cand. Sci. (Eng), Head of HPC-CFD Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: AE_Taranov@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-1325-3838.
Sergey P. Shevtsov, Cand. Sci. (Eng.), Head specialist in Head constructor department of St. Petersburg branch of design buro Lazurit. Address: Sankt Petersburg, Ligovsky pr., 6, block 2, litera «A», post code 191036. Tel.: +7 (812) 207-57-56. E-mail: cdb-spb@cdb-lazurit.ru.
Alexey A. Rudnichenko, 1st category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 28.02.20
Принята в печать / Accepted: 18.08.20