DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-28-40
УДК 629.51/58.001.573

А.Е. Таранов, Т.И. Сайфуллин, А.А. Рудниченко, С.В. Егоров
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

Объект и цель научной работы. Целью работы является анализ особенностей применения численного моделирования в процессах проектирования объектов морской техники и демонстрация ключевых моментов, отвечающих за достоверность результатов моделирования.
Материалы и методы. Рассмотренные примеры базируются на использовании методов вычислительной гидродинамики. Характеристики течения вязкой жидкости находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых моделью турбулентности.
Основные результаты. Работы ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по внедрению технологий численного моделирования в процесс проектирования объектов морской техники показали, что эти технологии существенно помогают в решении актуальных задач проектирования и модернизации высокотехнологичных изделий, успешно конкурируя с физическим моделированием, а иногда представляют собой единственный способ решения поставленной задачи. Однако, как показано на примерах в данной статье, подходить к численному моделированию физических процессов и явлений нужно не менее вдумчиво и аккуратно, чем к физическому моделированию, чтобы не получить ошибочных результатов и их последствий в проектных решениях.
Заключение. Современный уровень развития вычислительной техники и технологий численного моделирования позволяет сократить объем физических экспериментальных исследований, а в тех случаях, когда эксперимент попрежнему необходим, существенно его дополнить. В настоящее время переход к технологиям цифрового производства является ведущим трендом мировой экономики и эти технологии должны найти отражение в концепциях и планах развития предприятий судостроительной отрасли.
Ключевые слова: численное моделирование, физическое моделирование, валидация, расчетная схема.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-28-40
UDC 629.51/58.001.573

A. Taranov, T. Sayfullin, A. Rudnichenko, S. Egorov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

APPLICATION SPECIFICS OF NUMERICAL SIMULATION IN DESIGN OF MARINE STRUCTURES

Object and purpose of research. The purpose of this work is to analyze application specifics of numerical simulation in design of marine structures, as well as to demonstrate key points in reliability of simulation results.
Materials and methods. The examples discussed in this paper are based on CFD methods. Viscous flow parameters are obtained through unsteady Reynolds equations closed by turbulence model and solved by the finite volume method.
Main results. KSRC activities in introduction of numerical simulation technologies to design of marine structures have shown that these technologies are quite helpful in solving current challenges in design and upgrade of high-tech assets, being successful rivals of physical modeling and sometimes the only way to solve the problem. However, as demonstrated by case studies discussed in this paper, numerical simulation of physical processes and phenomena must be addressed as thoroughly and thoughtfully as physical modeling, to avoid making errors and facing their outcomes in design solutions.

Для цитирования: Таранов А.Е., Сайфуллин Т.И., Рудниченко А.А., Егоров С.В. Особенности использования численного моделирования при проектировании объектов морской техники. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 28–40.
For citations: Taranov A., Sayfullin T., Rudnichenko A., Egorov S. Application specifics of numerical simulation in design of marine structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 28–40 (in Russian).

Conclusion. State-of-the-art computers and numerical simulation technologies can reduce the scope of physical experiments and if these are absolutely necessary, considerably supplement them. Today, transition to digital production technologies is a global trend, so these technologies must be taken into account in development plans and concepts of shipbuilding enterprises.
Keywords: numerical simulation, physical modeling, validation, analytical layout.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

В соответствии с поручениями Президента Российской Федерации утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации». С учетом этого государственного вектора, а также с опорой на требования об обязательном использовании численного моделирования при разработке проектов высокотехнологичной техники ФГУП «Крыловский государственный научный центр» систематизирует и наращивает свои компетенции в этой области. Благоприятными обстоятельствами для постепенного перехода судостроительной науки к численному моделированию различного типа (ситуационное моделирование, имитационное моделирование, моделирование физических процессов, проведение виртуальных испытаний) являются:

- наличие в Крыловском государственном научном центре наработанных методик расчетов в различных областях судостроительной науки и уникального кадрового состава – носителей методик проведения физического эксперимента на объектах экспериментальной базы центра по всем отраслевым типам задач;
- наличие в Крыловском государственном научном центре команды с многолетним опытом в области высокопроизводительных вычислений;
- территориальная близость квалифицированного персонала, суперкомпьютера и объектов экспериментальной базы Крыловского центра, позволяющая обеспечивать рациональное сочетание физического и виртуального экспериментов с точки зрения повышения точности и корректности результатов расчетов, сроков исполнения работ, а также дающая возможность проводить детальную и достоверную верификацию[1] и валидацию[2] разрабатываемых моделей и методик для дальнейшего развития направления в интересах отрасли и ОПК.

[1] Подтверждение корректности решения уравнений математической модели (ГОСТ Р 57188-2016).

[2] Подтверждение адекватности математической модели моделируемому объекту (ГОСТ Р 57188-2016).

Место и задачи численного моделирования физических процессов в судостроении

Role and tasks of numerical simulation in shipbuilding

Замена физического эксперимента на численное моделирование происходит не одномоментно, это достаточно длительный процесс, который характеризуется совместным использованием физического и численного моделирования (рис. 1, см. вклейку). Необходимо подчеркнуть, что судостроительная промышленность отличается высокой степенью консервативности и низкой стоимостью физических экспериментов [1]. Эти факторы должны быть приняты во внимание при оценке длительности переходного периода. Кроме того, они объясняют нелинейный характер процесса перехода от физического эксперимента к численному. Следует добавить, что по экспертным оценкам, в том числе в смежных отраслях промышленности, полного вытеснения физического эксперимента не будет даже в долгосрочной перспективе. Речь идет скорее о замене большей его части на численное моделирование физических процессов и явлений.

Увеличение объема численного моделирования в ходе разработки и модернизации высокотехнологичных объектов морской техники (МТ) зависит от целого ряда сдерживающих факторов, преодоление которых является достаточно длительным процессом. К ним относится в первую очередь необходимость создания научно-технического задела – разработка технологий численного моделирования конкретных физических процессов (явлений) или классов объектов. Аналогичная работа в области физического моделирования выполнялась в отрасли в 50-е и 60-е гг. XX века [2]. Следующий, к счастью, успешно решаемый ведущими вузами страны, вопрос связан с подготовкой кадров. Здесь важно отметить, что, несмотря на интен-

сивное внедрение программ обучения по профилю [3, 4], послевузовская подготовка специалиста в области численного моделирования физических процессов в судостроении занимает еще 3–5 лет. Переход к численному моделированию также требует дешевых и доступных высокопроизводительных ресурсов и развития программного обеспечения, в том числе отечественного, реализующего современные численные методы и модели. Особым по важности и сложности решения является вопрос создания нормативно-правовой базы, включающий в себя такие аспекты, как сертификация используемого программного обеспечения, аккредитация вычислительных лабораторий, признание результатов виртуальных испытаний наравне с реальными (физическими).

Несмотря на приведенные выше сложности внедрения, использование численного моделирования в судостроении (в частности в Крыловском центре) позволит повысить качество проектируемых объектов МТ за счет автоматизации и оптимизации исследовательских и проектных процессов. Снизится доля физического эксперимента на ранних этапах создания объектов МТ с возможностью увеличения необходимого количества исследований в обеспечение прорывных характеристик объектов МТ, а также уменьшатся риски утраты компетенций и знаний по направлениям из-за кадровых или инфраструктурных потерь за счет цифровизации базы знаний. Кроме того, логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта.

Наибольший эффект от численного моделирования может быть достигнут на ранних стадиях проектирования. Это сокращение объема физического эксперимента за счет предварительной отработки (перебора ограниченного количества вариантов) или многокритериальной оптимизации (с использованием алгоритмов поиска оптимума целевой функции) формы объекта. Быстрое численное моделирование помогает сделать предварительный выбор параметров физического эксперимента, либо, наоборот, проводится детальное численное моделирование ограниченного количества режимов, выбранных на основании быстрого и дешевого физического эксперимента. Например, численное моделирование распространения выхлопных газов над палубой судна натурных размеров с учетом реальных термодинамических свойств среды выполняется после определения в аэродинамической трубе зоны критических курсовых углов.

Являясь де факто комплементарным механизмом познания, численное моделирование позволяет находить локальные и интегральные характеристики, которые невозможно получить в ходе физического эксперимента. Классическими примерами служат исследования, в которых необходимо получить нестационарные гидродинамические силы на элементах сложной конструкции (например, движительного комплекса), определение локальных характеристик полей в точках, где невозможно разместить физические датчики, и т.д. [5].

Следующим приложением для численного моделирования в судостроении, достойным отдельной статьи, является исследование масштабного эффекта. В ряде случаев достоверную информацию дает лишь использование суперкомпьютерной техники для оценки масштабного эффекта (после проведения соответствующих валидационных мероприятий). Как правило, здесь численное моделирование необходимо в случае исследования инновационных моделей (нетрадиционной архитектуры), для которых отсутствуют (или плохо развиты) эмпирические методики пересчета на натурные размеры и условия, либо в случае исследования уникальных по форме объектов (например, портовых акваторий (рис. 2, см. вклейку)). Возможность проведения прямого моделирования объектов натурных размеров, находящихся в натурных условиях, является неоспоримым преимуществом численного моделирования перед физическим.

Еще одной крупной областью применения численного моделирования являются виртуальные испытания объекта – численное моделирование, выполняющееся для строго заданных условий, с целью повышения информативности испытаний и замены наиболее дорогостоящих и опасных их видов численным экспериментом. Сюда можно отнести, например, подготовку стендовых испытаний (выбор безопасных параметров, определение поправочных функций при отклонении параметров стенда от расчетных и т.д.), эксперименты, которые в реальности могут закончиться разрушением физической модели или даже натурного объекта (виртуальный крэш-тест), испытания, связанные с применением экологически опасных веществ. В судостроении проведение виртуальных испытаний еще слабо развито, в первую очередь в связи с отсутствием нормативно-правовой базы, обеспечивающей одобрение заказчиком такого рода испытаний.

«Подводные камни» на пути разработки и внедрения технологий численного моделирования

"Snags" in development and introduction of numerical simulation technologies

Постоянный рост производительности вычислительной техники и развитие программного обеспечения в области компьютерного инжиниринга могут произвести впечатление легкости перехода к численному моделированию. Однако кроме трудоемкого процесса разработки технологий численного моделирования конкретных физических процессов или моделирования физических процессов для конкретных объектов и связанной с этим валидации, опирающейся на физический эксперимент, существует еще масса «подводных камней», с которыми приходится сталкиваться даже опытным специалистам.

Упрощенные подходы

Методы экономии вычислительных ресурсов, как правило, целенаправленно преподаются специалистам в области численного моделирования при их обучении. При этом редко обращается внимание на опасности чрезмерного упрощения решения задачи.

Сокращение размерности задачи (с трехмерной постановки до двумерной) бывает обоснованным для различных классов задач. Такого рода упрощение успешно применяется, например, в теории крыла. Однако использование этого метода не подходит для изучения более сложных явлений. Классическим примером является задача об обтекании кругового цилиндра, вихревой след за которым представляет собой сугубо трехмерную структуру даже при скоростях потока, соответствующих небольшим числам Рейнольдса. Решение данной задачи (а также аналогичных задач для плохообтекаемых тел) в двумерной постановке приводит к некорректному определению распределения давления и сопротивления тела [6]. Также некорректным оказывается предсказание кавитационных характеристик гребного винта, выполненное на основе анализа кавитационного обтекания профилей лопасти [7].

Очень привлекательным с точки зрения сокращения требуемых вычислительных ресурсов при численном моделировании движительных комплексов является подход, в котором при переходе от одной крыльевой системы (гребной винт, рабочее колесо, спрямляющий аппарат и т.д.) к другой производится осреднение параметров по окружному направлению. Поверхность (чаще всего плоскость), на которой проводится осреднение, именуется «плоскостью смешения». При этом оказывается достаточным использовать расчетные области, включающие только один межлопастной канал, накладывая условия вращательной периодичности, другими словами, уйти от 360-градусной модели к «секторной». Однако очевидно, что при использовании данного подхода нестационарные эффекты, обусловленные взаимодействием крыльевых систем, исключаются из рассмотрения. Но даже для изолированного гребного винта применение этого подхода сопряжено с рисками получения некорректного решения, в первую очередь из-за пренебрежения нестационарными эффектами взаимодействия вихревых систем и движителя, которые для определенных типов гребных винтов или режимов их работы могут быть существенными. Кроме того, при использовании «секторной» постановки не следует дополнительно экономить на протяженности расчетной области. Все рекомендации по размерам расчетной области, существующие для полной нестационарной постановки данной задачи, нужно отразить и в стационарной «секторной» постановке.

Надводные части судов, как и объекты строительной архитектуры, зачастую имеют формы, которые провоцируют отрывные течения вблизи объекта, поэтому при некоторых направлениях ветра интегральные силовые характеристики, полученные в квазистационарной постановке, будут неточными. Подобные задачи следует решать сразу в нестационарной постановке, выбирая метод решения (URANS, DES, LES) адекватно рассматриваемому явлению и требованиям к выходным данным.

На изучение такого рода тонкостей и уходят первые годы послевузовского формирования специалиста в области численного моделирования.

Выбор и настройка численных схем и моделей

Даже обладая опытом и специальными знаниями в области численного моделирования, не стоит, применяя коммерческое программное обеспечение, надеяться на получение правильного ответа, используя универсальные «заводские» настройки. Надо помнить, что разработчик выбрал их как компромисс для приемлемого решения большинства традиционных задач. Как правило, моделиро-

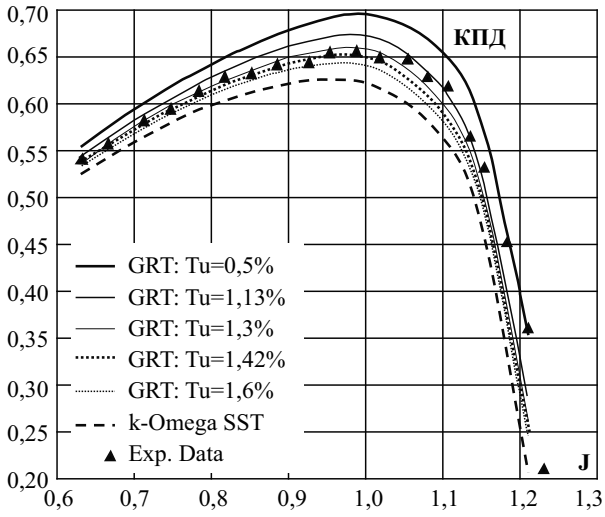


Рис. 3. Зависимость КПД гребного винта от уровня внешней турбулентности при использовании модели ламинарно-турбулентного перехода [9]

Fig. 3. Propeller efficiency vs turbulence intensity: laminar-turbulent transition model [9]

вание конкретных физических процессов и решение конкретных задач требует дополнительной настройки вычислительного пакета, причем выбор используемых уравнений, моделей и схем не всегда заранее очевиден. В рамках каждой задачи нужно понимать физику процесса и иметь соответствующие знания в области численной гидродинамики. Примером может служить недавняя реализация в основных коммерческих пакетах вычислительной гидродинамики модели ламинарно-турбулентного перехода [8] и необходимость ее использования при моделировании течения около движительных комплексов, многократно проверенная в отечественной и зарубежной практике [9–11]. Интуитивно понятное включение модели ламинарно-турбулентного перехода в расчетную схему преподнесло исследователям [9–11] ряд «сюрпризов». Хорошая проработанность модели привела к тому, что процесс перехода от ламинарного течения к турбулентному существенно зависит (рис. 3) от степени турбулентности потока (что бесспорно присутствует и в реальности), но не настолько, чтобы для расчетов брать непосредственно значения турбулентности потока из протоколов экспериментальных исследований. Во-первых, такие данные далеко не всегда существуют либо не могут быть достоверно определены в ходе каждого конкретного физического эксперимента. Во-вторых, задание уровня турбулентности на входе в расчетную область еще не гарантирует взаимодействия ламинарного пограничного слоя с пульсациями внешнего потока именно заданного уровня в силу численной диффузии полей на расчетной сетке. Поэтому требуется калибровка расчетных параметров для корректного использования модели ламинарно-турбулентного перехода.

Еще одним непредвиденным фактором применения модели ламинарно-турбулентного перехода, реализованной в пакете Star-CCM+ версий 9–12, стало существенное различие в эффективности распараллеливания основной части модели турбулентности k-omega SST и дополняющей ее модели ламинарно-турбулентного перехода. Различия в скорости счета привели к тому, что в отработанную технологию численного моделирования обтекания движительных комплексов были внесены поправки, минимизирующие затраты машинного времени, необходимого для повышения точности предсказания гидродинамических характеристик моделей гребных винтов.

Следует подчеркнуть, что речь идет о практических мероприятиях по использованию всего лишь одной расчетной модели из совокупности моделей и методов, применяемых при решении конкретной задачи моделирования физических процессов. С остальными включаемыми в расчетную схему моделями нужно обходиться не менее аккуратно [12], ранжируя приоритеты в соответствии с целями проводимого моделирования.

Другим примером важности выбора параметров расчетной схемы является расширение существующей технологии на другие режимы работы (движения) объекта. Отработанная и внедренная в практику технология численного моделирования движительных комплексов дала сбой при изучении начального (разгонного) этапа работы водометного движителя. При отсутствии движения этот движитель заглублен под свободную поверхность только на 2/3, а полное заполнение водой его водовода происходит уже в процессе работы и повышения скорости хода судна. Выполнение численного моделирования работы водометного движителя сопровождалось нефизичными значениями сил и моментов, а также потерей устойчивости счета. Причина несоответствия используемой технологии решаемой задаче находилась все в тех же параметрах расчетной схемы, которые необходимо было адаптировать. При использовании параметров, традиционных для задач численного моделирования движительных комплексов, даже

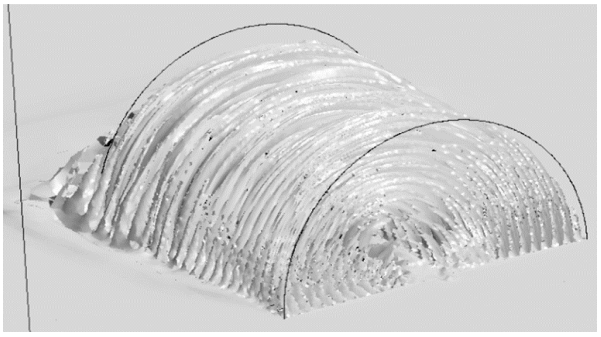
в отсутствие объектов внутри вращающегося региона[1] происходило вовлечение жидкости во вращение, что не соответствует реальности (рис. 4).

Характерным примером, иллюстрирующим данное положение, является работа [14], в которой описано физическое и численное моделирование течения в зазоре между крылом и твердой стенкой. Первичная расчетная область, послужившая исходными данными для физического моделирования в аэродинамической трубе, представлена на рис. 5*а*. Изучаемые процессы вихреобразования протекают между торцом крыла и твердой стенкой, и, как видно из рис. 5, расчетная область для данной задачи может быть достаточно простой и компактной. Однако сравнение результатов численного и физического моделирования выявило существенное расхождение в местоположении вихревых структур (рис. 5*б*). В ходе изучения возможных причин неудачной валидации была обнаружена необходимость учета в численном моделировании размеров рабочего участка и формы экспериментальной установки, включая оборудование для закрепления и перемещения моделей. На рис. 6*а*, (см. вклейку) изображена окончательная, использованная в численном моделировании расчетная область и сравнение полей скорости, полученных в численном и физическом моделировании (рис. 6*б*, см. вклейку).

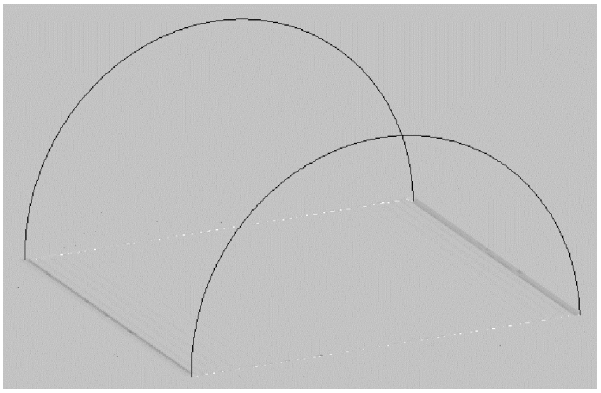
Аналогичный учет особенностей экспериментальной установки требуется при валидации результатов, полученных в кавитационных трубах, и при некоторых видах испытаний в опытовых бассейнах (рис. 7).

Отдельным моментом, интуитивно понятным, но тем не менее требующим внимания при проведении численного моделирования и его валидации, является необходимость соблюдения геометрического подобия физических и виртуальных моделей. При этом в ходе подготовки геометрической модели для выполнения расчетов необходимо соблюдать баланс: элементы геометрии нужно упростить для лучшей реализации расчета (устойчивости и экономичности задачи), но в то же время данные упрощения не должны оказывать влияние на физику процесса и, таким образом, на конечный результат.

На результаты валидации численного моделирования может повлиять и техническое состояние физической модели. В основном это касается моделей гребных винтов, которые в результате испытаний получают некоторые деформации тонких участков лопасти или глубокие царапины (особенно в ходе испытаний в ледовых условиях), что может существенно воздействовать, например, на кавитационные характеристики, определяемые в эксперименте.



а)



б)

Рис. 4. Вращение свободного от объектов цилиндрического региона, пересекающего границу раздела сред: *а*) выбор расчетных параметров в соответствии с традиционной технологией численного моделирования движительных комплексов; *б*) коррекция расчетных параметров для учета границы раздела сред [13]

Fig. 4. Rotation of free cylindrical domain crossing the boundary between media: *a*) selection of calculation parameters as per conventional numerical simulation technology for propulsion systems; *b*) update of calculation parameters to take into account the boundary between media [13]

Адаптация расчетной сетки в ходе численного моделирования

Существует ряд задач, в которых сложно заранее предвидеть положение зон, где требуется сгущение расчетной сетки для корректного описания особенностей течения. В первую очередь это относится

[1] Регион – часть расчетной области, характеризующаяся набором решаемых уравнений.

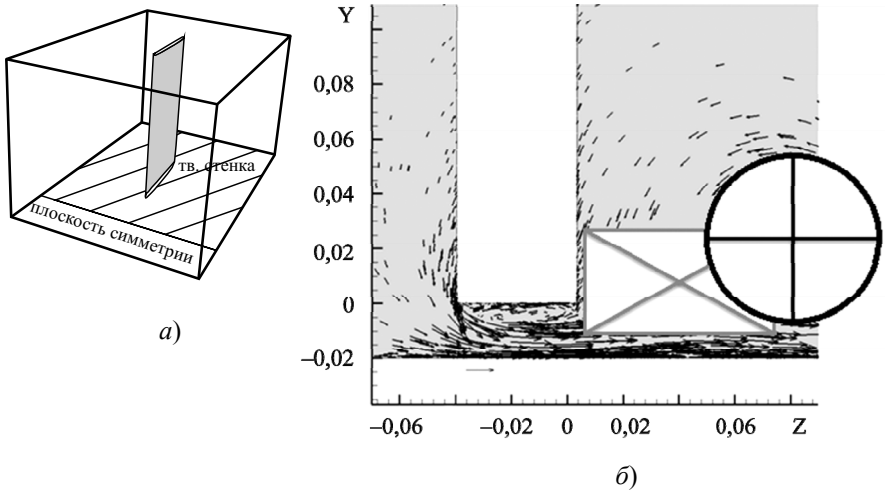


Рис. 5. Исходная расчетная область (*а*) и границы зон, содержащих вихревые структуры, полученные в эксперименте (прямоугольник) и в расчете (круг) (*б*)

Fig. 5. *a*) Initial calculation domain and boundaries of zones with vortices: *b*) experiment (*rectangle*) and calculation (*circle*)

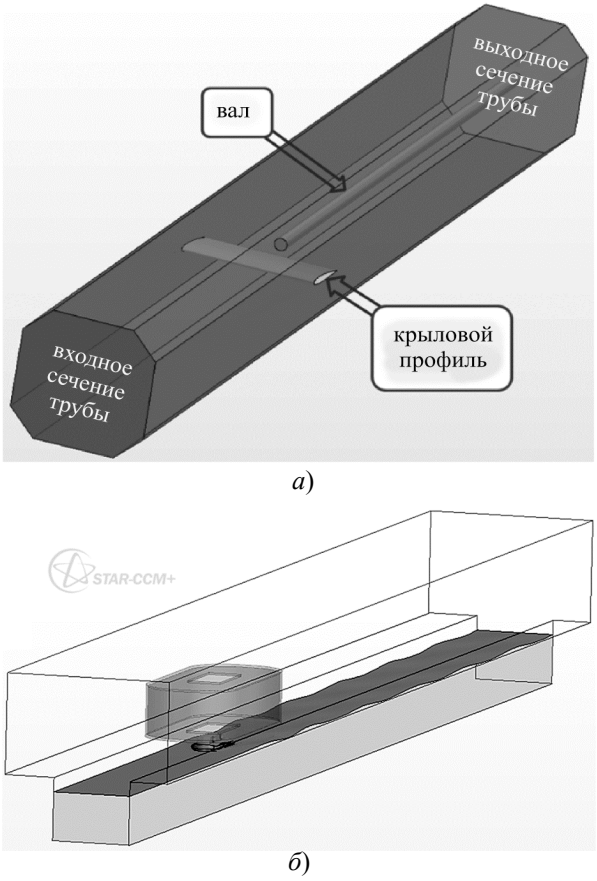


Рис. 7. Расчетная область для повторения модельного эксперимента в кавитационной трубе (*а*) и в скоростном мореходном бассейне (*б*)

Fig. 7. Calculation region for the repetition of the model experiment in a cavitation pipe (*a*) and in a high-speed seawater basin (*b*)

к задачам распространения жидких или газообразных сред в мультифазных или мультикомпонентных моделях потока. Практическими примерами таких задач в судостроении являются моделирование аварийных ситуаций, связанных с транспортировкой или хранением углеводородного сырья, исследование задымляемости, переноса примесей и т.д. В ходе численного моделирования процессов распространения необходимо периодически перестаивать расчетную сетку в зависимости от содержания массовой (объемной) доли исследуемой величины в расчетных ячейках (рис. 8).

Также большинство многофазных (мультикомпонентных) задач требуют учета реальных термофизических свойств переносимых веществ для корректного моделирования процессов переноса (перемешивания). Например, численное моделирование распространения выхлопных газов в надводной части судна необходимо проводить совместно с решением уравнений термодинамики для учета влияния архимедовых сил на отклонение струи в потоке в вертикальной плоскости (рис. 9). Следует отметить, что физическое моделирование задымляемости судовых надстроек и палубного оборудования выполняется, как правило, без учета реального состава выхлопных газов, их температуры и плотности, что в общем случае неверно и подходит лишь для сильных ветровых нагрузок.

Если для задачи разлива нефтепродуктов нужно лишь перестроить (адаптировать) расчетную сетку в процессе решения, т.к. область распространения в пространстве заранее неизвестна и зависит от характеристик внешнего потока, то полное моделирование процессов испарения жид-

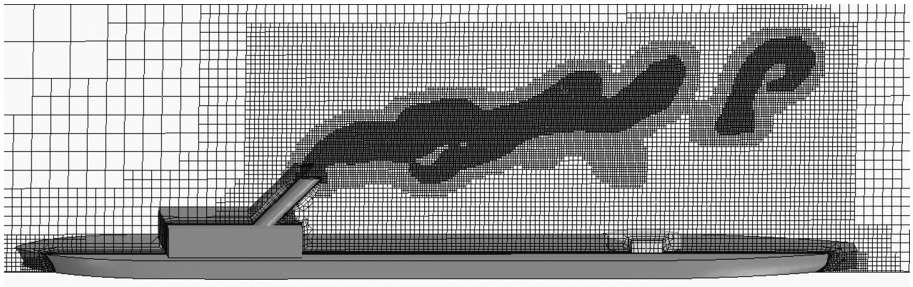
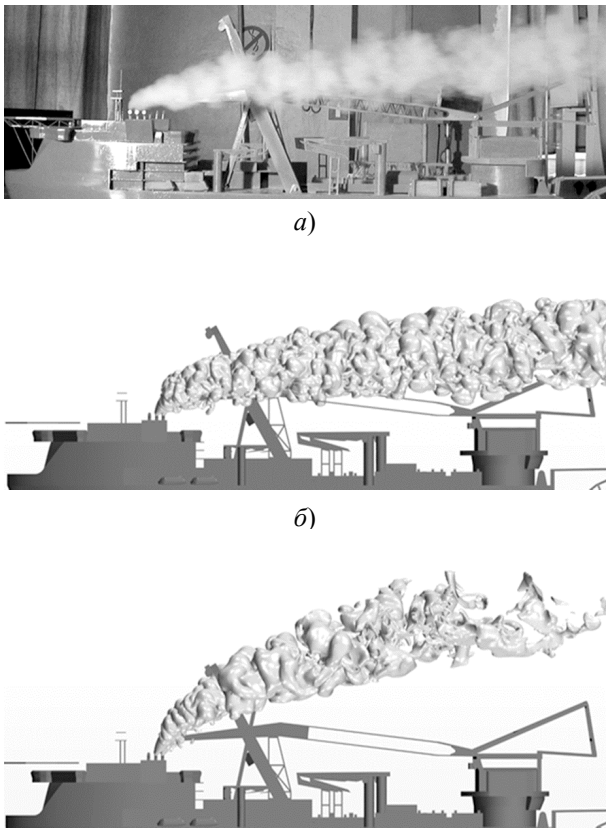


Рис. 8. Расчетная сетка в плоскости выхлопной трубы, адаптированная по содержанию выхлопных газов

Fig. 8. Calculation mesh in the funnel area, adapted by exhaust gas content

кого метана (СПГ) с водной или твердой поверхности требует дополнительно большого количества вычислительных ресурсов из-за размерности сетки, точно разрешающей зону фазового перехода, и продолжительного времени расчета из-за малого временного шага. Полное моделирование фазового перехода в масштабах, сравнимых с натурными размерами судна, на данный момент требует времени, во много раз превосходящего стандартные сроки выполнения работ. В связи с этим на данном этапе реализации математических моделей фазового перехода в коммерческих пакетах численной гидродинамики представляется возможным только раздельное моделирование разлития жидкого метана по поверхности, а затем расчет распространения в пространстве паров метана под действием внешних нагрузок (рис. 10, см. вклейку).

Численное исследование эффективности ветрозащитных ограждений не только требует адаптации расчетной сетки, но и представляет собой комбинацию задач различных масштабов. Расчет течения ветра в области хранения штабелей угля размерами километр на километр возможно проводить только при большом значении временного шага на расчетной сетке с крупными ячейками. Моделирование элементов конструкции ветрозащитного ограждения, которое имеет размеры на 2–3 порядка меньше (рис. 11, см. вклейку, врезка в углу), требует существенно меньших временных шагов и большого количества расчетных ячеек вблизи самого ветрозащитного ограждения, что приводит к непомерному увеличению времени расчета задачи в подобной полной постановке. Оптимальным решением является замена элементов ветрозащитного ограждения пористым телом. На первом этапе определяются свойства проницаемости одиночного элемента ветрозащитного ограждения, которые используются далее в модели пористого тела. На втором этапе проводится расчет всей зоны исследования ветро-



а)

б)

в)

Рис. 9. Моделирование распространения выхлопных газов: *а*) физический эксперимент с парами глицерина в аэродинамической трубе; *б*) численное моделирование с парами глицерина; *в*) численное моделирование объекта натурных размеров с учетом реального состава и температуры выхлопных газов

Fig. 9. Simulation of exhaust gas propagation: *a*) wind-tunnel experiment with glycerin vapours; *b*) numerical simulation with glycerin vapours; *c*) numerical simulation of full-scale object taking into account real composition and temperature of exhaust gases

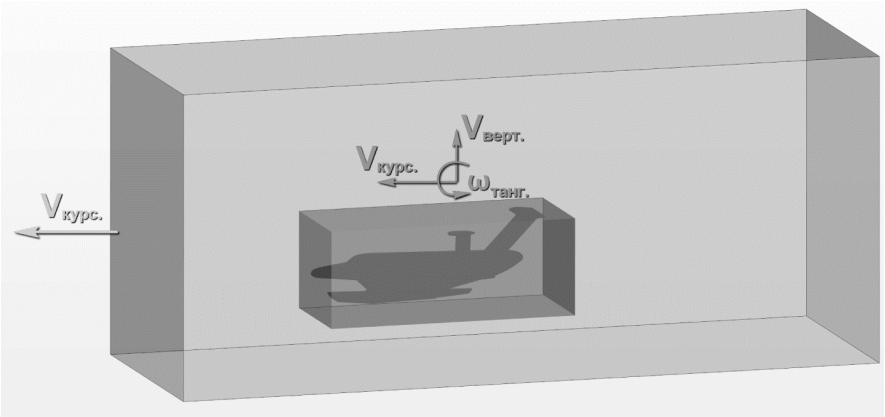


Рис. 12. Пример движения в глобальном пространстве двух перекрывающихся расчетных областей при моделировании динамики судна с динамическим принципом поддержания

Fig. 12. Example of two overlapping calculation domains moving in global space: simulation of dynamically supported craft

вого режима в области хранения штабелей угля. Замена ветрозащитного ограждения сложной формы на пористое тело позволяет значительно сократить объем требуемых вычислительных ресурсов.

Моделирование динамики экранопланов и СВП

В отличие от расчетов аэродинамики методом обращенного движения, когда на неподвижный объект набегает поток с заданной скоростью, при решении задач динамики необходимо учитывать тягу воздушных движителей, значение которой зависит от скорости набегающего потока, равного скорости движения судна в текущий момент. Поэтому моделирование динамики судов с динамическими принципами поддержания (СДПП) нужно проводить методом моделирования прямого (необращенного) движения (рис. 12). Разгон судна при этом происходит, как и в натурных условиях, в неподвижной среде (воздух/вода); судно разгоняется под действием переменной по значению силы тяги движителей. Для моделирования динамики СДПП следует использовать метод перекрывающихся сеток (overset mesh): основной регион неподвижен, а регион с исследуемым объектом имеет необходимые степени свободы и изменяет свое положение за счет действия суммарной силы тяги движителей и силы сопротивления, действующей на объект.

Расчетная область для решения задачи динамики судна должна иметь размеры чуть большие, чем вся траектория движения судна, что приводит к увеличению размерности расчетной сетки и времени расчета. Однако если использовать относительно небольшой по размеру основной регион, который тоже будет сдвигаться в пространстве со скоростью продольного движения второго региона, содержащего в себе геометрию исследуемого объекта и имеющего все необходимые степени свободы перемещения, то размерность расчетных сеток уменьшается и сокращается время решения задачи.

При расчете динамики также важно учитывать влияние струи от воздушных винтов на аэродинамические характеристики СДПП типа экраноплан. Моделирование вращения воздушных движителей в полной постановке приводит к увеличению размерности сетки, т.к. необходимо строить более подробную сетку во вращающемся регионе, содержащем в себе сам воздушный винт (рис. 13, см. вклейку). Временной шаг для расчета вращения воздушного винта в несколько раз меньше временного шага для расчета динамики движущегося объекта, что увеличивает общее время расчета динамики судна. Использование модели Virtual Disk (активный диск типа «источник-сток» с моделированием закрутки течения в соответствии с кривой действия воздушного винта в потоке) позволяет уменьшить размерность сетки и ускорить процесс решения примерно в 15 раз, при этом учитывая изменение тяги воздушного винта в потоке и влияние закрученной струи на обтекание аэродинамических поверхностей СДПП [15].

Моделирование динамики движения судна на воздушной подушке (СВП), имеющего гибкое ограждение для создания воздушной подушки, требует учета деформации гибких элементов конструкции, в особенности носового ограждения, так называемой носовой «юбки». Деформация формы ткани ограждения происходит за счет набегающего потока и разности давлений с наружной стороны и со стороны подушки. В случае моделирования ограждения без учета подгиба ткани резко возрастает гидродинамическое сопротивление СВП при наборе скорости и в определенный момент СВП перестает разгоняться. В действительности же из-за

подгиба ткани сопротивление судна не так велико и динамика разгона иная. Поэтому правильным решением этой задачи является совместное (связанное) решение задач гидродинамики и упругой деформации материала гибкого ограждения.

Оптимизация гребных винтов

Проектирование изделия обычно требует достаточно большого времени и ресурсов, а также множества доработок и совершенствований прежде, чем оно будет готово к производству. Часто из-за ограничений по времени и стоимости исследований решение принимается на основе анализа нескольких заранее подготовленных вариантов виртуальных прототипов. С увеличением точности современных методов вычислительной гидродинамики и доступностью высокопроизводительных ресурсов стало возможным проводить оптимизацию изделия – поиск наилучшего решения с учетом заданных критериев и ограничений.

Оптимизацию можно считать вершиной инженерных компьютерных технологий. Для решения задач в этой области следует в максимальной степени задействовать математический аппарат, привлекать эффективные серверные платформы и последние достижения в сфере разработки программного обеспечения. Таким образом, оптимизация является одной из самых востребованных задач в промышленности, поэтому широко применяется в таких сферах, как авиация и космос, автомобилестроение, турбомашиностроение и судостроение [16–18].

В настоящее время в Крыловском центре разрабатывается технология оптимизации гребных винтов. Гребные винты, как комплексное техническое решение, имеют достаточное количество возможных параметров, критериев и ограничений, что делает проведение оптимизации для них обоснованным [19–21]. На сегодняшний день существует огромное количество программ для оптимизации, как самостоятельных комплексов, так и встроенных в расчетные пакеты алгоритмов. Однако главным вопросом при подходе к оптимизации гребного винта, который до недавнего времени оставался открытым, является его параметризация. Невозможность удовлетворительно параметризовать реальные винты в программных комплексах твердотельного моделирования и передать их с требуемой точностью и с сохранением технологически значимой топологии на расчет в автоматическом режиме, т.е. без доводки расчетной сетки и участия в этой работе специалистов, привело к понимаю необходимости создать программу параметризации судовых движителей, которая будет отвечать всем требованиям судостроительной индустрии [22].

Другая проблема, возникающая при создании параметрической модели гребного винта, – это большое число параметров. В судостроительной науке лопасть гребного винта принято описывать набором сплайнов, в каждый из которых входит от 8 до 13 опорных точек. В соответствии с отраслевыми нормативами основными безразмерными геометрическими элементами лопасти движителя на каждом радиусе являются хорда, толщина, кривизна, шаг, саблевидность, откидка, позиция максимальной кривизны профиля и позиция максимальной толщины профиля. Задаются распределения этих величин по радиусу лопасти. Таким образом, принимая каждую опорную точку сплайнов, описывающих эти распределения, как параметр, мы получаем около 100 параметров на лопасть гребного винта, а это недопустимо много в рамках проведения инженерной оптимизации с моделированием течения вязкой жидкости. Эту проблему решает программа Vintgen [22] с помощью технологии Free Form Deformation. Накладывая на исходные сплайны деформационную кривую, удалось сократить количество параметров до 32, причем математически и физически обосновано варьирование лишь 23 параметров на лопасти. Кроме того, благодаря использованию процедуры Free Form Deformation поверхность лопасти получается всегда гладкая и согласованная [22].

Заключение

Conclusion

Обострение конкурентной борьбы в современной мировой экономике заставляет производителей вести активный поиск путей повышения эффективности всех бизнес-процессов. Одним из основных бизнес-процессов Крыловского государственного научного центра является создание востребованного судостроительной отраслью научно-технического задела. Мировой опыт показывает, что одним из инструментов создания такого задела является численное моделирование, роль которого с ростом возможностей вычислительных технологий стремительно возрастает.

Различные типы численного моделирования – от физических процессов до ситуационного моделирования сегодня широко используются во всех ведущих производственных предприятиях, обеспечивая их отраслевое лидерство. Обоснованность

повышения доли численного моделирования объясняется рядом преимуществ по сравнению с физическим моделированием [5].

К настоящему времени в Крыловском государственном научном центре разработан ряд технологий численного моделирования в области термо- и гидродинамики, которые с успехом применяются в работах предприятия, позволяя ускорить создание новой конкурентоспособной техники и повысить информативность испытаний, а иногда представляют собой единственный способ решения поставленной задачи.

Разработка технологий численного моделирования представляет собой сложный и длительный процесс, связанный с обязательной валидацией предлагаемых решений на основе сравнения с результатами физического моделирования для снижения рисков получения ошибочных результатов и их последствий в проектных решениях. Кроме этого необходимо наличие квалифицированного персонала, понимающего принципы работы используемого программного обеспечения. Как отмечено выше, моделирование конкретных физических процессов и решение конкретных задач требует дополнительной настройки вычислительного пакета, причем выбор используемых уравнений, моделей и схем для каждой задачи не всегда заранее ясен.

Тем не менее преимущества численного моделирования очевидны, что отражается в общемировом тренде цифровизации экономики в целом. Отказ от повышения доли численного моделирования в судостроительной промышленности означает дополнительное отставание от конкурентов, однако, как показано в данной статье, подходить к численному моделированию физических процессов и явлений нужно не менее вдумчиво и аккуратно, чем к физическому моделированию.

Библиографический список

1. *Лобачев М.П.* Некоторые проблемы создания и использования суперкомпьютерных технологий при проектировании высокотехнологичной продукции // Труды 2-й научно-практической конференции «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологической продукции – 2017». М., 2017.
2. *Лобачев М.П.* Проблемы внедрения и использования суперкомпьютерных технологий на предприятиях ОПК // Сборник докладов VI форума «Информационные технологии на службе оборонно-промыш-ленного комплекса», ИТОПК-2017. Ижевск, 2017. С. 112–113.
3. Кафедра «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ. Учебники и учебные пособия // URL: https://aero.spbstu.ru/study/textbooks (дата обращения: 21.05.2018).
4. Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ // URL: https://cs.msu.ru/taxonomy/term/661 (дата обращения: 21.05.2018).
5. *Лобачев М.П., Овчинников Н.А., Пустошный А.В.* Опыт использования современных методов численной гидродинамики / Академик А.Н. Крылов. К 150-летию со дня рождения. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. С. 15–32.
6. *Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P.* Detached-eddy simulation past a circular cylinder // J. Flow Turbulence and Combustion. 1999. 63. P. 293–313.
7. *Lobachev M.P., Saifullin T.I., Taranov A.E., Frolova I.G.* CFD application for an icebreaker propeller design // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 398–403.
8. *Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Völker S.A.* Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model formulation // ASME J. Turbomachinery. 2006. 128(3). P. 413–422.
9. *Taranov A., Lobachev M.* Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // IEEE. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7106783/ (дата обращения: 23.08.2018).
10. *Krasilnikov V., Sileo L., Steinsvik K.* Numerical investigation into scale effect on the performance characteristics of twin-screw offshore vessel // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 417–429.
11. *Baltazar J., Rijpkema D.,* Falcao de Campos J.A.C. On the use of the γ-Re_θ transition model for the prediction of the propeller performance at model scale // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 80–92.
12. *Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Попов И.А.* Верификация стандартных и модифицированных с учетом кривизны линий тока MSST и оценка приемлемости комбинированных по Ментеру граничных условий при расчете ультранизкого профильного сопротивления оптимальной компоновки цилиндра с соосным диском // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 32–41.
13. *Багаев Д.В., Таранов А.Е.* Численное моделирование работы водометного движителя на начальном этапе движения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78(362). С. 65–68.

14. *Егоров С.В., Корнилов Д.В.* Применение метода отсоединенных вихрей для расчета течения в зазоре между крылом и твердой стенкой. Осредненные характеристики потока // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78(362). С. 43–46.
15. *Сайфуллин Т.И.* Численное моделирование аэродинамики экраноплана с учетом волнения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78(362). С. 69–74.
16. *Galaktionov O.S., Anderson P.D., Peters G.W.M., Meijer H.E.H.* Analysis and optimization of Kenics static mixers // International Polymer Processing. 2003. 18(2). P. 138–150.
17. *Атрошенков С.Н., Платонов В.Н., Губарев Ф.В., Саратов А.А.* Оптимальный по расходу топлива алгоритм разворота МКС с помощью реактивных двигателей с учетом ограничений по нагрузкам на конструкцию // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. 4. С. 118–138.
18. *Sterling G., Prikhodko P., Burnaev E., Belyaev M., Grihon S.* On approximation of reserve factors dependency on loads for composite stiffened panels // Advanced materials research. 2014. 1016. P. 85–89.
19. *Foeth E.-J.* Propeller optimization using an unsteady boundary-element method // Proceedings of Fourth International Symposium on Marine Propulsors SMP'15. Austin, Texas, USA, June 2015. 1. P. 27–32.
20. *Gaggero S., Tani G., Villa D., Viviani M., Ausonio P., Travi P., Bizzarri G., Serra F.* Application of multi-objective optimization based design to high-speed craft propellers // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 1. P. 278–290.
21. *Pluciński M.M., Young Y.L., Liu Zh.* Optimization of a self-twisting composite marine propeller using genetic algorithms // Proc. of 16th International conference on composite materials, 2007, Japan. P. 1–8.
22. *Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н.* Оптимизация формы модели гребного винта в однородном потоке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск 1. С. 75–83.

References

1. *Lobachev M.* Certain aspects of developing and operating supercomputers in design of high-tech products // Transactions of the 2nd Scientific & Practical Conference Achieving scientific advance in life cycle of high-tech production – 2017. Moscow, 2017 (*in Russian*).
2. *Lobachev M.* Introduction and operation of supercomputers in military industry // Compendium of papers, VIth Forum IT in Military Industry (ITOPK-2017). Izhevsk, 2017. P. 112–113 (*in Russian*).
3. St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Flow Dynamics, Combustion and Heat Exchange. Textbooks and Student's Guides // URL: https://aero.spbstu.ru/study/textbooks (*in Russian*).
4. Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics. Textbooks and Student's Guides // URL: https://cs.msu.ru/taxonomy/term/661 (*in Russian*).
5. *Lobachev M., Ovchinnikov N., Pustoshny A.* Application experience of cutting-edge CFD techniques // To the 150th Anniversary of Academician A. Krylov. St. Petersburg, KSRC, 2013. P. 15–32 (*in Russian*).
6. *Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P.* Detached-eddy simulation past a circular cylinder // J. Flow Turbulence and Combustion. 1999. 63. P. 293–313.
7. *Lobachev M.P., Saifullin T.I., Taranov A.E., Frolova I.G.* CFD application for an icebreaker propeller design // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 398–403.
8. *Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Völker S.A.* Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model formulation // ASME J. Turbomachinery. 2006. 128(3). P. 413–422.
9. *Taranov A., Lobachev M.* Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // IEEE. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7106783/
10. *Krasilnikov V., Sileo L., Steinsvik K.* Numerical investigation into scale effect on the performance characteristics of twin-screw offshore vessel // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 417–429.
11. *Baltazar J., Rijpkema D.* Falcao de Campos J.A.C. On the use of the γ-Re_θ transition model for the prediction of the propeller performance at model scale // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 2. P. 80–92.
12. *Isaev S., Baranov P., Sudakov A., Popov I.* Verification of the standard model of shear stress transport and its modified version that takes into account the streamline curvature and estimation of the applicability of the Menter combined boundary conditions in calculating the ultralow profile drag for an optimally configured cylinder – coaxial disk arrangement // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki (Technical Physics). 2016. Vol. 86. Issue 8. P. 32–41 (*in Russian*).
13. *Bagaev D., Taranov A.* Numerical simulation of water-jet operation at the initial stage of movement // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 78 (362). P. 65–68 (*in Russian*).
14. *Yegorov S., Kornilov D.* Applying separated vortex method for calculation of current in the gap between

the wing and the solid wall. Averaged flow parameters. // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 78 (362). P. 43–46 (in Russian).

15. *Saifullin T.* Numerical simulation of ground effect vehicle (GEV) aerodynamics with consideration of waves // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 78(362). P. 69–74 (*in Russian*).
16. *Galaktionov O.S., Anderson P.D., Peters G.W.M., Meijer H.E.H.* Analysis and optimization of Kenics static mixers // International Polymer Processing. 2003. 18(2). P. 138–150.
17. *Aproshenkov* S., *Platonov V., Gubarev F.*, *Saratov A*. Algorithm of ISS optimal propellant maneuver with path constraints in ISS structure loads // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Engineering series. 2017. № 4. P. 118–138 (*in Russian*).
18. *Sterling G., Prikhodko P., Burnaev E., Belyaev M., Grihon S.* On approximation of reserve factors dependency on loads for composite stiffened panels // Advanced materials research. 2014. 1016. P. 85–89.
19. *Foeth E.-J.* Propeller optimization using an unsteady boundary-element method // Proceedings of Fourth International Symposium on Marine Propulsors SMP'15. Austin, Texas, USA, June 2015. 1. P. 27–32.
20. *Gaggero S., Tani G., Villa D., Viviani M., Ausonio P., Travi P., Bizzarri G., Serra F.* Application of multi-objective optimization based design to high-speed craft propellers // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Espoo, Finland, June 2017. 1. P. 278–290.
21. *Pluciński M.M., Young Y.L., Liu Zh.* Optimization of a self-twisting composite marine propeller using genetic algorithms // Proc. of 16th International conference on composite materials, 2007, Japan. P. 1–8.
22. *Lavrisheva L., Novoselov V.* Shape optimization of propeller model in uniform flow // Transactions of the. 2018. Special Issue No. 1. P. 75–83 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Таранов Андрей Евгеньевич, к.т.н., начальник Суперкомпьютерного центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Сайфуллин Тимур Ильдарович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Рудниченко Алексей Андреевич, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Егоров Сергей Владимирович, научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Andrey Ye. Taranov, Can. Sci. (Eng.), Head of High-Performance Computer Centre, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Timur I. Saifullin, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Alexey A. Rudnichenko, Engineer 1st category, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel. 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Sergey V. Egorov, Research scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 02.07.18
Принята в печать / Accepted: 07.11.18
© Коллектив авторов, 2018