

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-32-50
УДК 629.5.038

А.Ю. Яковлев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ДВИЖИТЕЛЕЙ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются двигатели нетрадиционных типов, т.е. отличные от гребного винта. Цель исследования – применить результаты численных исследований фундаментальных научных проблем, проведенных в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ), для проектирования двигателей новых (нетрадиционных) типов.

Материалы и методы. В работе проанализированы проблемы разработки двигателей нетрадиционных типов, таких как главные винторулевые колонки, двигатели CRPOD и RSN, двигатель с кольцевым приводом, а также различные типы водометных двигателей. Рассмотрены проведенные ранее исследования и разработанные математические модели, посвященные решению фундаментальных проблем в области судовых двигателей. Представлены концепции использования данных методов при проектировании новых типов судовых двигателей и достигнутые с их помощью результаты.

Основные результаты. Сформирована единая картина создания различных типов современных двигателей. Для ряда типов двигателей представлены концепции их разработки с использованием численных методов и продемонстрирована эффективность разработанных методов.

Заключение. Теоретическая значимость работы состоит в формулировке единых способов подхода к разработке двигателей новых типов. Продемонстрирована связь результатов фундаментальных исследований, проводимых в КГНЦ, с решением конкретных практических задач.

Ключевые слова: двигатель, водомет, винторулевая колонка, концевой привод, насадка, проектирование, расчет.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-32-50
UDC 629.5.038

A. Yakovlev

Krylov State Research Centre, SMTU, St. Petersburg, Russia

NUMERICAL SIMULATION AND DESIGN OF NEW PROPULSOR TYPES

Object and purpose of research. This paper studies non-conventional propulsors. The purpose is to apply numerical results yielded by Krylov State Research Centre studies on fundamental scientific matters in design of non-conventional propulsors.

Materials and methods. The paper analyses the challenges in development of non-conventional propulsors (pod propulsion units (PPUs), CRPOD and RSN propulsors, rim drives, as well as waterjets of various types. It describes previous studies and mathematical models dedicated to fundamental matters of marine propulsion, as well as discusses how the concepts of applying this knowledge have been applied in design of new marine propulsors and what results have been obtained.

Main results. This paper forms an integrated design approach to innovative propulsors of various types. For a number of propulsors, this paper discusses the concepts of their development based on numerical techniques, as well as demonstrates the efficiency of developed methods.

Conclusion. Theoretical importance of this work is that it formulates unified approaches to development of non-conventional propulsor. This study demonstrates how Krylov State Research Centre uses the results of fundamental studies in practical design activities.

Keywords: propulsor, waterjet, pod propulsion unit, rim drive, duct, design, calculation.
Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Яковлев А.Ю. Численное моделирование и проектирование новых типов двигателей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 32–50.

For citations: Yakovlev A. Numerical simulation and design of new propulsor types. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 32–50 (in Russian).

Введение

Introduction

На фоне бурного развития техники на протяжении XX века в области судовых движителей сложилась особая ситуация: гребной винт (ГВ), утвердившийся к концу XIX века в качестве основного типа движителя, остается таковым до настоящего времени. Конечно, за столетие геометрия ГВ претерпела серьезные изменения. Тем не менее подобный «консерватизм» зачастую подвергается критике, причем обычно оппоненты ссылаются (чаще всего необоснованно) на низкий КПД ГВ. На самом деле, ГВ является очень эффективным и совершенным движителем. Огромные усилия ученых и инженеров позволили довести современные ГВ практически до совершенства. И любому другому типу движителя очень сложно составить конкуренцию современному хорошо спроектированному ГВ. Надо сказать, что, несмотря на множество новых типов движителей, сопоставление с традиционным ГВ в подавляющем большинстве случаев оказывается не в их пользу.

Несмотря на практически незыблемое положение ГВ, разработки новых типов движителей продолжают. Но по указанным выше причинам путь к практическому внедрению новых типов движителей оказывается долгим и непростым. Обычно внедрение происходит в узком сегменте, для которого важны особые свойства, присущие нетрадиционному движителю. Но даже в этом случае новый движитель обычно существенно проигрывает ГВ по КПД и ряду других показателей, не говоря уже о трудоемкости изготовления. Здесь важно отметить существенный момент: ГВ уже хорошо отработаны, и их проектирование ведется по стандартным методикам, а новые движители зачастую проектируются весьма приближенно – «по наитию». Таким образом, характеристики многих движителей могли бы быть заметно улучшены, и тогда, возможно, некоторые из них стали бы конкурентоспособны по отношению к ГВ. Именно алгоритмы такого проектирования, созданные в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) за последние 10–15 лет, и рассматриваются в работе.

Другими словами, разработка новых типов движителей потребовала новых методов их проектирования. В данном случае речь идет именно о методах и математических моделях, реализованных специально для проектирования и оптимизации движителей. В настоящей статье не рассматривается применение стандартных пакетов вычислительной гидродинамики для расчета и проектирования

движителей. Следует отметить, что в настоящее время CFD-расчет является одним из этапов проектирования движителей, но он, как и эксперимент, используется на этапе финальной проверки и доводки уже предварительно спроектированного движителя. CFD-расчеты позволяют получить полную картину работы движителя и поэтому остаются важнейшим инструментом его отработки. В то же время, хотя сделаны определенные шаги по оптимизации формы движителей в стандартных пакетах, они пока уступают по качеству и требуют больших временных затрат. Также следует отметить, что точность всех расчетных методов зависит от корректности выбора математической модели и ее правильного использования проектировщиком.

Переходя к рассмотрению проблем проектирования движителей и методов их численного моделирования, созданных в КГНЦ, нельзя не отметить огромную роль разработок, выполненных специалистами ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова за предшествующее время. Здесь необходимо указать на работы А.Д. Перника по гребным винтам специальных типов, В.Ф. Бавина, М.А. Вашкевича, Е.Н. Сыркина и Л.А. Мухиной, посвященные силам, которые возникают на движителях, работающих в неравномерном потоке, и проектированию ГВ, И.Я. Миниовича по реверсу ГВ, разработки профилей лопастей ГВ, выполненные К.В. Александровым, математическое представление лопастей ГВ, разработанное Н.Ю. Завадовским, исследования ГВ в насадке в работах В.Г. Мишкевича и В.К. Турбала, ВРШ в работах А.А. Русецкого, кавитации ГВ в работах Ю.М. Садовникова, винтов изменяемого шага в исследованиях Л.И. Вишневецкого, водометных движителей в работах С.И. Куликова и М. Храмкина и др. Все они в той или иной степени были связаны с моделированием и численным совершенствованием движителей в части пульсивных, нестационарных и прочностных характеристик.

Проблемы, связанные с разработкой движителей различных типов

Development challenges for various types of propulsors

С конца XX века в мировом судостроении наметился ряд направлений развития новых типов движителей. Пожалуй, первым из таких направлений, в котором наиболее полно проявилось международное взаимодействие, было создание винторуле-

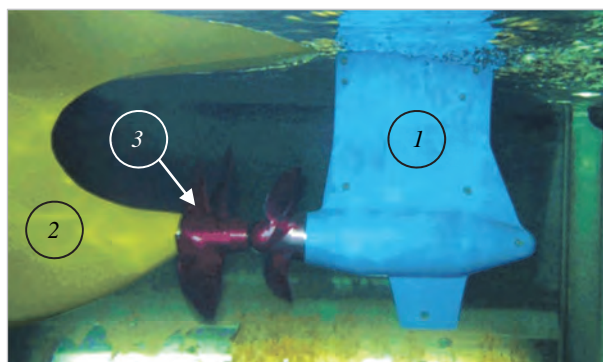


Рис. 1. Движитель CRPOD:
 1 – поворотная колонка; 2 – кормовая оконечность судна; 3 – передний ГВ на валу

Fig. 1. CRPOD propulsor: 1 – azimuthal pod unit; 2 – stern; 3 – forward propeller (conventional)

вых колонок, используемых в качестве главных движителей (далее – главные винторулевые колонки (ГВРК)). КГНЦ изначально участвовал в этих работах как ведущий центр по проектированию ГВ [1] и в этом ключе успешно работает во взаимодействии с фирмой АВВ, производящей электрические ГВРК [2]. Из этих совместных работ в дальнейшем выделились работы по созданию движителей CRPOD [3] и RSN [4], которые, по сути, являются новыми типами движителей.

На первоначальном этапе разработка ГВ для ГВРК велась с использованием стандартных отече-

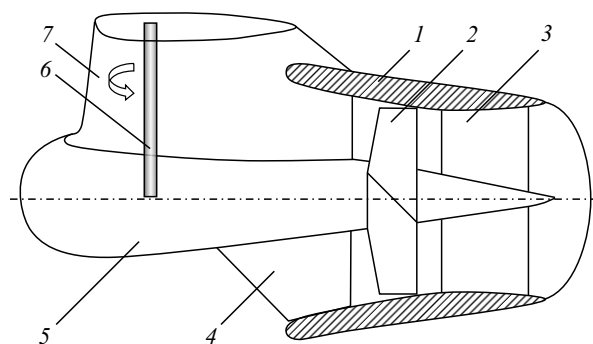


Рис. 2. Обобщенная схема движителя с насадкой:
 1 – насадка; 2 – ГВ; 3 – задняя неподвижная ЛС; 4 – передняя неподвижная ЛС; 5 – гондола движителя; 6 – ось поворота движителя в случае его исполнения в винторулевом варианте; 7 – стойка для крепления к корпусу

Fig. 2. Generalized layout of nozzleed propulsor:
 1 – nozzle; 2 – propeller; 3 – rear stator; 4 – front stator; 5 – body; 6 – turning axis of propulsor (if azimuthable design is adopted); 7 – strut

ственных инструментов проектирования ГВ [5, 6]. Однако достаточно быстро выявилась необходимость создания специализированных расчетных методов для проектирования этих движителей. Что касается методов проекторочного и поверочного расчета ГВ для ГВРК, то они были созданы на кафедре теории корабля СПбГМТУ под руководством А.Ш. Ачкинадзе [7, 8]. Но даже при наличии этих методов оставался нерешенным целый ряд важных проблем. Из них наиболее актуальны следующие:

1. проблемы с управляемостью, возникающие при малых углах перекалки колонки;
2. ухудшение виброакустических характеристик при повороте колонки;
3. возникновение больших поперечных сил;
4. сложные процессы при реверсе путем поворота ГВРК и связанные с ними проблемы прочности ГВ.

Решение этих проблем осложняется недостатком и трудностью получения экспериментальных (в особенности натурных) данных, а также нелинейными явлениями гидродинамического взаимодействия.

Одним из направлений развития ГВРК является новый тип движительных комплексов, объединяющий концепцию соосных ГВ и поворотных колонок – движитель CRPOD. В рамках данной концепции поворотная колонка тянущего типа устанавливается соосно за передним ГВ на валу (рис. 1). Так достигается повышение эффективности движителя, аналогичное применению соосных ГВ, но при этом удается избежать сложной конструкции вала [3].

Данный тип движителя, объединяя в себе достоинства поворотных колонок и соосных ГВ, имеет ряд проблемных мест. Особое беспокойство вызывает поворот колонки в следе за передним ГВ, который может приводить к интенсивным нестационарным явлениям гидродинамической природы.

В последнее время стали актуальны различные типы движителей, включающие кольцевую насадку. К этой группе относятся традиционные ГВ в направляющих насадках, поворотные колонки с ГВ в насадке или движителем типа pump-jet. На рис. 2 представлена обобщенная схема движителя с насадкой. К преимуществам данного типа движителей относятся возможность получения дополнительного упора на насадке, снижение концевых потерь лопастной системы (ЛС), выравнивание неоднородности внешнего потока, возможность повышения КПД за счет установки неподвижных ЛС перед или за ГВ, снижение пульсаций давления на корпусе в результате экранирующего действия насадки. Проблемами таких движителей являются возможность возникно-

вения значительных пульсаций сил на насадке и центральном теле, необходимость комплексной оптимизации формы насадки и других элементов в составе единого движителя (в противном случае движитель будет заведомо уступать ГВ).

Одним из инновационных направлений работы КГНЦ являются водометные движители [9, 10]. Помимо классических водометных движителей с располагаемым внутри корпуса судна водопропускным каналом и статическим водозаборником в КГНЦ разработан целый ряд уникальных типов водометных движителей. В их числе малогабаритный водометный движитель (МГВД) [11–13], вентилируемый водометный движитель (ВВД) [14], легконагруженный водометный движитель [15], а также подвесной водометный движитель для маломерных судов [16] и ряд других.

Одна из основных проблем разработки водометных движителей состоит в необходимости уменьшения потерь энергии на протекание жидкости через водопропускной канал. При этом нужно обеспечить отсутствие кавитации на стенках канала и водозаборника в широком диапазоне режимов эксплуатации водомета. Также актуальной остается задача разработки высокоэффективных многоступенчатых ЛС насосного агрегата водомета.

Движители с кольцевым приводом (в зарубежной литературе – RIM-движители (от слова rim – кольцо, обечайка)) были предложены еще в середине XX века, но их активное исследование и практическое применение началось только в последние годы, как следствие создания специальных электродвигателей. Наиболее успешно этот тип движителей внедряется на подруливающих устройствах (ПУ) (рис. 3). Движители с кольцевым приводом условно разделяются на ступичные и бесступичные. К первым относятся движители, у которых лопасти соединены между собой двумя поверхностями: кольцом по внешним концам лопастей и ступицей по корневым сечениям. Бесступичные движители, как следует из названия, не имеют ступицы, а их лопасти крепятся только к обечайке. Уход от традиционной схемы крепления лопастей открывает перспективы для создания высокоэффективных движителей на основе кольцевого привода, реализованных в новых разработках КГНЦ [17].

Проблемы разработки движителей с кольцевым приводом в части гидродинамики состоят в необходимости проектирования ЛС, имеющих нестандартную форму и распределение нагрузок, а также решения вопросов их прочности, связанных с изменением места крепления лопастей. Кроме того, проблемы

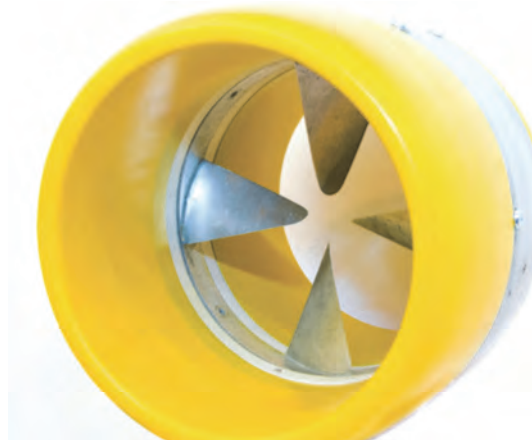


Рис. 3. Бесступичный движитель с кольцевым приводом на макете канала ПУ

Fig. 3. Rim-driven propulsor on a thruster tunnel dummy

относятся к особенностям формирования вихревых пелен за лопастями, особенностям взаимодействия лопастей с креплением на ободе с различными типами неподвижных ЛС, к необходимости разработки кольцевых обтекателей для привода обечайки.

Научные задачи, связанные с разработкой новых типов движителей

Scientific challenges in development of innovative propulsors

Разработка движителей новых типов и необходимость создания методов их проектирования привела к постановке ряда научных задач. Ниже представлены наиболее важные из этих задач и пути их решения, разработанные в КГНЦ.

Математическое моделирование вихревых следов за лопастями

Явления, обусловленные динамикой вихревых пелен за лопастями, для одиночных ГВ обычно считаются несущественными и редко учитывают в расчетах. Иначе обстоит дело с более сложными движителями. Взаимодействие пелен свободных вихрей (ПСВ) с расположенными ниже по потоку элементами движителя приводит к возникновению на последних дополнительных нагрузок, которые необходимо уметь определять расчетным путем.

Подробный анализ методов расчета ПСВ и обзор опубликованных экспериментальных данных

представлен в [18]. Этот анализ показал, что наиболее совершенными математическими моделями ПСВ являются нелинейные модели.

Разработка нелинейной модели ПСВ была осуществлена в условиях потенциального течения [19], поскольку завихренность за лопастями ГВ концентрируется в тонких вихревых пеленах, которые могут быть смоделированы методами вихревой теории. Форма ПСВ рассчитывается в связанной с ГВ невращающейся системе координат. Набегающий на ГВ поток считается однородным, что позволяет считать форму ПСВ одинаковой для всех лопастей ГВ.

Уравнение движения вихревой поверхности S_Γ за лопастями ГВ представляется следующим образом [19, 20]:

$$\vec{r}_\Gamma(r_0, \tau, t) = \vec{r}_\Gamma(r_0, \tau_0, t_0) + \int_{t_0}^t \vec{V}(\vec{r}_\Gamma(\cdot), r_0, \tau, t) d\tau, \quad (1)$$

где V – скорость жидкости в точках вихревой пелены, определяемая в результате расчета; r – координата точки на поверхности ПСВ; r_0 – начальная координата точки; t – время; t_0 – начальный момент времени; τ – текущая лагранжева координата.

Решение уравнения (1) осуществляется последовательными приближениями. В качестве начального приближения задается правильная геликоидальная форма вихревой пелены, имеющая постоянный шаг и радиус. Итерационный процесс включает два вложенных цикла. Внутренний цикл обеспечивает последовательное определение новых координат вихревой пелены. Внешний цикл предназначен для повторного определения формы ПСВ с учетом ее формы, полученной на предшествующем шаге итерации. Специальный алгоритм позволяет избежать неустойчивости ПСВ, возникающей при расчете бесконечно тонких пелен [19].

Помимо нелинейной модели разработаны также упрощенные методы расчета формы ПСВ [21]. Они не позволяют определять локальные изменения ПСВ, но обеспечивают необходимую точность расчета силовых характеристик движительных комплексов при существенно меньшем времени расчета. В рамках упрощенной нелинейной модели: скорости, входящие в уравнение (1), берутся осредненными по угловой координате, а форма ПСВ вблизи лопасти ГВ определяется с помощью специальной асимптотики. При таком подходе не удается полноценно учесть эффекты сворачивания ПСВ, тем не менее общие закономерности поведения шага и радиуса ПСВ в рамках упрощенного метода определяются верно, что гарантирует точную оценку силовых характеристик.

Исследование нестационарного взаимодействия лопастных систем

В связи с возникшими практическими запросами был разработан комплекс расчетных методов, позволяющий рассчитывать нестационарное взаимодействие произвольно расположенных ЛС в условиях неоднородного набегающего потока [22]. В отечественной практике подобные методы вообще отсутствовали, а число зарубежных разработок крайне невелико, причем в большинстве случаев исследователи ограничиваются соосным расположением ГВ.

Разработанный метод реализован в виде процесса последовательных приближений, на каждом шаге которого производится расчет обеих ЛС и определяются вызванные ими скорости в месте расположения соседней ЛС. Использование принятого в КГНЦ [6] анализа нестационарных характеристик с помощью рядов Фурье существенно упрощает расчет по сравнению с зарубежными методиками. Результирующие силы и моменты на ЛС определяются путем суммирования рядов Фурье, полученных для отдельных лопастей. Расчет переменных сил на лопасти осуществляется с помощью метода несущей поверхности, разработанного В.Ф. Бавиным и Л.А. Мухиной [23].

Помимо разработки численного метода выполнен теоретический анализ частот пульсаций сил и моментов на взаимодействующих ЛС [24]. Было показано, что взаимодействие ЛС в неоднородном потоке приводит к сдвигу частот пульсаций сил и моментов. На основании этих результатов получено соотношение для частот f пульсаций сил и моментов на паре взаимодействующих ЛС:

$$f_{m,k} = \frac{1}{2} \left| mZ_p - p + kZ_{1-p} - 1 - p \right|, \quad (2)$$

где k и m – произвольные (положительные или отрицательные) целые числа; Z – число лопастей; Ω – скорость вращения ЛС; индексы $p = 0$ или 1 определяют одну из ЛС.

Для случая соосного расположения ЛС получено необходимое условие пульсаций сил и моментов на частоте $f_{m,k}$, связывающее их возникновение с присутствием в набегающем потоке гармоник скорости с определенным номером:

- для продольных компонент силы и момента $n = mZ_p + kZ_{1-p};$
- для поперечных компонент силы и момента $n = mZ_p + kZ_{1-p} \pm 1,$

где n – номер гармоники набегающего потока.

Исследование нестационарного взаимодействия ГВ с насадкой

Нестационарные силы при работе движителей возникают не только на ЛС, но и на других элементах, в первую очередь на насадке. Источником этих пульсаций являются вращающиеся ЛС, создающие в точках насадки периодически повторяющееся поле скоростей. При работе движителя в неоднородном набегающем потоке пульсации давления на насадке вследствие различия обтекания разных лопастей представляются в виде дискретного набора, кратного частоте вращения.

Метод расчета нестационарного обтекания насадки реализован на базе ВЕМ-метода [25, 26]. При этом решение задачи сводится к интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода относительно неизвестной интенсивности потенциала простого слоя q на поверхности тел S . Определение значения циркуляции Γ в каждом меридиональном сечении осуществляется из условия Чаплыгина – Жуковского, выставляемого на выходящей кромке кольцевого крыла. Неизвестная интенсивность потенциала простого слоя q представляется в виде ряда Фурье по угловой координате θ и времени t . Кроме того, аналогичным образом – в виде ряда Фурье – выражаются циркуляция скорости вокруг кольцевого крыла и компоненты вектора скорости набегающего потока. Нестационарные скорости, вызванные работой ГВ, определяются по методу [20].

При таком подходе поверхностный интеграл в уравнении для потенциала простого слоя сводится к контурному интегралу по меридиональному сечению. Причем для каждой гармоники ряда Фурье получается отдельное уравнение для синусной и косинусной составляющих интенсивности источников q_{km} . Вихревая составляющая включает косинусную B_m и синусную D_m составляющие одновременно:

$$-\frac{q_{km}(P_0)}{2} + \oint q_{km}(P) \cdot K_m(P, P_0) dP + \int_{km} \cdot [(\vec{B}_m, \vec{n}) + \text{sign}(k) \cdot i \cdot (\vec{D}_m, \vec{n})] = -(\vec{V}_{km}, \vec{n}), \quad (4)$$

где Λ – контур меридионального сечения поверхности S ; V – скорость натекающего потока; n – нормаль к меридиональному сечению насадки; Γ – циркуляция скорости вокруг меридионального сечения; K_m – ядро интегрального уравнения.

Это интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода с логарифмическим ядром K_m . Степень осо-

бенности ядра меньше, чем R^{-p} , при любом значении $0 < p < 1$, и, следовательно, уравнение удовлетворяет теории Фредгольма. Поверхность обтекаемого тела предполагается гладкой (непрерывной вплоть до второй производной), исключение делается только для выходящей кромки, где имеет место особая точка. Отличительной чертой уравнения является его инвариантность относительно вещественной и мнимой частей, определяющих косинусную и синусную составляющие.

После решения уравнения силы, действующие на телах, определяются путем интегрирования давления по их поверхности. При этом, как показано в [25], продольная сила на насадке будет зависеть только от нулевой гармоники разложения давления в ряд Фурье по угловой координате, а поперечная – от косинусной и синусной составляющих первой гармоники этого разложения.

Расчет движителей на непроектных режимах

Проектным называется режим работы движителя, для которого выполняется его проектирование. Следовательно, характеристики движителя на этом режиме должны удовлетворять всем заявленным требованиям. Однако во многих практически важных случаях, таких, например, как реверсирование и маневрирование судна, движитель работает на режимах, существенно отличающихся от проектного. Поэтому в ходе разработки движителя эти режимы эксплуатации исследуются особо.

Основные принципы расчета на непроектных режимах сформулированы в [27]. При расчете безотрывного обтекания используются поправки на вязкость, традиционно применяемые для ГВ. Для определения момента возникновения отрыва на входящей кромке профиля используются упрощенные соотношения теории пограничного слоя. Расчет отрывного обтекания осуществляется с помощью формулы Рэлея для коэффициента нормальной силы C_N , с учетом поправок на ограниченные размеры отрывной области:

$$C_N = \frac{2 \sin(\alpha)}{4 + \sin(\alpha)} \left[1,0 + \frac{\sigma}{8(1 + 4)} \right], \quad (5)$$

где величина σ представляет собой коэффициент давления в отрывной области; α – угол атаки.

Специальные поправки вводятся также для учета особенностей обтекания трехмерного крыла.

Для учета взаимодействия ГВ с колонкой вводятся в рассмотрение коэффициенты засасывания и попутного потока, аналогично тому, как это принято для ГВ, работающего за корпусом. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют проанализировать данные коэффициенты и представить их в виде функций от поступи J и угла поворота колонки ψ [27]:

$$\begin{aligned} w &= w(J, \psi), \\ t &= t(J, \psi). \end{aligned} \quad (6)$$

Пользуясь зависимостями (6), можно осуществлять пересчет характеристик ГВ в свободной воде, в том числе полученных расчетным путем, на случай его работы в составе поворотной колонки. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными подтверждает эффективность предложенного метода [27].

Для расчета отрывного обтекания осесимметричных тел, включая кольцевое крыло, был разработан специальный расчетный метод [28, 29]. Он основан на простом, но достаточно точном методе Трукенбротта для расчета пограничного слоя и способе моделирования зоны отрыва по методу Лойцянского. Тестовые расчеты показали возможность быстрого и точного построения отрывной зоны на осесимметричных телах [28]. Также с использованием разработанного метода расчета обтекания системы осесимметричных тел с учетом вязких и отрывных эффектов был создан метод непосредственной численной оценки коэффициентов (6) для взаимодействия ГВ с осесимметричной гондолой ГВРК [30].

Расчет реверсирования судна и режимов работы движителей

Анализ прочности лопастей ГВ на режиме реверса и собственно алгоритм расчета реверсирования судна путем изменения направления вращения ГВ были развиты в КГНЦ в работах Б.А. Бискупа и В.А. Бушковского [31, 32]. Однако при разработке новых типов движителей этого метода стало недостаточно, поскольку изменились режимы и способы реверсирования, а также появились варианты оснащения судов движителями нескольких типов одновременно. Для решения данных задач был разработан метод [33], кратко представленный ниже.

В рамках разработанного метода для расчета движения судна и его маневрирования необходимо задать силовые характеристики в виде зависимости

так называемых обобщенных коэффициентов упора K_{TP} и момента K_{QP} [32] от поступи и других параметров. Эти характеристики могут определяться как экспериментально, так и численно. Кроме того, для решения уравнения движения судна необходимо знать зависимость сопротивления от скорости хода и коэффициент присоединенной массы μ , учитывающий дополнительные силы, возникающие в результате нестационарного взаимодействия корпуса с жидкостью.

Уравнение работы движителя получаем на основе закона момента количества движения для каждого движителя в отдельности. При этом учитывается, что энергия, передаваемая на движитель, определяется мощностью энергетической установки N , которая выражается через число оборотов n и момент на валу Q_p : $N = 2\pi n Q_p$.

В окончательном виде дифференциальные уравнения движения судна и работы движителей образуют систему дифференциальных уравнений [33]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{R_h + \sum_{i=1}^{z_p} (V^2 + n_i^2 D_i^2) D_i^2 \cdot K_{TPi}(\psi_i) \cdot (1 - t_i)}{m(1 + \mu)}, \\ \frac{dn_i}{dt} = \frac{(V^2 + n_i^2 D_i^2) D_i^3 \cdot K_{QPi}(\psi_i) + Q_{Ri} + Q_{Pi}}{2(I_i + I_i)}, i = \overline{1, z_p}, \end{cases} \quad (7)$$

где первое уравнение – это уравнение движения судна, а остальные представляют собой уравнения работы отдельных движителей; z_p – количество движителей.

Данная система состоит из $z_p + 1$ дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами при производных и нелинейными правыми частями. Неизвестными являются зависимости от времени скорости движения судна $V(t)$ и оборотов каждого из движителей $n_i(t)$. В совокупности с начальными условиями, которые обычно соответствуют полному ходу судна вперед (скорость V_{max}) и проектному режиму работы движителей с номинальными оборотами ГВ $n_{ном}$, система (7) образует задачу Коши. Решив ее, найдем все необходимые характеристики экстренного торможения судна.

Аналогичным образом можно исследовать работу движителей при маневрировании судна, в том числе в условиях воздействия внешних факторов (ветра, волнения, ледовой обстановки). Результаты таких работ, выполненных в КГНЦ совместно специалистами в области ходкости и управляемости, представлены в [34].

Исследование особых форм кавитации

Задача математического моделирования кавитации остается актуальной даже для традиционного ГВ. Тем большие трудности возникают при моделировании кавитации новых типов движителей. Одна из недавно выявленных проблем состоит в появлении широкополосного спектра пульсаций давления, вызванных кавитацией ГВ [35].

Для выяснения причин возникновения широкополосных давлений проведено специальное численное исследование [36]. В ходе анализа было установлено, что появление широкополосных пульсаций («горба» в спектре) связано с эффектами возникновения и схлопывания кавитационных каверн и кавитирующих вихрей. Эти эффекты обусловлены прохождением лопастями зон неоднородности поля скорости в диске винта. Полученные материалы позволяют предположить, что наибольшее влияние на образование широкополосных давлений может оказывать динамика развития кавитационных процессов – резкость образования, роста и схлопывания каверны, а также расстояние между экстремумами функции давления. При этом более плавное изменение поля скоростей и большая ширина кончика лопасти способствуют снижению опасности появления широкополосных давлений на 5–10 гармониках [36].

Для моделирования данного явления был разработан метод прогнозирования широкополосных пульсаций давления, вызванных работой кавитирующего винта в неоднородном потоке [37]. Влияние неоднородности потока учитывается за счет изменения формы и объемов каверн за оборот ГВ. В расчетах применяется сферическая модель для объема каверны. Несмотря на то, что такой подход является приближенным, он продемонстрировал чувствительность к изменению поля скоростей и числа кавитации.

Еще одно направление исследований кавитации связано с развитием ледовых ГВРК. ГВ этих движителей должны одновременно удовлетворять всем требованиям к ледопроеходимости, иметь высокий КПД на полном ходу и обладать хорошими кавитационными характеристиками. Эти взаимоисключающие требования привели к появлению не встречавшихся ранее проблем возникновения кавитации [38] и в конечном итоге потребовали создания специальных методов обработки геометрии лопастей (см. статью А.В. Пустошного и др., публикуемую в настоящем сборнике).

Развитие ВЕМ-методов поперечного расчета

Основным инструментом практической разработки движителей в настоящее время служат методы граничных интегральных уравнений (ВЕМ). Для проектирования новых типов движителей потребовалось существенно усовершенствовать эти методы. Основные результаты работ в данном направлении отражены в [25, 39]. Ниже кратко представлен метод [39]. Метод ВЕМ для осесимметричных тел [25] описан выше.

Основное уравнение ВЕМ-методов представляет собой интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода относительно неизвестной интенсивности источников, распределенных по поверхности тела. Для моделирования циркуляционного обтекания тела, с образованием подъемной силы, на той же поверхности непрерывным образом распределены вихревые особенности γ . Для решения задачи используется криволинейная система координат, связанная с поверхностью тела.

Наиболее существенными отличиями метода являются особенности дискретизации основного уравнения. Решение уравнения Фредгольма ищется в виде линейной комбинации базисных, специальным образом выбранных билинейных функций μ_{ij} , отличных от нуля на элементе поверхности тела σ_{ij} :

$$q(\xi, \zeta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} q_{ij} \cdot \mu_{ij}(\xi, \zeta), \quad (8)$$

где N, M_i – число базисных функций в направлении криволинейных координат ξ и ζ ; общее число функций μ_{ij} равно $L = \sum_{i=1}^N M_i$; q_{ij} – искомые коэффициенты.

В соответствии с методом Галеркина выбрана система L линейно независимых функций ψ_{nm} , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M_n}$, таким образом, чтобы в пределах площадки σ_{ij} , отвечающей функции μ_{ij} , величина соответствующей ей функции ψ_{ij} равнялась единице, а на всей остальной поверхности – нулю. После подстановки выражения для q в интегральное уравнение Фредгольма, умножения на ψ_{nm} и интегрирования по S приходим к системе L линейных алгебраических уравнений для L неизвестных q_{ij} .

Помимо источников необходимо определить распределение циркуляции Γ вдоль координаты ξ , которое ищется в виде

$$\Gamma(\xi) = \sum_{i=1}^{N-1} G_i \cdot g_k(\xi). \quad (9)$$

Распределение γ получается из этого представления на основании закона о сохранении вихрей, причем как бы ни была выбрана зависимость $\gamma(\zeta)$, решение при заданной величине циркуляции будет одним и тем же. Незвестные величины G_i определяются из условия Чаплыгина – Жуковского, что приводит к добавлению $N - 1$ уравнения к полученной ранее системе.

Разработанный метод был протестирован на ряде теоретических задач и подтвердил свою эффективность [39]. Таким образом, разработка специализированных методов ВЕМ высокого порядка позволила проводить расчет обтекания лопастей и осесимметричных тел неоднородным нестационарным потоком жидкости. Эти методы обеспечивают хорошую точность получаемого решения при минимальном числе площадок.

Разработка методов прямой оптимизации

Долгое время под методами проектировочного расчета ГВ понимались только методы, основанные на теоретических соотношениях вихревой теории оптимального ГВ. Однако давно известен и альтернативный способ проектирования, состоящий в непосредственной постановке оптимизационной задачи для геометрии ГВ. Необходимость перехода к методам прямой оптимизации стала очевидной при проектировании новых типов движителей. Это связано с тем, что для этих движителей форма лопастей ГВ является далеко не единственным оптимизируемым элементом, кроме того, особенности геометрии лопастей не всегда позволяют использовать классические способы проектирования ГВ.

Методы оптимизации всех элементов движителя основаны на единых принципах [40]. В самом общем виде определение оптимальной формы тел может быть математически формализовано как задача поиска минимума некоторого функционала I при одновременном выполнении ряда условий ограничений G :

$$\begin{cases} I(j(x), \dots) \rightarrow \min, \\ G_i(j(x), \dots) \leq 0, i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (10)$$

Искомыми в этой задаче являются функции f_j , число которых может быть произвольным. Выражения для I и G_i будут различаться в зависимости от конкретных задач.

Теоретическое решение задачи (10) осуществляется на основе вариационного исчисления. Одна-

ко в данном случае задача (10) сводится к задаче математического программирования [40], которая ставится в пространстве n -мерных векторов, где n может быть велико, но конечно. Для этого необходимо представить искомую функцию f_j в виде линейной комбинации базисных функций f_k :

$$f_j(x) = \sum_{k=1}^{N_j} A_{kj} \cdot f_k(x). \quad (11)$$

Отметим, что базисные функции f_k обычно выбираются взаимно ортогональными.

Полученная задача нелинейной оптимизации с ограничениями на конечномерном пространстве может быть успешно решена современными численными методами. Конкретные методы ее решения, в том числе с использованием параллельных вычислений, представлены в ряде публикаций [4, 41–43].

Методы численного моделирования и разработки движителей

Numerical simulation and CAD methods in propulsor design

В данном разделе рассматривается совокупность методов численного моделирования и проектирования, применяемая для разработки различных типов движителей. Указанные методы построены на основе общих принципов и с применением расчетных методов, представленных выше.

Винторулевые колонки

Как уже было сказано, проектирование ГВ ГВРК является одной из инновационных компетенций КГНЦ. При проектировании используются экспериментальные методы исследования [44] и современные программы проектировочного расчета [7].

Проектирование ГВ ГВРК осуществляется в рамках жестких требований, выставляемых заказчиками. Это приводит к необходимости оптимизации ГВ не только по КПД, но и по кавитационным характеристикам. В том числе учитываются и специфические особенности кавитации, отмеченные выше [36–38].

Вопросы работы ГВРК и оценки ее характеристик в широком диапазоне режимов актуальны в связи с необходимостью оценки прочности лопастей ГВ, также немаловажной является возможность предварительной оценки эффективности

ГВРК в качестве средства активного управления и оценка усилий на элементах крепления ГВРК. Для расчета поворотной колонки на режимах, близких к проектному, может применяться метод, объединяющий панельные методы расчета обтекания осесимметричных и трехмерных тел, упрощенный нелинейный метод расчета формы ПСВ, а также метод несущей поверхности для ГВ [23], описанные выше. Алгоритм расчета представляет собой процесс последовательных приближений, позволяющий учесть взаимодействие всех элементов движителя [45, 46]. Результаты расчета по данному методу показаны на рис. 4.

Для расчета поворотной колонки в широком диапазоне режимов используется метод, основанный на приведенных выше разработках [27]. Представленная группа методов позволяет решать задачи определения нагрузок в процессе реверсирования судна, в том числе на режиме, наиболее опасном с позиции обеспечения прочности лопастей ГВ. В результате находят силы и моменты, действующие на ГВ и поворотной колонке в целом, необходимые для расчета реверса судна, который осуществляется путем поворота колонки. Расчет реверса судна выполняется по методу [33]. Далее рассчитываются нагрузки на наиболее опасном режиме, определенном по результатам расчета реверса. Проведенные исследования показали, что в процессе реверсирования движитель работает в условиях, существенно отличных от проектного режима работы (рис. 5). Нагрузки на лопасти ГВ и обусловленные ими напряжения в этом случае принципиально отличаются от аналогичных характеристик при традиционном реверсе. Расчет прочности лопастей ГВ ГВРК также потребовал специальных разработок, которые были реализованы Ф.И. Габерцеттелем. В настоящее время разработанная группа расчетных методов в комплексе с методом расчета реверса представляет основной инструмент обеспечения прочности ГВ в составе ГВРК.

Движитель CRPOD

Для расчета ГВ, работающих в составе CRPOD, применяется метод расчета взаимодействующих ЛС [22]. Этот метод позволяет определить постоянные и нестационарные составляющие силы и момента на ГВ в скорости в следе ГВ. Расчет каждого ГВ выполняется в поле скорости, полученном сложением неоднородности набегающего потока и поля скорости, индуцированного вторым

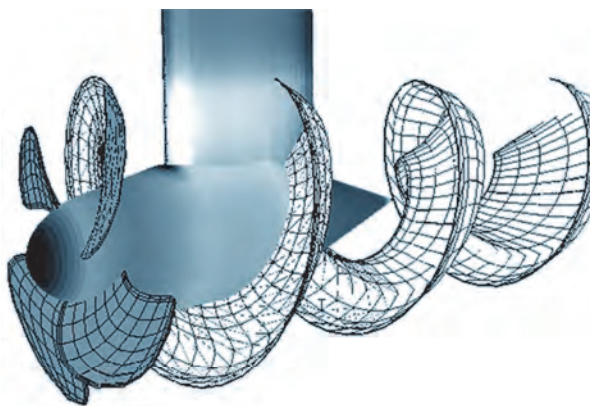


Рис. 4. Распределение скорости на поверхности ГВРК с учетом вихревого следа (расчет по ВЕМ-методу)

Fig. 4. Speed distribution on the surface of the main pod propulsion unit taking into account vortex shedding (BEM-based calculation)

ГВ. Сложение скоростей осуществляется с учетом величины и направления угла поворота колонки. Расчет поворотной колонки производится с помощью метода [45, 46].

Форма ПСВ за передним ГВ значительно скажывается на характеристиках движителя, поэтому для ее оценки используется упрощенная нелиней-

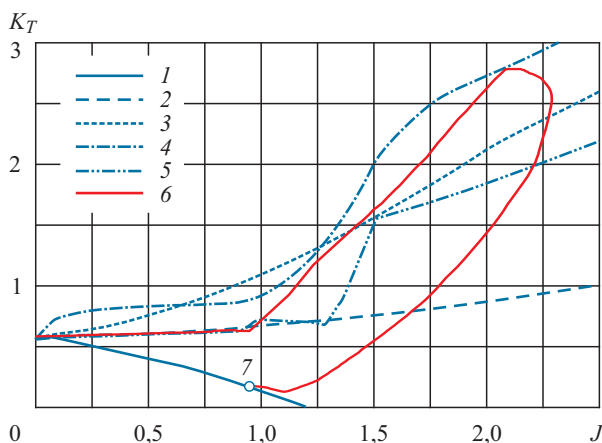


Рис. 5. Изменение режимов работы ВРК в процессе разворота колонки. Расчетные зависимости K_T при различных углах поворота: 1 – $\psi = 0^\circ$; 2 – $\psi = 60^\circ$; 3 – $\psi = 90^\circ$; 4 – $\psi = 120^\circ$; 5 – $\psi = 180^\circ$; 6 – режимы, проходимые в процессе реверсирования судна; 7 – проектный режим

Fig. 5. Changes in operational conditions of pod propulsion unit in the process of its turning. Analytical results for K_T at different turning angles:

1 – $\psi = 0^\circ$; 2 – $\psi = 60^\circ$; 3 – $\psi = 90^\circ$; 4 – $\psi = 120^\circ$; 5 – $\psi = 180^\circ$; 6 – crash-stop conditions; 7 – design conditions

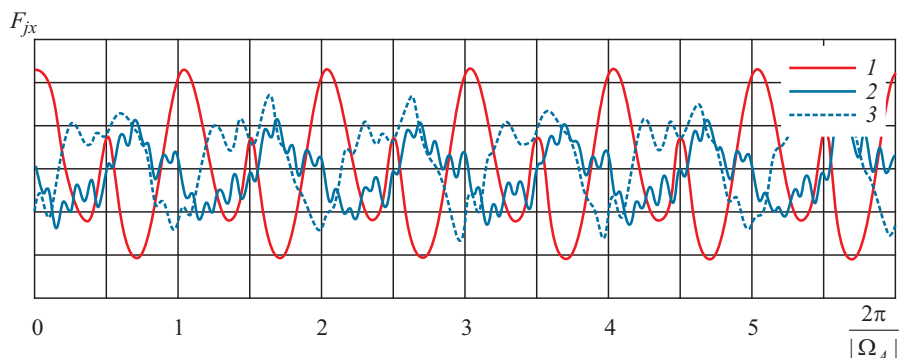


Рис. 6. Изменение продольной силы на лопасти во времени: 1 – одиночный ГВ; 2 – ГВ поворотной колонки, $\psi = 0^\circ$; 3 – ГВ поворотной колонки, $\psi = 15^\circ$

Fig. 6. Time history of longitudinal force on blade:

1 – solitary propeller;
 2 – PPU propeller, $\psi = 0^\circ$;
 3 – PPU propeller, $\psi = 15^\circ$

ная модель ПСВ [21]. Вызванные ГВ скорости определяются в рамках идеальной жидкости, но скорость в следе ГВ вычисляется с учетом вязких следов за его лопастями.

Численные исследования работы CRPOD позволили выявить и объяснить особенности его силовых характеристик [22]. Основные результаты исследования силовых характеристик состоят в следующем:

1. Работа ГВ в нестационарном поле скоростей приводит к изменению амплитуд и спектрального состава пульсаций сил на лопасти ГВ (рис. 6) и ГВ в целом по сравнению с традиционным ГВ.
2. Поворот колонки служит причиной резкого изменения стационарных и нестационарных силовых характеристик. Это изменение зависит как от режима работы, так и от геометрических особенностей движительного комплекса.
3. Наличие неоднородности поля скорости приводит к несимметричности силовых характеристик при повороте на правый и левый борта.

Движители в насадке

Как уже говорилось, понятие движителя в насадке объединяет самые разные виды движителей. К данному разделу могут быть отнесены ГВ в пропульсивной насадке, ГВ в поворотной насадке, движитель насосного типа (pump-jet), легконагруженный водометный движитель и т.п.

В первую очередь следует отметить итерационный метод поверочного расчета движителей в насадке, который позволяет оценить нестационарные характеристики движителя. Данный расчетный метод [47] объединяет метод расчета обтекания осесимметричных тел, панельный метод для расчета обтекания стоек, расчет формы ПСВ; в качестве математической модели ГВ используется хорошо зарекомендовавший себя метод на базе теории несущей поверхности.

Кроме того, был создан метод расчета стационарных характеристик движителя в насадке, реализующий альтернативный подход [48]. К числу его составных элементов относятся методы поверочного расчета ГВ в насадке на базе вихревой теории и ВЕМ [25, 49], метод поверочного расчета ГВ в трубе [50], метод расчета насадки с учетом вязких эффектов [29]. Совокупность этих разработок позволила приступить к созданию метода комплексного проектирования ГВ в насадке.

Метод оптимизации движителя в насадке подробно изложен в [4, 51, 52]. Он включает оптимизацию ротора [53], статора и насадки [43]. Основные принципы оптимизации, изложенные выше, одинаковы для всех элементов движителя, но целевые функции и ограничения у них разные. Основные идеи оптимизации движителя в насадке представлены в [4]: проектирование ЛС не только на максимум КПД и отдаление кавитации, но и на заданное расположение кавитационной корзины, учет ограничений прочности лопастей в процессе их оптимизации, оптимизация неподвижных ЛС исходя из требования отсутствия закрутки потока за движителем [54], задание различных критериев оптимизации для разных участков поверхности насадки [43]. Проектирование движителя осуществляется итерационным путем, на каждом шаге которого последовательно проектируются все элементы. Для новой геометрии вращающейся ЛС проектируется соответствующий статор и определяется оптимальная форма насадки. В результате нескольких итераций процесс оптимизации движителя сходится к окончательному решению.

Разработанный метод используется для проектирования движителей RSN [4] и применяется при разработке легконагруженных водометных движителей (ЛВД) [15], которые относятся к движителям насосного типа [55]. ЛВД могут применяться на различных типах судов. Их отличительной особенностью является повышенный КПД по отношению

к традиционным водометным движителям [55]. Высокий КПД достигается за счет усовершенствованных профилей лопастей [56], оптимизированной по методу [43] и дополнительно усовершенствованной для работы в неоднородном потоке насадки [57], выбора формы центрального тела, обеспечивающей безотрывное обтекание [58].

Проектирование водометных движителей

Водометный движитель состоит из ряда элементов: водозаборника, водопроточной части канала, рабочего колеса и неподвижных ЛС, закручивающих или раскручивающих поток, сопла, реверсивно-рулевого устройства. Проектирование водометного движителя в общем случае может предполагать оптимизацию всех указанных элементов и их взаимное согласование [10]. Что касается оптимизации ЛС, то этот вопрос был рассмотрен выше, поскольку подход [51, 53] является универсальным для водометных движителей и движителей в насадке. В то же время каждый тип водометных движителей имеет отличия в форме водозаборника и водопроточной части. Оптимизация этих элементов рассмотрена ниже.

Водозаборники статического типа получили широкое распространение на скоростных водоизмещающих и глиссирующих судах (рис. 7). Характерной особенностью таких водозаборников является размещение всей проточной части внутри корпуса. Передняя кромка входного отверстия располагается обычно таким образом, чтобы обеспечить форму верхнего свода водовода, исключающую отрывы на нем при всех режимах движения судна. Форма задней «губы» должна обеспечивать отсутствие кавитации внутри трубы в процессе разгона судна и на корпусе за водозаборником на полном ходу [10].

Несмотря на то, что статический водозаборник не является новым решением, методы его оптимизации стали развиваться только в ходе разработки новых типов движителей. При выборе формы водозаборника обычно одновременно решаются две задачи: достижение требуемых кавитационных характеристик и обеспечение отсутствия отрыва потока. Применение методов численной оптимизации позволяет получать геометрию водозаборника, наиболее полно отвечающую этим требованиям, обеспечивающую характеристики движения судна и удовлетворяющую ограничениям геометрии его корпуса [40].

Решение задачи выбора формы стенок статического водозаборника можно выполнять отдельно для верхнего свода и задней «губы». Такой прием следует из особенностей компоновки статических водозаборников и допускает применение методов оптимизации в «плоской постановке» [40]. Правомерность этого подхода была подтверждена путем сопоставления с расчетами трехмерного течения в водозаборнике [59].

На рис. 7 представлены формы верхнего свода водозаборника и эпюры коэффициента давления при различной длине водозаборного отверстия. Видно, что с ростом длины отверстия область максимального разрежения расширяется, а величина разрежения уменьшается, что свидетельствует об улучшении кавитационных характеристик. При этом чем шире отверстие, тем более плавно изменяется давление и меньше положительный градиент давления в месте перехода к внутренней части канала, что обеспечивает безотрывный характер течения. Таким образом, можно определить наилучшую форму в рамках габаритных ограничений. Существенным является факт, что эта форма не может быть получена путем простого перемасштабирования на другую длину. Аналогичным образом оптимизируется и форма «губы».

К числу основных задач, решаемых при проектировании водозаборников динамического типа, от-

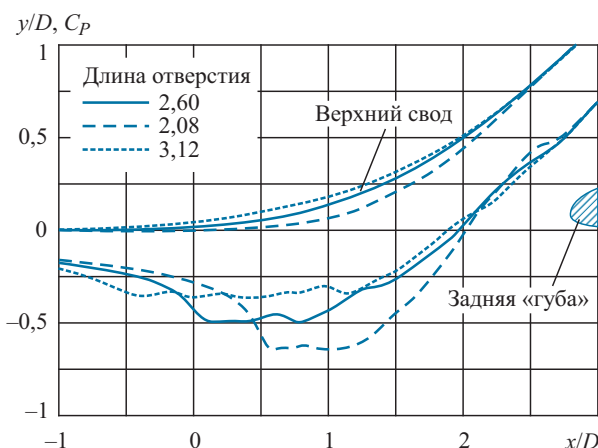


Рис. 7. Оптимальная геометрия водозаборника и распределение давления при различных длинах водозаборного отверстия. Отношение скорости в канале к скорости внешнего потока равно 0,7. D – диаметр канала

Fig. 7. Optimal geometry of water scoop and pressure distributions for various length of water inlet. The ratio between channel flow and external flow is 0,7; D – channel diameter

носятся профилировка осесимметричного входного отверстия и (при необходимости) определение формы изгиба канала. Оптимизация входного отверстия выполняется с помощью метода расчета осесимметричных тел [43]. Профилировку изгиба канала также можно осуществлять с помощью методов оптимизации. Примеры подобных расчетов представлены в [60]. Применение этих методов позволяет не только избежать отрывов потока, но и улучшить поле скорости на выходе из изгиба, что особенно важно, когда поток поступает в рабочее колесо.

В ряде случаев на судах применяются водозаборники компромиссного типа с короткой прямойлинейной проточной частью и полнонапорным водозабором, которые лишь частично заглубляются в корпус, а перед входом в водовод в днище формируется ниша. Для расчета течения в таком водомете [61] на участке с кольцевым элементом используется метод граничных интегральных уравнений (ВЕМ) [25] в модифицированном варианте [10]. При этом учитывается трехмерный характер течения и скос набегающего потока. Последнее является принципиальным, поскольку на различных скоростях хода судна имеет место натекание потока под различными углами.

Проектирование движителей с кольцевым приводом и других элементов подруливающего устройства

С точки зрения гидродинамики ЛС с кольцевым приводом имеет ряд преимуществ. В частности, лопастям такого движителя можно придать специальную форму, которая по сравнению с обычным ГВ позволяет в большей степени нагрузить концевые сечения и использовать более эффективные профили цилиндрических сечений лопастей [62]. Как показали первые попытки проектирования, стандартные методы проекторочного расчета ГВ мало подходят для движителей с кольцевым приводом. В этой ситуации проявляют себя методы прямой оптимизации. Их применение позволяет раскрыть преимущества движителя с кольцевым приводом. Например, в [63] в результате проектирования движителя с концевым приводом в трубе было получено увеличение тяги движителя на 17 %.

При проектировании движителей с кольцевым приводом необходимо учитывать упрочнение лопастей за счет их концевой заделки [62]. Это позволяет выбрать гидродинамически более эффективную форму лопасти и повысить КПД, одновременно отодвинув момент начала кавитации [62]. Указанные

эффекты достигаются при переходе к новой, не характерной для обычных ГВ форме лопастей.

Помимо отработки ЛС, в том числе в варианте движителя с концевым приводом [64], для ПУ важной является задача профилировки входа в канал [65]. В перспективе для ее решения целесообразно использовать представленные выше методы, а также определять взаимодействие движителя с корпусом [66].

Заключение

Conclusion

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

1. Разработка и внедрение на практике движителей новых типов невозможны без создания специальных методов проектирования, включающих математические модели и методы оптимизации.
2. На протяжении последних лет в КГНЦ были разработаны математические модели, созданы методы оптимизации и выполнены исследования с целью решения научных проблем, связанных с разработкой движителей новых типов.
3. Созданные комплексы расчетных методов были применены при проектировании ГВ для ВРК, движителя CRPOD, ряда движителей в насадке, водометных движителей различных типов, ПУ с концевым приводом. Ряд этих разработок нашел реальное воплощение на практике.

Библиографический список

1. Капранцев С.В., Пустошный А.В., Фролова И.Г. Практическое проектирование гребных винтов пассажирских судов // Тезисы докладов XXXVIII Крыловских чтений. 1997. С. 60–61.
2. Пустошный А.В. Проблемы ходкости транспортных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016.
3. Bushkovsky V.A., Frolova I.G., Kaprantsev S.V., Pustoshny A.V., Vasiljev A.V., Jakovlev A.J., Veikonheimo T. On the design a shafted propeller plus electric thruster contra-rotating propulsion complex // Proceedings First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion (T-POD). Newcastle, UK. April 14–16, 2004. P. 247–261.
4. Marinich N.V., Yakovlev A.Yu., Ovchinnikov N.A., Veikonheimo T. Multicomponent design of rotor-stator-nozzle (RSN) propulsor on azipods // VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017. Nantes, France, May 15–17, 2017. VII International. P. 496–507.

5. *Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители. Учебник. Л.: Судостроение, 1988.
6. *Бавин В.Ф., Завадовский Н.Ю., Левковский Ю.Л., Мишкевич В.Г.* Гребные винты. Современные методы расчета. Л.: Судостроение, 1983.
7. *Ачкинадзе А.Ш., Красильников В.И.* «RSPD-98» – программа проектировочного расчета гребного винта с использованием нелинейной теории несущей поверхности // Тезисы докладов XXXIX Крыловских чтений. 1999. С. 48–49.
8. *Ачкинадзе А.Ш., Красильников В.И., Степанов И.Э.* «SPA-2000» – программа поверочного расчета гребного винта в неравномерном поле скоростей усовершенствованным панельным методом // Тезисы докладов XL Крыловских чтений. 2001. С. 63–65.
9. *Мавлюдов М.А., Яковлева О.В.* и др. Методы исследования и отработки водометных движителей и создание новых конструкций движителей // FAST-2005. 2005.
10. *Лобачев М.П., Русецкий А.А., Яковлев А.Ю.* Проектирование и гидродинамический расчет водометных движителей. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014.
11. *Мавлюдов М.А., Яковлева О.В., Кортупова Е.Л., Салазкин И.В.* Технические основы разработки малогабаритного водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 77–88.
12. *Мавлюдов М.А., Яковлева О.В.* Новые модификации МГВД // Катера и яхты. Январь–март 2009. № 3(219). С. 97–99.
13. Патент РФ № 2205774 «Водометный движительно-рулевой комплекс». *Мавлюдов М.А., Пашин В.М., Пустошный А.В., Яковлева О.В., Данилов Е.В., Калистратов Н.Я., Штефан В.В.* Приоритет от 10.06.2003.
14. Патент РФ № 2096258 «Водометный движитель». *Ибрагимова Т.Б., Мавлюдов М.А., Овсиенко Е.И., Садовников Ю.М., Салазкин И.В.* Приоритет от 27.06.95.
15. Патент № 2537351 «Легконагруженный водометный движитель» (Заявка № 2013121166 от 7 мая 2013 г.). *Александров С.А., Каневский Г.И., Капранцев С.В., Пустошный А.В.* 2013.
16. *Родионов В.А., Шевцов С.П.* Экспериментальное исследование тяговых, пропульсивных и кавитационных характеристик водометного движителя на подвесном моторе // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 89–98.
17. Патент на изобретение № 2585207 «Водометный двигатель-двигательный комплекс». *Бушковский В.А., Яковлев А.Ю., Маринич Н.В.* Приоритет от 22.12.14. Дата регистрации 29.04.16.
18. *Яковлев А.Ю.* Создание системы расчетных методов для проектирования новых типов движительных комплексов современных судов. Дис. ... д.т.н. СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова», 2007. 315 с.
19. *Яковлев А.Ю.* Расчет изменения формы вихревых пелен в следе гребного винта // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. Вып. 31(315). С. 55–68.
20. *Мухина Л.А., Яковлев А.Ю.* Применение теории вихревой поверхности к расчету поля скорости и формы вихревых пелен за работающим гребным винтом // Четвертые Поляховские чтения. Избранные труды. 2006. С. 384–393.
21. *Boushkovsky V.A., Moukhina L.A., Yakovlev A.Yu.* Computation of propeller wake on podded propulsors of fast ships // Proceedings of the 8th International Conference on Fast Sea Transportation. Saint-Petersburg, Russia, June 27–30, 2005.
22. *Яковлев А.Ю.* Метод расчета и численное исследование движителей с гребными винтами противоположного вращения // Судостроение. 2008. № 2. С. 32–35.
23. *Мухина Л.А.* Гидродинамический расчет гребного винта на персональном компьютере // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1998. Вып. 7(291). С. 30–32.
24. *Яковлев А.Ю.* О частотах пульсаций сил на взаимодействующих гребных винтах // Морской вестник. 2003. № 4(8). С. 69–74.
25. *Бушковский В.А., Яковлев А.Ю.* Метод граничных элементов для расчета обтекания тел, имеющих осевую симметрию // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 36(321). С. 187–200.
26. *Бушковский В.А., Яковлев А.Ю.* Расчетное определение гидродинамических характеристик движительного комплекса «винт в насадке» // Вторая международная конференция по судостроению (ISC'98). Том В. 1998.
27. *Yakovlev A.Yu.* Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions // Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09. Royal Garden Hotel, Trondheim, Norway, June 22–24, 2009.
28. *Маринич Н.В., Калюжный В.Г.* Расчет отрывного обтекания элементов движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 41–50.
29. *Маринич Н.В.* Обтекание элементов движителя турбулентным потоком с учетом отрывных явлений // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012). Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2012. С. 249–251.
30. *Маринич Н.В.* Определение коэффициентов взаимодействия гребного винта с гондолой // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 39–46.

31. Бискуп Б.А., Терлецкий Б.М., Никитин М.Н., Попов С.И. Прочность гребных винтов. Л.: Судостроение, 1973.
32. Бискуп Б.А., Бушковский В.А. Оценка прочности гребных винтов с откидкой контура лопасти на режимах реверса // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1998. Вып. 8(292). С. 60–67.
33. Яковлев А.Ю., Васильев Ю.М. Метод расчета экстренного торможения судна с помощью нескольких движителей различных типов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 27–38.
34. Яковлев А.Ю., Колосова Е.А., Софьина Л.Ю. Численное исследование гидродинамических характеристик движителей, обусловленных маневрированием судна в условиях воздействия природных факторов // Материалы International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE-2016. СПб., 6–8 июня 2016.
35. Яковлев А.Ю., Коваль А.А. Новые исследования кавитации гребных винтов. По материалам симпозиума SPM'09 // Судостроение. 2010. № 2. С. 12–14.
36. Пустошный А.В., Коваль А.А. Исследование влияния параметров функций давления на широкополосный спектр // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2013. Вып. 73(357). С. 121–132.
37. Пустошный А.В., Коваль А.А. Метод оценки широкополосных пульсаций давления кавитирующего гребного винта // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2013. Вып. 73(357). С. 133–146.
38. Дарчиев Г.К., Пустошный А.В., Фролова И.Г., Орлов П.М. Анализ влияния шероховатости входящей кромки профилей на структуру потока // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1(383). С. 60–66.
39. Яковлев А.Ю. Метод граничных интегральных уравнений высокого порядка для расчета обтекания элементов движителей // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. Вып. 31(315). С. 42–54.
40. Яковлев А.Ю. Оптимизация формы «плоского» водозаборника // Наука и технологии. Труды XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы. М.: РАН, 2010. С. 65–73.
41. Яковлев А.Ю. Параллельная реализация методов проектирования элементов судовых движителей // Материалы VII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС'2011. Алушта, 25–31 мая 2011. С. 265–267.
42. Alexey Yu. Yakovlev, Anna G. Lobova, Nikolay Vi. Marinich. The Method of flowing surface optimization based on BEM calculation and its practical application // 10th International Conference on Hydrodynamics. St. Petersburg, Russia, October 1–4, 2012. P. 25–32.
43. Маринич Н.В. Оптимизация формы направляющей насадки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 51–62.
44. Полтавец П.А., Капранцев С.В., Чичерин И.А., Андреев В.А. Результаты испытаний макета винторулевой колонки при различных углах ее поворота // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 103–108.
45. Яковлев А.Ю., Коваль А.А., Маринич Н.В. Расчет гидродинамических характеристик тянущей винторулевой колонки // Тезисы докладов. Всероссийский семинар по аэрогидродинамике, посвященный 90-летию со дня рождения С.В. Валландера. 5–7 февраля 2008, СПб., СПбГУ.
46. Яковлев А.Ю. Расчет стационарных гидродинамических характеристик тянущей винторулевой колонки // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 35(320). С. 96–110.
47. Boushkovsky V., Yakovlev A. Unsteady forces induced by ducted propellers // SP 2001: Lavrentiev Lectures. 19–21 June 2001.
48. Маринич Н.В. Проектирование перспективных движителей в насадке с учетом их взаимодействия с поворотной колонкой и элементами корпуса судна. Автореферат дис. ... к.т.н. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. 27 с.
49. Яковлев А.Ю. Определение пропульсивных характеристик движительного комплекса ГВ в насадке с использованием модели идеального движителя // Сборнике докладов семинара ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПбГМТУ и НТО им. акад. А.Н. Крылова для молодых специалистов, аспирантов и студентов. 1998. Вып. 1. С. 17–32.
50. Васильев А.В., Яковлев А.Ю. Расчетный метод оценки гидродинамических характеристик осевых насосов // Тезисы докладов XL Крыловских чтений, 2001.
51. Маринич Н.В. Проектирование водометных движителей с двухступенчатой лопастной системой // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2017. № 3(381). С. 43–49.
52. Маринич Н.В. Проектирование движителя с насадкой // Тезисы докладов XLV Крыловских чтений. 2013. С. 49–51.
53. Яковлев А.Ю. Проектировочный расчет лопастных систем путем прямой оптимизации // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 35(320). С. 111–121.
54. Маринич Н.В., Овчинников Н.А. Метод повышения КПД двухступенчатого движителя в насадке путем минимизации потерь на закрутку струи / Российское кораблестроение: от академика А.Н. Крылова до наших дней. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014.

55. Александров С.А. Исследование гидродинамических и кавитационных характеристик водометного движителя насосного типа, направленное на совершенствование его элементов. Автореферат дис. ... к.т.н. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2018.
56. Александров С.А. Совершенствование сечения лопастей водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). 2017. С. 9–14.
57. Александров С.А. Совершенствование профиля насадки водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). 2017. С. 40–45.
58. Александров С.А., Каневский Г.И. Оптимизация элементов водометного движителя насосного типа с коротким водоводом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 11–18.
59. Яковлев А.Ю., Лобова А.Г. Расчет течения в водозаборнике водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 63–76.
60. Яковлев А.Ю., Лобова А.Г. Профилирование поворотного колена водометного движителя в «плоской» постановке // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 56(340). С. 195–210.
61. Лобова А.Г., Яковлева О.В., Яковлев А.Ю. Проектирование водометных движителей с использованием численной оптимизации водозаборников // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 94(378). С. 9–20.
62. Яковлев А.Ю., Соколов М.А., Маринич Н.В. Численное проектирование и экспериментальная проверка подруливающего устройства с кольцевым приводом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 17–32.
63. Боруевич В.О., Яковлев А.Ю. Особенности проектирования и управления работой движителей морских роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1(195) Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». С. 179–193.
64. Яковлев А.Ю., Маринич Н.В., Шевцов С.П. Направление и способы гидродинамического совершенствования движительных комплексов подводных аппаратов и роботов // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2017). Москва, 16–18 мая 2017. С. 202–205.
65. Ермолаев А.А., Сайфуллин Т.И., Шевцов С.П. Расчетная оценка влияния оформления входа в канал подруливающего устройства на величину силы, возникающей на борту // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 88(372). С. 109–116.
66. Шевцов С.П. Методы оценки попутного потока при расчете водометных движителей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2012. Вып. 69(353). С. 93–96.

References

1. Kaprantsev S., Pustoshny A., Frolova I. Practical propeller design for passenger ships // Theses of messages, 28th Krylov Readings, 1997. P. 60–61 (in Russian).
2. Pustoshny A. Propulsion performance of carrier ships. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2016 (in Russian).
3. Bushkovsky V.A., Frolova I.G., Kaprantsev S.V., Pustoshny A.V., Vasiljev A.V., Jakovlev A.J., Veikonheimo T. On the design a shafted propeller plus electric thruster contra-rotating propulsion complex // Proceedings First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion (T-POD). Newcastle, UK. April 14–16, 2004. P. 247–261.
4. Marinich N.V., Yakovlev A.Yu., Ovchinnikov N.A., Veikonheimo T. Multicomponent design of rotor-stator-nozzle (RSN) propulsor on azipods // VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017. Nantes, France, May 15–17, 2017. VII International. P. 496–507.
5. Artyushkov L., Achkinadze A., Rusetsky A. Marine propulsors. Textbook. Leningrad, Sudostroyeniye, 1988 (in Russian).
6. Bavin V., Zavadovsky N., Levrovsky Yu., Mischkevich V. Propellers. Modern methods of calculations. Leningrad, Sudostroyeniye, 1983 (in Russian).
7. Achkinadze A., Krasilnikov V. RSPD-98 propeller design software based on non-linear lifting-plane theory // Theses of messages, 39th Krylov Readings, 1999. P. 48–49 (in Russian).
8. Achkinadze A., Krasilnikov V., Stepanov I. SPA 2000 software for verification calculations of propellers in non-uniform wake field by means of improved panel method // Theses of messages, 40th Krylov Readings, 2001. P. 63–65 (in Russian).
9. Mavlyudov M., Rusetsky A., Yakovleva O. et al. Research and improvement methods for waterjets and development of new propulsor designs // FAST-2005 conference, 2005 (in Russian).
10. Lobachev M., Rusetsky A., Yakovlev A. Design and hydrodynamic calculation of waterjets. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2014 (in Russian).
11. Mavlyudov M., Yakovleva O., Kortunov E., Salazkin I. Engineering principles for development of small-size waterjet. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 73(357). P. 77–88 (in Russian).

12. *Mavlyudov M., Yakovleva O.* New modifications of small-size waterjets // *Katera i yakhty (Power & Sail Boats)*. January – March 2009. No. 3(219). P. 97–99 (*in Russian*).
13. Russian Patent No. 2205774 Waterjet propulsion system. *Mavlyudov M., Pashin V., Pustoshny A., Yakovleva O., Danilov Ye., Kalistratov N., Shtefan V.* Priority date 10.06.2003 (*in Russian*).
14. Russian Patent No. 2096258 Waterjet propulsor. *Ibragimova T., Mavlyudov M., Ovsienko Ye., Sadovnikov Yu., Salazkin I.* Priority date 27.06.95 (*in Russian*).
15. Patent No. 2537351 (Request No. 2013121166 dt. May 7, 2013). *Alexandrov S., Kanevsky G., Kaprantsev S., Pustoshny A.* 2013 (*in Russian*).
16. *Rodionov V., Shevtsov S.* Experimental investigation of thrust, propulsion and cavitation performance of waterjet with outboard motor // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2013. Issue 73(357). P. 89–98 (*in Russian*).
17. Patent for Invention No. 2585207 Waterjet engine & propulsion system. *Bushkovsky V., Yakovlev A., Marinich N.* Priority date 22.12.14. Registration date 29.04.16 (*in Russian*).
18. *Yakovlev A.* Development of a system of calculation methods to design innovative propulsion systems for modern ships. Doctoral Theses. St. Petersburg, 2007 (*in Russian*).
19. *Yakovlev A.* Shape change calculation for vortex planes in propeller wake // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2007. Issue 31(315). P. 55–68 (*in Russian*).
20. *Mukhina L., Yakovlev A.* Applying vortex surface theory to shape and wake field calculations for vortex planes behind operating propeller // 4th Polyakhov Readings. Selected papers. 2006. P. 384–393 (*in Russian*).
21. Proceedings of the 8th International Conference on Fast Sea Transportation. Saint-Petersburg, Russia, June 27–30, 2005.
22. *Yakovlev A.* Calculation method and numerical study of propulsors with contra-rotating propellers // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2008. No. 2. P. 32–35 (*in Russian*).
23. *Mukhina L.* Hydrodynamic propeller calculation on personal computer // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 1998. Issue 7(291). P. 30–32 (*in Russian*).
24. *Yakovlev A.* On force pulse frequencies on interacting propellers // *Morskoy Vestnik*. 2003. No. 4(8). P. 69–74 (*in Russian*).
25. *Bushkovsky V., Yakovlev A.* Boundary element method in flow calculation of axially symmetric bodies // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2008. Issue 36(321). P. 187–200 (*in Russian*).
26. *Bushkovsky V., Yakovlev A.* Hydrodynamic calculations of nozzled propellers // *International Shipbuilding Conference ISC-98, Vol. B (in Russian)*.
27. *Yakovlev A.Yu.* Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions // *Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09*. Royal Garden Hotel, Trondheim, Norway, June 22–24, 2009.
28. *Marinich N., Kalyuzhny V.* Calculation of separation-free flow conditions for propulsor elements // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2013. Issue 73(357). P. 41–50 (*in Russian*).
29. *Marinich N.* Investigation of turbulent flow around propulsor elements taking into account flow separations // *Materials of the 9th International Conference on Non-equilibrium Processes in Nozzles and Jets (NPNJ 2012)*, Alushta. Moscow, Publishing House of Moscow Aviation Institute, 2012. P. 249–251 (*in Russian*).
30. *Marinich N.* Determination of propeller – thruster body interaction factors // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2012. Issue 69(353). P. 39–46 (*in Russian*).
31. *Biskup B., Terletsky B., Nikitin M., Popov S.* Strength of propellers. Leningrad, Sudostroyeniye, 1973 (*in Russian*).
32. *Biskup B., Bushkovsky V.* Strength assessment of skewed propellers in crash-stop condition // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 1998. Issue 8(292). P. 60–67 (*in Russian*).
33. *Yakovlev A., Vasilyev Yu.* Crash-stop calculation method for ship with several different propulsors // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. Issue 90(374). P. 27–38 (*in Russian*).
34. *Yakovlev A., Kolosova Ye., Sofyina L.* Numerical study on hydrodynamic parameters of propulsors due to ship maneuvers under effect of weather factors // *Materials of International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering (NAOE-2016)*. St. Petersburg, June 6–8, 2016 (*in Russian*).
35. *Yakovlev A., Koval A.* New studies in propeller cavitation. As per materials of SPM'09 Symposium // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2010. No. 2. P. 12–14 (*in Russian*).
36. *Pustoshny A., Koval A.* Studies of the effect of pressure function parameters on the broadband spectrum // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2013. Issue 73(357). P. 121–132 (*in Russian*).
37. *Pustoshny A., Koval A.* A method to evaluate broadband pressure fluctuations for the cavitating propeller // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2013. Issue 73(357). P. 133–146 (*in Russian*).
38. *Darchiev G., Pustoshny A., Frolova I., Orlov P.* Leading edge roughness effect of blade profiles upon flow

- structure // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 1(383). P. 60–66 (*in Russian*).
39. Yakovlev A. Method of high-order boundary integral equations for flow calculation of propulsor elements // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2007. Issue 31(315). P. 42–54 (*in Russian*).
 40. Yakovlev A. Shape optimization for “flat” water scoop // Science and technologies. Transactions of the 30th Russian School dedicated to the 65th Anniversary of Victory in WWII. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2010. P. 65–73 (*in Russian*).
 41. Yakovlev A. Parallel implementation of design methods for marine propulsor elements // Materials of the 7th International conference on Computational Mechanics and Modern Software Applications. Alushta, May 25–31, 2011. P. 265–267 (*in Russian*).
 42. Alexey Yu. Yakovlev, Anna G. Lobova, Nikolay V. Marinich. The Method of flowing surface optimization based on BEM calculation and its practical application // 10th International Conference on Hydrodynamics. St. Petersburg, Russia, October 1–4, 2012. P. 25–32.
 43. Marinich N. Shape optimization of propeller duct // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 73(357). P. 51–62 (*in Russian*).
 44. Poltavets P., Kaprantsev S., Chicherin I., Andreev V. Model test results for a pod propulsor at different turning angles // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 90(374). P. 103–108 (*in Russian*).
 45. Yakovlev A., Koval A., Marinich N. Hydrodynamic calculation of pulling pod propulsion unit // Theses of messages. All-Russia Seminar on Aerohydrodynamics dedicated to the 90th Anniversary of S. Vallander. February 5–7, 2008. St. Petersburg State University (*in Russian*).
 46. Yakovlev A. Calculation of steady hydrodynamic parameters for pulling pod propulsion unit // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2008. Issue 35(320). P. 96–110 (*in Russian*).
 47. Boushkovsky V., Yakovlev A. Unsteady forces induced by ducted propellers // SP 2001: Lavrentiev Lectures. 19–21 June 2001.
 48. Marinich N. Design of advanced nozzled propulsors taking into account their interaction with azimuthal thruster and hull elements. Autoabstract of Cand.Sc. Theses. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2013. 27 pp. (*in Russian*).
 49. Yakovlev A. Determination of propulsion performance for nozzled propeller using a model of perfect propulsor // Compendium of Papers, Seminar of Krylov State Research Institute, SMTU and Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders for young engineers, post-graduates and students. 1998. Issue 1 (*in Russian*).
 50. Vasilyev A., Yakovlev A. Calculation method for hydrodynamic load assessment of axial pumps // XLth Krylov Readings. Theses of messages. 2001 (*in Russian*).
 51. Marinich N. Design of waterjets with two-staged blade system // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2017. No. 3(381). P. 43–49 (*in Russian*).
 52. Marinich N. Design of nozzled propulsor // XLVth Krylov Readings. Theses of messages. 2013. P. 49–51 (*in Russian*).
 53. Yakovlev A. Design calculation of blade systems through direct optimization // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2008. Issue 35(320). P. 111–121 (*in Russian*).
 54. Marinich N., Ovchinnikov N. A method to improve efficiency of two-stage nozzled propulsor by mitigation of losses due to wake turbulization / Russian shipbuilding: from Academician Krylov to our days. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2014 (*in Russian*).
 55. Alexandrov S. Hydrodynamic and cavitation study of pumpjet in order to improve its elements. Auto-abstract of Cand.Sc. Theses. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2018 (*in Russian*).
 56. Alexandrov S. Improving waterjet blade sections // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Issue 3(381). 2017. P. 9–14 (*in Russian*).
 57. Alexandrov S. Nozzle jet improvement for waterjet propulsor // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 40–45 (*in Russian*).
 58. Aleksandrov S., Kanevsky G. Optimization of components for a pumpjet with short water duct // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 90(374). P. 11–18 (*in Russian*).
 59. Yakovlev A., Lobova A. Flow computation for waterjet inlet // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 73(357). P. 63–76 (*in Russian*).
 60. Yakovlev A., Lobova A. Turning elbow profiling for waterjet: “plane” formulation // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2010. Issue 56(340). P. 195–210 (*in Russian*).
 61. Lobova A., Yakovleva O., Yakovlev A. Design of waterjets with numerical optimization of water intakes // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016. Issue 94(378). P. 9–20 (*in Russian*).
 62. Yakovlev A., Sokolov M., Marinich N. Numerical design and experimental verification of thruster with circumferential drive // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 73(357). P. 17–32 (*in Russian*).
 63. Borusevich V., Yakovlev A. Propulsors of marine robots: design and control specifics // Izvestiya SFedU.

- Engineering Sciences. 2018. No. 1(195). Topical issue Advanced control tasks and systems. P. 179–193 (*in Russian*).
64. *Yakovlev A., Marinich N., Shevtsov S.* Hydrodynamic improvement of propulsion systems for subsea vehicles and robots: approaches and methods // Materials of the XVth All-Russian Scientific and Technical Conference Advanced methods and tools of ocean studies. Moscow, May 16–18, 2017. P. 202–205 (*in Russian*).
65. *Yermolaev A., Saifullin T., Shevtsov S.* Effect of the thruster inlet configuration upon the force arising on the side // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 88(372). P. 109–116 (*in Russian*).
66. *Shevtsov S.* Wake assessment methods in calculation of waterjet propulsors // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2012. Issue 69(353). P. 93–96 (*in Russian*).

Сведения об авторе

Яковлев Алексей Юрьевич, д.т.н., профессор, заместитель начальника отделения – начальник отдела управления проектами ФГУП «Крыловский государственный научный центр», и.о. заведующего кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики СПбГМТУ. Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the author

Alexey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Head of Division – Head of Project Management Department, Krylov State Research Centre; Acting Head of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics Department, St. Petersburg State Maritime University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 18.10.18
Принята в печать / Accepted: 01.02.19
© Яковлев А.Ю., 2019