

УДК 629.5.018.8+532.5.013
EDN: RPYDHF

М.П. Лобачев 

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

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ТРАДИЦИОННЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ КОРАБЛЯ

Объект и цель научной работы. В работе представлены примеры использования численных методов и высокопроизводительной вычислительной техники для оценки масштабного эффекта в традиционных задачах корабельной гидродинамики (сопротивление корпусов судов, гидродинамические характеристики гребных винтов, поля скоростей, коэффициент попутного потока). Расчеты выполнялись на основе технологий численного моделирования, разработанных в Крыловском государственном научном центре.

Материалы и методы. Характеристики течения вязкой жидкости вокруг объектов морской техники находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности. В ряде случаев использовался метод отсоединенных вихрей (DES) и учитывался ламинарно-турбулентный переход.

Основные результаты. Цикл работ по разработке технологий численного моделирования турбулентных течений вязкой жидкости при модельных и натуральных условиях показал, что современное состояние численных методов и высокопроизводительной вычислительной техники позволяет прогнозировать гидродинамические характеристики объектов морской техники как для модельных, так и для натуральных условий. В ряде случаев требуемые для таких задач вычислительные ресурсы достаточно высоки и предполагают использование суперкомпьютерной техники.

Заключение. Развитие вычислительной техники и технологий численного моделирования турбулентных течений вязкой жидкости при модельных и натуральных условиях достигло такого уровня, что стало возможным их применение для прогнозирования масштабного эффекта. В ряде случаев допустимо непосредственное использование результатов численного моделирования для натуральных условий. Использование подобных методов позволяет при определении масштабного эффекта учитывать конкретные особенности обтекания корпуса судна и движителя.

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентность, уравнения Рейнольдса, масштабный эффект.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.018.8+532.5.013
EDN: RPYDHF

М.П. Lobachev 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

STATE-OF-THE ART IN SCALE EFFECT ESTIMATION FOR STANDARD SHIP THEORY APPLICATIONS

Object and purpose of research. This paper illustrates how numerical methods and high-performance computers can be used for scale effect estimate for typical parameters of ship hydrodynamics (hull resistance, propeller performance, velocity field pattern, wake fraction). The calculations were performed as per numerical simulation algorithms developed at Krylov State Research Centre.

Materials and methods. Viscous flow characteristics around marine structures are obtained through FVM solution of non-stationary Reynolds equations closed by bi-parametric semi-empirical turbulence model. Some of these calculations were performed as per detached eddy simulation (DES) method with consideration of laminar-turbulent transition.

Для цитирования: Лобачев М.П. Современные возможности оценки масштабного эффекта для традиционных задач теории корабля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 33–48.

For citations: Lobachev M.P. State-of-the art in scale effect estimation for standard ship theory applications. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 33–48 (in Russian).

Main results. A set of projects intended to develop numerical simulation algorithms for both model-scale and full-scale turbulent viscous flow has shown that current numerical methods and high-performance computers can predict hydrodynamic performance of marine engineering facilities in both model and full-scale conditions. These tasks may sometimes become very complex and impossible to handle without supercomputers.

Conclusion. The progress in computer hardware and numerical simulation technologies for turbulent viscous flows in model and full-scale conditions has now reached the level enabling their use for scale effect assessment. In some cases numerical simulation results for full-scale conditions can be used directly. Application of numerical simulation techniques to scale effect assessment makes it possible to take into account specific features of the flow around hull and propeller.

Keywords: numerical simulation, turbulence, Reynolds equations, scale effect.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Основным источником исходной информации для выполнения проектных работ в задачах корабельной гидродинамики и смежных областях по-прежнему являются экспериментальные исследования, проводимые в опытовых бассейнах, аэродинамических и кавитационных трубах. Каждый из этих экспериментов имеет свои особенности, однако общим является то, что они проводятся с нарушением законов подобия, прежде всего по числу Рейнольдса, т.е. по схемам частичного моделирования [1]. Именно таким невыполнением законов подобия в модельном эксперименте обусловлено возникновение задачи о масштабном эффекте интегральных и локальных гидродинамических характеристик течений реальной (вязкой) жидкости, т.е. экстраполяции результатов модельных испытаний на натурные условия.

Ранее в работе [2] было показано, что при современном усложнении задач, изучаемых теорией корабля, происходит изменение методологических подходов к их решению. Большую роль приобретает численный эксперимент как средство получения конечной информации. Модельный эксперимент все чаще используется как средство построения адекватных математических моделей или их проверки. В значительной степени это обусловлено прогрессом как в разработке численных методов, так и в развитии вычислительной техники. Хотя стоит отметить, что судостроение в этом направлении существенно отстает от таких отраслей, как энергомашино-, авиа- и ракетостроение.

Опыт использования методов численного моделирования в Крыловском государственном научном центре за время, прошедшее с публикации [2], и анализ зарубежной практики, включая документы ИТТС (МКОБ), выполненный в [3], показывает, что для многих задач методы численной гидродинамики (CFD – Computational Flow Dynamics) все актив-

нее используются в проектной работе. Но эффективное и достоверное использование CFD методов возможно только при наличии валидированных расчетных методик, а для многих задач требуются значительные вычислительные ресурсы.

Валидации расчетных методик, используемых в Крыловском центре, посвящены публикации [4–6] и ряд других. При этом валидация проводится как на международных тестах, так и на экспериментах в Крыловском центре, что в ряде случаев оказывается предпочтительнее, т.к. доступны практически все детали геометрии экспериментальных установок и методик проведения экспериментов [7]. Требуемые вычислительные ресурсы указаны в цитированных выше работах. Также этому вопросу, включая эффективность распараллеливания, посвящена работа [8].

Проблема валидации CFD расчетов применительно к натурным условиям заключается прежде всего в практически полном отсутствии прямых измерений величин, которые можно было бы однозначно связать с величинами, получаемыми в расчетах при изменении только числа Рейнольдса. В большинстве случаев об адекватности расчетов при натуральных числах Рейнольдса приходится судить по косвенным признакам.

В работе [9] рассмотрена структура задач, возникающих при оценке масштабного эффекта гидродинамических характеристик объектов морской техники как для методик, основанных на пересчете результатов модельного эксперимента, так и при использовании методов численного моделирования. Показано, что на точность прогнозирования масштабного эффекта влияет множество факторов: шероховатость поверхности, свойства среды и т.д. Даже имеющиеся данные по измерению профиля скорости при натурном числе Рейнольдса $Rn_x = 1,03 \cdot 10^9$ [10, 11] выполнены при значительном влиянии шероховатости поверхности. Так что приходится учитывать минимум два фактора, причем для точной оценки влияния шероховатости недостаточно исходных данных.

Те же проблемы стояли и при расчетах ходкости с использованием CFD методов [6], как, впрочем, и при использовании для этих же объектов традиционных методик [12]. В традиционных методиках влияние шероховатости обычно учитывается на основе статистических данных. Несмотря на отсутствие полноценной валидации для натуральных условий, как констатируется и в [3], CFD методы являются единственным инструментом для оценки характеристик потока на корпусе судна, гребных винтах и других объектах морской техники в натуральных условиях.

Данная работа в основном является обзором результатов по оценке масштабного эффекта CFD методами, полученных автором совместно с коллегами из Крыловского центра примерно за 25 лет. Частично данные результаты уже докладывались [13], однако с учетом специфики аудитории, достаточно далекой от задач теории корабля. Часть результатов, полученных автором и его коллегами в последние годы, не может быть представлена в силу коммерческой тайны. Это работы, выполненные по коммерческим договорам.

В данную публикацию не вошли результаты работ, посвященных решению нетрадиционных задач, т.е. тех, для которых не существует методик оценки масштабного эффекта или же они представляются слабо проработанными. Этим задачам будет посвящена отдельная статья. Также не вошло значительное число материалов последних пяти лет, т.к., хотя и решались задачи для натуральных чисел Рейнольдса, масштабный эффект не оценивался. К подобным задачам относится проектирование рабочих колес водометных движителей [14]. По части решенных в последнее время задач (к примеру, валидация расчетов ходкости судов на основе использования численных методов, масштабный эффект начала кавитации) готовятся отдельные публикации.

Далее представлены результаты, полученные на основе решения уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности типа $k-\epsilon$ (стандартной или нелинейной) или $k-\omega$ SST [15, 16]. В настоящее время для всех задач разработаны методики выполнения расчетов, основанные на использовании именно на $k-\omega$ SST модели турбулентности, хотя для некоторых задач ранее более подходящей представлялась нелинейная (квадратичная) $k-\epsilon$ модель турбулентности [17].

Переход к использованию $k-\omega$ SST модели первоначально был обусловлен тем обстоятельством, что именно эта модель лежит в основе вихререшающих подходов DES [18] во всех коммерческих CAE пакетах, а для некоторых из задач требовался

именно прямой расчет крупномасштабной турбулентности, обеспечивавшийся за счет использования метода DES. Модель Спаларта – Аллмараса (модель SA-92) также используемая в DES, как показано в [17], дает на задачах корабельной гидродинамики слишком большие погрешности, по крайней мере для расчета сопротивления.

Сегодня реализация $k-\omega$ SST модели в используемых нами коммерческих пакетах позволяет получать более приемлемые по точности результаты, чем описано в [17]. Это обусловлено тем обстоятельством, что в большинстве программных комплексов реализованы усовершенствования модели, предложенные в [16]. Кроме того, именно $k-\omega$ SST модель турбулентности является базовой при прогнозировании ламинарно-турбулентного перехода [19]. В задачах с относительно малыми числами Рейнольдса использование модели перехода является необходимым. Например, в задаче о масштабном эффекте кривых действия гребных винтов, о чем будет информация ниже.

Традиционные задачи теории корабля

Standard tasks of shipbuilding

В данном случае под традиционными понимаются задачи, для которых существуют инженерные методики оценки масштабного эффекта, основанные либо на испытаниях масштабных серий, либо на получении корреляционных коэффициентов при сопоставлении результатов натуральных (ходовых) испытаний с результатами модельных испытаний.

При этом следует отметить, что в отношении этих методик могут существовать альтернативные точки зрения или же вестись дискуссии. Например, при пересчете вязкостного сопротивления существует два подхода: базирующийся на гипотезе аффинной зависимости и основанный на методе Фруда [20]. В первом случае в качестве экстраполятора для сопротивления трения используется кривая ИТТС-57, во втором – кривая Прандтля – Шлихтинга. Соответственно в методах пересчета, использующих эти подходы, применяются различающиеся корреляционные поправки.

К традиционным задачам [3] прежде всего относятся следующие:

- определение сопротивления корпусов судов;
- определение гидродинамических характеристик гребных винтов;
- определение поля скоростей и коэффициентов номинального и расчетного попутного потока.

Определение сопротивления корпусов судов

Hull resistance determination

Собственно, определение масштабного эффекта сопротивления корпуса судна – это самая первая задача о масштабном эффекте в теории корабля. В какой-то степени можно сказать, что именно с того момента, когда в XIX в. Уильям Фруд предложил разделять сопротивление судна на две составляющие: волновую и вязкостную, эксперимент на моделях стал определяющим при получении требуемой для проектирования судов информации.

При этом в эксперименте на модели выдерживался критерий подобия, называемый сейчас числом Фруда, что давало возможность определить волновую составляющую. Вязкостная составляющая определялась по эмпирическим формулам и переносилась с модели на натуру в соответствии с другим критерием подобия – числом Рейнольдса.

Несмотря на то, что это одна из самых старых задач определения масштабного эффекта, до сих пор, как это показано, например, в [21], она не имеет окончательного решения. Так, на 23-й конференции ИТТС (2002 г.) был рассмотрен новый экстраполятор, предложенный Григсоном (Grigson), с целью получения более реалистичных значений форм-фактора. Propulsion Committee заключил, что предложенный экстраполятор имеет как преимущества, так и недостатки по сравнению с традиционным ИТТС-57. Тем не менее данный экстраполятор не включен в рекомендованную методику проведения буксировочных испытаний [22].

По мнению автора, проблема разработки корректной методики пересчета вязкостного сопротивления с модели на натуру при расчетах ходкости осложняется еще и тем, что частично именно за счет вводимых в нее корреляционных поправок происходит компенсация ошибок, обусловленных принятием предположения о неизменности коэффициента засасывания при переходе от модели к натуре. Хотя, как показано, например, в работе [23], коэффициент засасывания может изменяться при переходе от модельных чисел Рейнольдса к натурным. В связи с этим использование численных методов для оценки масштабного эффекта сопротивления приобретает все большую значимость, особенно с учетом существенного улучшения точности этих методов.

В настоящее время определение сопротивления корпусов судов практически любой геометрии в условиях модельного эксперимента обеспечивается

численными методами с отклонением от экспериментальных результатов в пределах не более 2%. При этом отсутствие или наличие на корпусе отрывных явлений практически не влияет на точность получаемого результата при правильном выборе используемой математической модели, включая выбор пристенных функций, и построении адекватной расчетной сетки [9, 24].

В [24] рассматривалась только вязкостная составляющая сопротивления, определенная в эксперименте методом Прохаски [20], но следует учесть, что именно для этой составляющей наличие отрыва в кормовой оконечности весьма значимо. По полному сопротивлению, например, по данным [25], результаты расчета лежат в пределах разброса экспериментальных точек. По данным [5], на ходовом числе Фруда различие между расчетом и экспериментом – 0,7%; за исключением $Fn < 0,1$ – не больше 1,8%.

Как погрешности экспериментальных измерений, так и отличие результатов расчетов от эксперимента по материалам зарубежной печати и документам ИТТС с соответствующей библиографией представлены в [3]. Специально проведенные в Крыловском центре эксперименты [26, 27] также показывают, что погрешности исследований сопоставимы с различием между экспериментом и расчетом.

Ранее одним из подходов, использовавшихся для проверки экстраполяторов трения, являлся подход, основанный на испытаниях масштабных серий. И хотя сейчас этот подход в значительной степени утратил значимость, его рассмотрение имеет не только исторический интерес. В данной работе рассматривается серия Victory [20]. На 43-й конференции «Крыловские чтения» были представлены оценки собственного сопротивления турбулизаторов, расположенных на плоской пластине [28]. Эти результаты опубликованы в [9].

В [20] исходные материалы представлены без корректировки на собственное сопротивление турбулизаторов, хотя в [29] и говорится о том, что при необходимости такую корректировку можно выполнить по формулам Л.Ф. Козлова. Однако для корректировки данных по Victory использовались собственные результаты [9, 28]. Это обусловлено тем обстоятельством, что при проведении расчетов, соответствующих экспериментам Л.Ф. Козлова, наиболее полно описанных в [30], выяснилось, что собственное сопротивление турбулизатора сильно зависит от радиуса закругления передней кромки понтона при переходе от носовой оконечности к днищу, на котором установлен турбулизатор.

Поэтому зависимости для сопротивления турбулизатора, предложенные Л.Ф. Козловым, вряд ли можно считать универсальными.

При сопоставлении результатов для моделей масштабной серии Victory с результатами расчетов для корректировки данных буксировочного сопротивления использовались результаты по расчетному определению сопротивления турбулизаторов [9]. Также учитывалось наличие ламинарного участка до турбулизатора. Для выделения из экспериментальных данных по полному сопротивлению вязкостного сопротивления использовали метод Прохаски [20] с применением для обработки кривой ИТТС-57 [20, 31] для сопротивления трения плоской пластины. Коэффициент полного сопротивления определяется как

$$C_T = \frac{2R_x}{\rho V^2 S},$$

где R_x – полное сопротивление корпуса судна (модели), V – скорость движения, ρ – плотность воды, S – площадь смоченной поверхности судна (модели).

Результаты такой обработки экспериментальных данных приведены на рис. 1 (см. вклейку). Поскольку, кроме разницы в зависимости вязкостного сопротивления от масштаба моделей, наблюдалась разница между результатами, полученными в различных бассейнах, оставлены только результаты, полученные в основном в глубоководном бассейне Крыловского государственного научного центра [20].

Результаты испытаний в старом опытовом бассейне Крыловского центра на территории Новой Голландии и в бассейне ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского) не приводятся. Для каждой модели выделенное вязкостное сопротивление показано отрезками сплошных линий. За исключением самой малой модели длиной $L = 1,695$ м, в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса совокупность всех результатов, полученных по методу Прохаски, ложится на одну кривую. Для самой маленькой модели, кроме сопротивления турбулизатора, весьма значимыми, видимо, оказались и другие факторы.

Результаты расчета проиллюстрированы оранжевой сплошной линией. Наблюдаемое отличие от обработки по методу Прохаски аналогично отличию практически всех кривых сопротивления плоской пластины от кривой ИТТС-57, которая, как указывалось выше, использована для выделения вязкостного сопротивления. Для сопоставления эти кривые также приведены на рис. 1. Представлены

как используемые в настоящее время за рубежом и в России кривые ИТТС-57 и Прандтля – Шлихтинга [20, 32], так и применявшаяся ранее кривая Шенхера [20, 33], а также предложенные относительно недавно кривые Григсона [34] и Кацуи [35].

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности использованного численного метода, а с учетом общего недовольства кривой ИТТС-57, высказываемого многими исследователями, показывают правильную тенденцию. Анализ соответствия эмпирических кривых сопротивления и численных методов представлен в работе [36], где анализируются кривые ИТТС-57, Шенхера, Григсона и Кацуи.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о правомерности использования современных методов расчета вязкостного сопротивления для пересчета модельных результатов на натурные числа Рейнольдса. И этот путь представляется более правильным, чем периодические попытки изменения экстраполятора трения для улучшения согласования результатов расчетов ходкости с данными ходовых испытаний. Тем более что, как показывают результаты различных исследований [37, 38], заложенное в процедуре расчета ходкости МКОБ-78 (ИТТС-78) [39] предположение о независимости форм-фактора k от числа Рейнольдса на самом деле выполняется только для определенного типа судов. Собственно, тех, что были характерны для того времени.

В [38] рассматривался вопрос о состоянии численной гидродинамики на тот момент. Исследованы возможности численных методов в прогнозировании сопротивления с учетом и без учета свободной поверхности и работы гребного винта. Результаты расчетов, представленные 20 организациями, сравнивались с экспериментальными результатами для трех тестовых вариантов.

Одним из тестовых вариантов был корпус танкера KRISO 300K (KVLCC2), имеющего U -образные кормовые шпангоуты. Обтекание корпуса модели такого судна сопровождается отрывом потока и сворачиванием вихря вблизи диаметральной плоскости в диске винта. Следует сказать, что данная модель в качестве тестовой использовалась многими исследователями и позднее.

Для этого корпуса выполнены расчеты форм-фактора на основании расчетных значений вязкого сопротивления и коэффициента трения плоской пластины по экстраполятору ИТТС-57. Как отмечено в работах [37, 38], все методы прогнозируют увеличение форм-фактора при переходе от модели

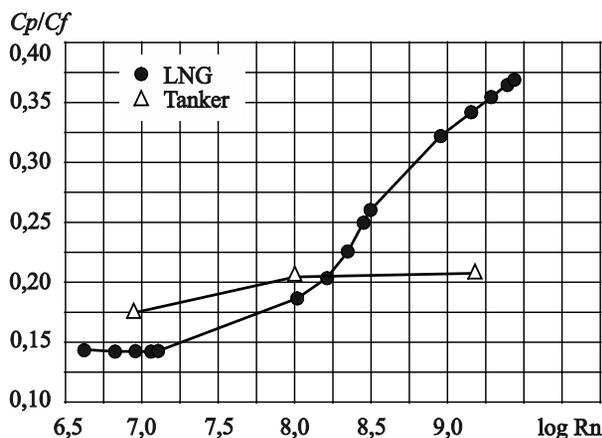


Рис. 2. Зависимость отношения C_p/C_f от числа Рейнольдса для судов с различными обводами (Tanker – одновальное судно, LNG – двухвальное судно) [40]

Fig. 2. C_p/C_f ratio as function of Reynolds number for ships with different hull shapes (single-shaft tanker, twin-shaft LNGC) [40]

к натуре в среднем с 0,247 до 0,378, что противоречит основному предположению методики ИТТС-78 о независимости форм-фактора от числа Рейнольдса.

Существует ли для данной задачи какой-либо параметр, сохраняющийся при переходе от модели к натуре? По данным [40], отношение расчетных значений сопротивления вязкого давления (C_p) и сопротивления трения (C_f) для корпуса танкера KRISO 300K (KVLCC2), имеющего U -образные кормовые шпангоуты, различается для методов, рассмотренных в [37, 38], но расхождение между натурными и модельными существенно меньше. В определенной степени эти результаты подтверждают правильность предположения об аффинной зависимости вязкого сопротивления от сопротивления трения, которая заложена в методику пересчета ИТТС, но только для определенных типов судов.

В [40] приведен еще один пример одновального судна с умеренно U -образными обводами, для которого зависимость отношения C_p/C_f от числа Рейнольдса незначительна. Это испытывавшийся в Крыловском центре танкер с полнотой $C_B = 0,792$ и $L_{WL}/B = 7,276$ (Tanker). В проведенных нами расчетах отношение C_p/C_f изменялось от 0,174 при числе Рейнольдса $Rn = 8,727 \cdot 10^6$ до 0,207 при числе Рейнольдса $Rn = 1,521 \cdot 10^9$, т.е. изменение на 18 %.

Соответствующие значения форм-фактора $k = C_v/C_{f0}$, полученные из расчетных данных, следующие: модель – 0,217, натура – 0,313. Здесь C_v – вязкостное сопротивление, полученное в расчете, C_{f0} – сопротивление трения пластины по ИТТС-57.

Изменение при переходе от модели к натуре на 44,5 %, что подтверждает для данного типа обводов меньшее изменение отношения C_p/C_f в зависимости от числа Рейнольдса по сравнению с изменением форм-фактора.

В то же время существуют классы обводов, для которых подобный подход в принципе неприменим. Выполненные нами расчеты для двухвального газозова с коэффициентом общей полноты $C_B = 0,724$ и $L_{WL}/B = 5,686$ (LNG) показали значительное изменение отношения C_p/C_f при переходе от модели к натуре [40]. Для модели при $Rn = 1,2578 \cdot 10^6$ – $C_p/C_f = 0,1427$, для натуре при $Rn = 2,717 \cdot 10^9$ – $C_p/C_f = 0,3685$, т.е. изменение в 2,58 раза. При стандартном использовании форм-фактора (получено из результатов расчета) для модели $k = 0,1639$, для натуре $k = 0,4125$, т.е. изменение в 2,52 раза. Для судна такого типа оба подхода – с использованием форм-фактора и с использованием отношения C_p/C_f – оказываются одинаковыми и при этом неудовлетворительными.

Для иллюстрации разобранных примеров на рис. 2 представлены результаты расчета отношения C_p/C_f в зависимости от логарифма числа Рейнольдса. Эти результаты показывают, что параметр C_p/C_f , как и форм-фактор k , не является неизменным при переходе от модельных чисел Рейнольдса к натурным для обводов судов разных типов. И сравнивать для оценки масштабного эффекта следует только прямые расчеты сопротивления численными методами. Только такой расчет оказывается достаточно универсальным.

Определение гидродинамических характеристик гребных винтов

Determination of propeller performance curves

Получить кривые действия гребного винта численными методами сегодня можно примерно с такой же точностью, как и сопротивление корпусов судов. Причем в отличие от традиционных методик оценки масштабного эффекта можно получить результаты с учетом локальных особенностей геометрии, таких как оформление выходящей кромки лопастей (закругление, обрезка и т.п.).

На рис. 3 (см. вклейку) для винта А из [41] дано сопоставление экспериментальных и рассчитанных кривых действия в свободной воде. Эксперимент выполнялся на БТ-1 глубоководного бассейна Крыловского центра. Расчет проводился с использова-

нием низкорейнольдсової версии $k-\omega$ SST модели турбулентности и модели $\gamma-Re_\theta$ для учета ламинарно-турбулентного перехода. На рабочей поступи $J=0,671$ погрешности расчета составили: по упору – 2,1 %; по моменту – 3,1 %; по КПД – 0,6 %.

В целом представленные на рис. 3 данные показывают приемлемую точность расчетов при поступях больше 0,3, особенно если учесть величины погрешностей при проведении экспериментов по определению гидродинамических характеристик гребных винтов [42]. Здесь же приведены результаты расчета для натуральных условий.

На рис. 4 представлен внешний вид гребного винта А и дано сопоставление изменения коэффициентов упора, момента и КПД гребного винта при переходе от модели к натуре, полученного с учетом для модельных условий ламинарно-турбулентного перехода [41] и по методике ИТТС-78 [39]. С учетом обширной практики успешного использования метода ИТТС-78 при прогнозировании ходовых качеств судов близость прогноза результатов численной оценки масштабного эффекта к методу ИТТС свидетельствует в данном случае об адекватности используемой при численном моделировании математической модели. Расчеты для винтов нетрадиционных форм, выполненные в Крыловском центре, показали, что и в этом случае методика ИТТС-78 может быть пригодной для пересчета данных модельных испытаний на натуре.

Так, по требованию одного из заказчиков для гребного винта с отгибом верхней кромки в сторону засасывающей поверхности (Kappel propeller) проведены сопоставительные расчеты по методике ИТТС-78 и с использованием численного моделирования. И методика, и моделирование показали одинаковые результаты, так что для подобной геометрии допустимо использование существенно менее трудоемкого метода пересчета.

При этом для нетрадиционных форм гребных винтов, которые ранее не использовались (соответственно, для них нет данных для валидации традиционной методики), представляется целесообразным проводить оценку с использованием как метода ИТТС-78, так и численного моделирования. И только после такой проверки выбирать тот или иной метод пересчета.

Определение поля скоростей

Wake surveys

Определение номинального поля скоростей (т.е. без учета работы гребного винта) для судов с общей

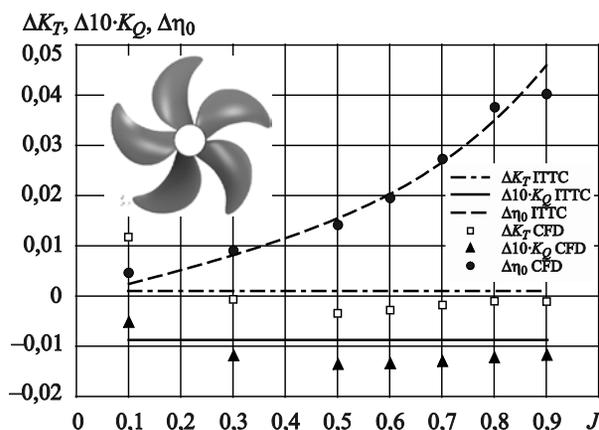


Рис. 4. Масштабный эффект гидродинамических характеристик гребного винта А: упора, момента и КПД [41]

Fig. 4. Scale effect in Propeller A performance curves: thrust, torque and efficiency [41]

полнотой до 0,7 практически не вызывает никаких затруднений.

Пример такого расчета из [43] приведен на рис. 5 в виде зависимости продольной скорости на относительном радиусе гребного винта $r/R = 0,75$, где r – текущий радиус, R – радиус гребного винта, V_x – обезразмеренная по скорости движения судна продольная составляющая скорости. Результаты расчета приведены в полярной системе координат, связанной с гребным винтом, как для модельных, так и для натуральных условий.

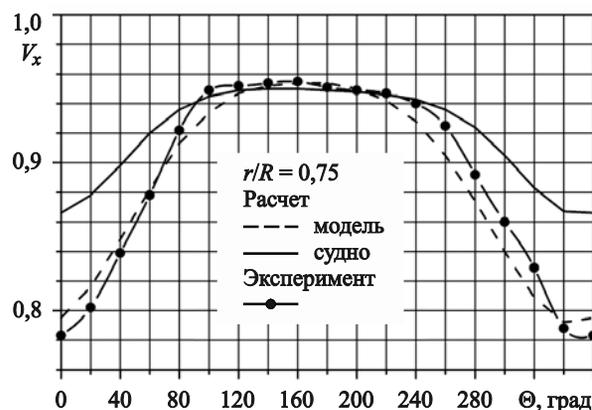


Рис. 5. Окружное распределение поля скоростей в диске гребного винта пассажирского судна [43] ($C_B = 0,73$)

Fig 5. Circumferential velocity field in propeller plane of passenger vessel [43] ($C_B = 0,73$)

Для судов с большой полнотой ряд особенностей поля номинальной скорости в кормовой оконечности не полностью моделируется в случае применения наиболее используемых полуэмпирических моделей турбулентности. Хотя за счет использования более сложных моделей и специальных пристенных функций удается улучшить соответствие расчета эксперименту [9], как показано на рис.6.

Наиболее универсальным в этом случае является, особенно если требуется знание структуры во внешней (относительно пристенного слоя) области потока [44], использование для моделирования турбулентности гибридных методов типа DES, что приводит к размерностям расчетных сеток 60–200 млн ячеек и значительным временам счета, которые необходимы для накопления временной реализации для последующего осреднения [18, 45].

Однако в случае с более сложными моделями следует следить за необходимостью их использования, иначе возможно неоправданное увеличение потребных временных и машинных ресурсов. Хотя в номинальном поле скорости судов полных обводов (танкер HSVA, танкер «Победа» проекта 12990) наблюдается обратный каскад турбулентности, приводящий к появлению мезомасштабных вихрей, при работе гребного винта, уменьшающего сдвиг скорости, этот эффект исчезает [44, 46]. Как следствие, для определения каких-либо параметров, например, нестационарных сил на гребном винте, уже не требуется использование более сложных моделей для расчета характеристик турбулентности.

Результаты визуализации мезомасштабных вихревых структур без учета работы гребного винта

и при работающем гребном винте представлены на рис. 7 (см. вклейку). Здесь

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{(V/L)^2}; \quad Q = 0,5 \cdot (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2),$$

где Ω – тензор завихренности, S – тензор скоростей деформаций, V – скорость судна, L – длина судна.

Масштабный эффект для вихревых структур существенно меньше, чем влияние работы гребного винта. Q -критерий позволяет визуализировать области с преимущественно сдвиговым или вихревым характером течения. Положительные значения Q соответствуют областям с преимущественно вихревым движением, отрицательные – областям, в которых преобладает сдвиговое течение. Т.е. на рисунке представлены границы области именно вихревого течения, соответствующие определенной интенсивности.

Показательным в этом плане является использование численных методов для оценки масштабного эффекта поля скорости с работающим гребным винтом [47]. Для проектирования ряда энергосберегающих устройств (ЭУ) требуется знание поля скоростей в месте расположения ЭУ при работающем гребном винте. Традиционно при этом элементы ЭУ проектируют исходя из поля скоростей, определенного в условиях модельного эксперимента. В связи с тем, что изменение в натуральных условиях потока, натекающего на ЭУ, может быть весьма значительным, для сохранения эффективности ЭУ требуется соответствующая корректировка его элементов.

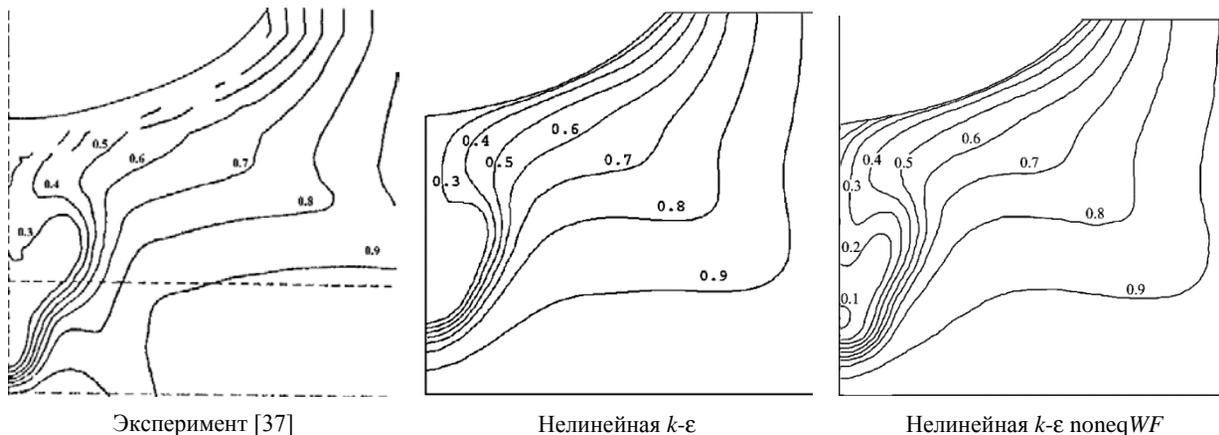


Рис. 6. Модель танкера HSVA. Поле продольной скорости в плоскости диска гребного винта ($x/L_{pp} = 0,976$). Расчет с использованием Star CD

Fig 6. Tanker model tested in Hamburg Ship Model Basin (HSVA). Longitudinal velocity field in propeller plane ($x/L_{pp} = 0.976$). Calculation in Star CD software

В качестве примера на рис. 8 приведены распределения угла натекания $\gamma = \arctg(V_r/V_x)$ на входе преднасадки при модельном и натурном числах Рейнольдса для танкера «Победа» (проект 12990). Здесь V_r – радиальная составляющая скорости, V_x – продольная составляющая скорости. Измерения выполнялись на входе преднасадки при работающем гребном винте, но без преднасадки. Именно этот угол используется как входная информация в ряде методов проектирования преднасадок.

Учитывая достаточно хорошее согласование численных и экспериментальных данных по углам натекания в модельных условиях, представляется целесообразным элементы натурной преднасадки проектировать исходя именно из углов натекания, полученных для натуральных условий с использованием численного метода. Использование при проектировании углов, полученных в модельных условиях, может привести к снижению эффективности преднасадки.

Хотя данная задача (оценка поля скорости в натуральных условиях) и относится к традиционным [20], фактически инженерные методики для такого случая отсутствуют. Причем хотя для номинального поля скорости при использовании популярных двухпараметрических моделей турбулентности согласование расчета и эксперимента для данного объекта хуже, чем представленное на рис. 5, результат с учетом работы гребного винта при использовании этих же моделей оказывается вполне приемлемым (рис. 8).

Определение коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом судна

Determination of propeller hull-interaction coefficients

Проблема качественного тестирования разрабатываемых методик численного моделирования в данном случае заключается в том, что в натуральных условиях коэффициенты взаимодействия определяются косвенным методом. Измеряется в натуре в основном момент на валу гребного винта. Фактически традиционные методики пересчета валидируются по конечному результату – расчетам ходкости [12]. Аналогичная [12] работа для численного моделирования выполнена в рамках ОКР «Виртуал-ТК»¹.

¹ Государственный контракт № 19411.1810190019.09.014 от 11 ноября 2019 г. Минпромторг России.

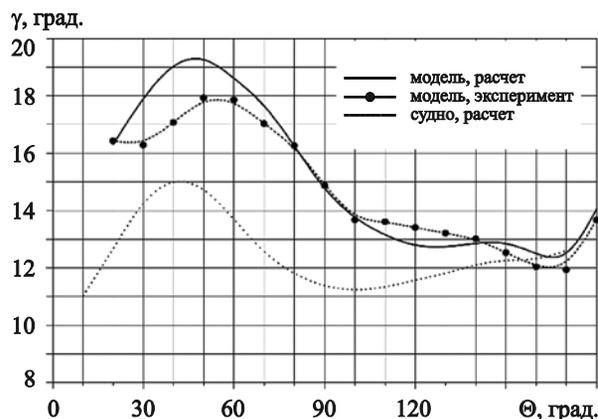


Рис. 8. Распределение углов натекания потока на элементы преднасадки в плоскости 19,5 шп. на входе преднасадки на модели проекта 12990 при работе гребного винта ($J = 0,7$)

Fig. 8. Distribution of inflow angles at pre-nozzle inlet (Frame Station 19.5) of Project 12990 model with operating propeller ($J = 0.7$)

Тем не менее видится рациональным представить здесь более ранние расчеты [48, 49], нацеленные на определение именно попутного потока и сопоставление результатов расчета и эксперимента по измерению момента на гребном винте. Анализ результатов расчетов ходкости, выполненных в ОКР «Виртуал-ТК», и их сопоставление с данными ходовых испытаний будут представлены в отдельной статье. Одно из существенных отличий новых результатов от [48, 49] заключается в более корректном учете шероховатости.

Представление о точности используемого метода при расчете коэффициентов взаимодействия в модельных условиях дают результаты, изложенные в [48, 49]. Здесь же прежде всего приведем расчеты коэффициентов момента и попутного потока для модельных и натуральных условий.

На рис. 9 (см. вклейку) приведены результаты измерений коэффициента момента K_Q для условий проведения модельного эксперимента и для натуральных испытаний. Натурные измерения проводились при ходовых испытаниях двух танкеров проекта 12990: «Победа» и «Маршал Василевский». В расчетах для гладкого гребного винта наблюдается некоторое занижение коэффициента момента.

Поскольку используемый при расчетах метод позволяет учитывать шероховатость как корпуса, так и гребного винта, то были дополнительно выполнены расчеты с шероховатостью на винте. В натуральных условиях измерения шероховатости гребного винта не производились, поэтому исполь-

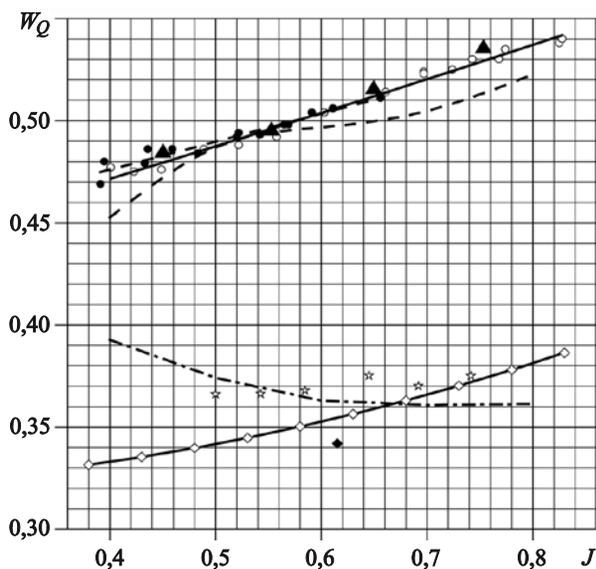


Рис. 10. Зависимость коэффициента попутного потока W_Q от поступи при модельных и натуральных числах Рейнольдса [48, 49]

Fig. 10. Wake fraction W_Q as function of advance ratio for model and full-scale Reynolds numbers [48, 49]

W_Q Эксперимент
 ○ — $v = 1,4 \text{ м/с}$ (17 точек)
 ● — $n = 11,5 \text{ об/с}$ (14 точек)
 ▲ $v = 1,4 \text{ м/с}$, средние значения (14 точек на каждой поступи)
 ☆ испытания в полимере
Расчет
 --- $Rn = 8,872 \cdot 10^6$
 --- $Rn = 1,632 \cdot 10^9$
Пересчет
 —◇— метод ИТТС
Натурные данные
 ◆ «Победа»

зованы данные [50] как типичные. Причем учет шероховатости проводился с использованием заложенного в программное обеспечение понятия «эквивалентной песочной шероховатости».

В настоящее время учет шероховатости выполняется иначе [6]. Функция шероховатости остается двухпараметрической, но коэффициенты находятся по специальной процедуре по результатам, опубликованным в [50]. В качестве среднего размера зерна «песочной шероховатости» приняты значения 7 и 10 мкм, что в некоторой степени соответствует данным по катодному осадку (с учетом понятия «эквивалентной песочной шероховатости»). Как видно, учет шероховатости винта приводит к значительному улучшению согласования расчетов и натуральных измерений.

На рис. 10 для этого же объекта приведены результаты расчета коэффициента попутного потока W_Q для модельных и натуральных условий и результаты модельных экспериментов. Для численного определения попутного потока использовалась та же методика, что и при экспериментальном его определении. Экспериментальные данные приведены для чистой воды и для испытаний в растворе полимера (по данным О.П. Орлова [51]). Здесь же приведены результаты определения коэффициента попутного потока по результатам ходовых испытаний, выполненные с использованием для оценки масштабного эффекта кривых действий гребного винта методики ИТТС-78 [20, 39].

Для более корректного сравнения следовало бы выполнить оценку коэффициента попутного потока, используя для оценки кривых действия не методику

ИТТС-78, а результаты расчета с использованием RANS метода. Однако для обработки натуральных измерений оставлен именно тот результат, что был получен сразу после проведения ходовых испытаний и используется для сравнения уже много лет.

Хотя RANS метод и методика ИТТС-78 [39] дают различные наклоны кривых в зависимости от поступи, на рабочей поступи $J = 0,6087$ эти методы дают близкие результаты, лежащие между результатами О.П. Орлова для раствора полимера и натурным значением. Здесь следует отметить, что эксперимент О.П. Орлова скорее всего дает «оценку сверху», т.к. в растворе полимера коэффициент сопротивления при проведении экспериментов оказался выше, чем прогнозируемый для натуральных условий.

Результаты испытаний в растворе полимера, снижающего вязкостное сопротивление, приведены здесь в связи с тем, что, с точки зрения О.П. Орлова [52], указанные испытания позволяют в случае равенства коэффициентов сопротивления модели корпуса коэффициенту сопротивления натурального судна получать все безразмерные характеристики течения (включая коэффициент попутного потока) равными соответствующим безразмерным характеристикам в натуральных условиях.

Такая точка зрения, однако, не является общепринятой. Кроме того, обсуждение данного вопроса выходит за рамки статьи. Здесь важно, что и результаты численного моделирования, и испытания в растворе полимера дают качественно правильную тенденцию. Для качественных выводов испытания в растворе полимера, с точки зрения автора данной статьи, являются вполне представительными.

Также следует отметить, что обтекание корпуса этого судна, как показывают и расчетные, и экспериментальные данные для модельных условий, происходит без существенных отрывных явлений. Ранее было показано, что для таких обводов практически все методы, включая традиционные, дают при расчетах ходкости близкий результат, совпадающий с ходовыми испытаниями [53].

При расчете обтекания других объектов, выполненных в Крыловском центре, в частности для судов, обтекающихся с развитым отрывом потока, только метод, основанный на расчете обтекания корпуса судна RANS методом, позволяет получить соответствие прогноза результатам ходовых испытаний. Такой метод может быть использован для судов практически любого типа и любой формы обводов.

Заключение

Conclusion

Представленные в данной работе примеры показывают, что численные методы решения уравнений Рейнольдса (RANS методы) уже достигли такого уровня развития, что стало возможным их использование для прогнозирования масштабного эффекта при решении традиционных задач, характерных для судостроения и эксплуатации флота.

Использование подобных методов позволяет учитывать при определении масштабного эффекта конкретные локальные особенности обтекания корпуса судна и движителя. Например, особенности геометрии объектов (интерцепторы, реданы, нестандартная форма лопастей), особенности течения (отрывы потока, зоны ламинарно-турбулентного перехода, подача полимера или воздуха), различные виды шероховатости обтекаемых поверхностей.

Автор приносит благодарность своим коллегам, результаты совместной работы с которыми с начала 1980-х гг. и до нынешнего времени в той или иной мере использованы в данной публикации, прежде всего Г.И. Каневскому, С.Н. Кругловой, И.А. Чичерину, А.Е. Егоровой, К.Е. Сазонову, Н.А. Овчинникову, А.В. Пустошному, Д.М. Денисихиной, Д.В. Багаеву, А.Е. Таранову, а также многим другим, которые помогали в выполнении как численных, так и экспериментальных исследований.

Список использованной литературы

1. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика: теория и приложения к геофизической гидродинамике. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. 256 с.
2. *Лобачев М.П., Сазонов К.Е., Чичерин И.А.* Модельный и численный эксперимент в теории корабля // Проблемы масштабного эффекта в гидродинамике : сборник статей к 100-летию со дня рождения Ю.В. Кривцова. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001. С. 33–45.
3. Соотношение расчетных и экспериментальных методов в современной гидродинамике судна / *А.В. Пустошный, В.О. Борушевич, В.В. Магаровский, А.Е. Таранов* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 2(392). С. 36–50. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-36-50.
4. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений / *Д.В. Багаев, С.В. Егоров, М.П. Лобачев* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 46–56. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-46-56.
5. *Таранов А.Е.* Определение локальных и интегральных гидродинамических характеристик контейнеровоза в цифровом бассейне // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). С. 73–82. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82.
6. *Лобачев М.П., Рудниченко А.А.* Определение ходовых качеств судна с использованием современных методов численного моделирования // Суперкомпьютерные дни в России : труды международной конференции. Москва : МАКС Пресс, 2023. С. 110–124.
7. Особенности использования численного моделирования при проектировании объектов морской техники / *А.Е. Таранов, Т.И. Сайфуллин, А.А. Рудниченко, С.В. Егоров* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 386(4). С. 28–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-28-40.
8. *Овчинников Н.А.* Эффективность использования суперкомпьютера при решении задач вычислительной гидродинамики // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. Москва : Изд-во Московского ун-та, 2014. С. 39–52.
9. *Лобачев М.П.* Масштабный эффект в задачах корабельной гидродинамики: проблемы экспериментальной и численной оценки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. Вып. 2(408). С. 35–52.
10. *Каневский Г.И., Штумпф В.М.* Измерения и сопоставительный анализ характеристик пограничного слоя на корпусе крупнотоннажного танкера в натуральных и модельных условиях // Материалы по обмену опытом / НТО им. акад. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1977. Вып. 249 : Экспериментальная гидромеханика судна. С. 47–54.
11. *Каневский Г.И., Александров С.А.* Определение характеристик пограничного слоя в натуральных условиях

- на крупнотоннажном танкере «Крым» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 3(405). С. 15–25. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-15-25.
12. Александров С.А., Каневский Г.И. Исследование влияния масштабного эффекта на гидродинамические характеристики и ходовые качества двухвального грузопассажирского судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 3(401). С. 19–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-19-27.
 13. Масштабный эффект в задачах судостроения – современные возможности оценки / М.П. Лобачев, Н.А. Овчинников, А.Е. Таранов, И.А. Чичерин // Суперкомпьютерные дни в России : труды международной конференции. Москва : МГУ, 2016. С. 232–244.
 14. Внедрение методов суперкомпьютерной оптимизации в процесс проектирования водометных движителей / М.П. Лобачев, А.А. Рудниченко, Т.И. Сайфуллин, А.Е. Таранов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1(399). С. 49–54. DOI 10.24937/2542-2324-2022-1-399-49-54.
 15. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
 16. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer : proceedings of the Fourth International Symposium. New York : Begell House, 2003. P. 625–632.
 17. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчета вязкостного сопротивления транспортных судов / Д.М. Денисихина, М.П. Лобачев, А.В. Пустошный, И.А. Чичерин // Морской вестник. 2008. № 3(27). С. 95–100.
 18. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities / M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin // International journal of heat and fluid flow. 2008. Vol. 29, No. 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
 19. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki [et al.] // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
 20. Справочник по теории корабля : В 3 т. Т. 1 : Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
 21. Развитие методов прогнозирования ходовых качеств транспортных судов / В.О. Борусевич, Г.И. Каневский, С.В. Капранцев [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 21–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-21-28.
 22. The Propulsion committee : final report and recommendations to the 23rd ITTC // Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference (ITTC 2002). Venice, 2002. Vol. 1. P. 89–151.
 23. Denisov V.I., Pashin V.M., Tumashik A.P. Investigation into the influence of ship hull roughness and scale effect upon hull-propeller interaction // Proceedings of Fourth international symposium on practical design of ships and mobail units (PRADS). Varna, 1989. P. 128 (p. 1–6).
 24. Chicherin I.A., Lobachev M.P. Application of RANS-CODE to ship designing practical problem // Proceedings of IX International Maritime Association of Mediterranean Congress (IMAM'2000). Napoli, 2000. Vol. 3. P. 1–8.
 25. Андреев А.В., Багаев Д.В. Расчет полного сопротивления модели танкера-газовоза // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78(362). С. 85–90.
 26. Егорова Е.Ю., Лобачев М.П. Оценка погрешности результатов буксировочных испытаний эталонной модели МКОБ (HALMATIC) в глубоководном опытовом бассейне // Проблемы практического прогнозирования сопротивления воды движению судов : сборник статей к 100-летию со дня рождения И.В. Гирса. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2002. С. 60–85.
 27. Егорова Е.Ю., Лобачев М.П. Использование метода наименьших квадратов для обработки и оценки погрешности результатов измерений // Проблемы практического прогнозирования сопротивления воды движению судов : сборник статей к 100-летию со дня рождения И.В. Гирса. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2002. С. 122–142.
 28. Лобачев М.П. Масштабный эффект в задачах судостроения – современное состояние проблемы // Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа : XLIII Крыловские чтения : доклады науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2009. С. 9–13.
 29. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Ленинград : Судостроение, 1972. 512 с.
 30. Козлов Л.Ф., Бабенко В.В. Экспериментальные исследования пограничного слоя. Киев : Наукова думка, 1978. 184 с.
 31. Proceedings of the 8th International Towing Tank Conference (Madrid, 15–23 September, 1957) / ed. M.L. Acevedo, L. Mazarredo. Madrid, 1959. 347 p.
 32. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва : Наука, 1969. 742 с.

33. *Schoenherr K.E.* Resistance of flat surfaces // Transactions of SNAME. 1932. Vol. 40. P. 279–313.
34. *Grigson C.W.B.* A planar friction algorithm and its use in analysing hull resistance // Transactions of RINA. 1999. Vol. 142. P. 76–115.
35. The proposal of a new friction line / *T. Katsui, H. Asai, Y. Himeno, Y. Tahara* // Proceedings of Fifth Osaka colloquium on advanced CFD applications to ship flow and hull form design. Osaka, 2005. P. 76–83.
36. *Eca L., Hoekstra M.* On the accuracy of the numerical prediction of scale effects on ship viscous resistance // International conference on computational methods in marine engineering (Marine 2005). Barcelona : CIMNE, 2005. P. 254–263.
37. *Larsson L., Stern F., Bertram V.* Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: The Gothenburg 2000 Workshop // Journal of ship research. 2003. Vol. 47. No. 1. P. 63–81. DOI: 10.5957/jsr.2003.47.1.63.
38. *Chicherin I.A., Pustoshny A.V.* Discussion on the Report of the 23rd ITTC Propulsion Committee: Some comments on the Chapters “Form factor prediction from The Gothenburg 2000 Workshop” and “Development of the formulation of the flat friction line” // Proceedings of the 23rd International towing tank conference (ITTC 2002). Venice, 2002. Vol. 3. P. 679–681.
39. ITTC : Recommended procedures and guidelines : 7.5–02–03–1.4. 1978 ITTC Performance Prediction Method : Rev. 04 / Ed. Propulsion committee of the 28th ITTC. [S. l.], 2017. 15 p.
40. *Chicherin I.A., Lobachev M.P.* Scaling of towing resistance using RANS CODE // Proceedings of 10th International conference on hydrodynamics (ICHHD-2012). St. Petersburg, 2012. Vol. 1. P. 155–159.
41. *Таранов А.Е., Лобачев М.П.* Определение гидродинамических характеристик моделей гребных винтов с учетом ламинарно-турбулентного перехода // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 47–54.
42. *Егорова Е.Ю., Лобачев М.П.* Анализ составляющих случайной погрешности измерений характеристик гребных винтов в воде // Морской вестник. 2004. № 1. С. 75–77.
43. *Лобачев М.П., Чичерин И.А.* Оценка масштабного эффекта поля скоростей и вязкостного сопротивления корпуса судна на основе решения уравнений Рейнольдса // Проблемы масштабного эффекта в гидродинамике : сборник статей к 100-летию со дня рождения Ю.В. Кривцова. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001. С. 19–32.
44. *Лобачев М.П.* Исследование особенностей течения вязкой жидкости в кормовой оконечности судов с полными обводами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 78(362). С. 5–28.
45. *Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
46. *Лобачев М.П., Багаев Д.В.* Экспериментальное и численное исследование механизма формирования течения в кормовой оконечности судов полных обводов / Модели и методы аэродинамики : Материалы 14-й международной школы-семинара. Евпатория : Московский центр непрерывного математического образования, 2014. С. 99–100.
47. *Лобачев М.П., Чичерин И.А.* Расчетная оценка масштабного эффекта поля скоростей с учетом работы гребного винта // Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики : XXXIX Крыловские чтения : тезисы докл. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 1999. С. 20–21.
48. *Багаев Д.В., Лобачев М.П., Овчинников Н.А.* Определение масштабного эффекта коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом на основе решения уравнений Рейнольдса // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 59–72.
49. Prediction of the scale effect for the hull-propeller interaction factors / *D.V. Bagaev, M.P. Lobachev, N.A. Ovchinnikov, A.E. Taranov* // Proceedings of 5th International conference on computational methods in marine engineering (Marine 2013). Barcelona : Int. Center for numerical methods in engineering, 2013. P. 699–710.
50. *Каневский Г.И., Круглова С.Н., Лобачев М.П.* Исследование влияния шероховатости лопастей на гидродинамические характеристики гребных винтов // Судостроительная промышленность. Серия: Проектирование судов. 1987. Вып. 4. С. 11–16.
51. *Орлов О.П.* Масштабные эффекты гидродинамических и кинематических характеристик корпуса и гребного винта одновального танкера полных обводов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 4(390). С. 33–46. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-33-46.
52. *Орлов О.П., Пашин В.М.* Развитие принципов физического моделирования вязкостного течения в турбулентном пограничном слое и следе кораблей и судов / Академик А.Н. Крылов. К 150-летию со дня рождения. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2013. С. 33–64.
53. *Егорова Е.Ю., Лобачев М.П., Чичерин И.А.* Расчетное определение коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1997. Вып. 6(290) : Мореходность и ходкость судов. С. 86–93.

References

1. *Barenblatt G.I.* Similarity, self-similarity, intermediate asymptotics: theory and applications to geophysical hydrodynamics. 2nd edition, rev. and enl. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1982. 256 p. (in Russian).
2. *Lobachev M.P., Sazonov K.E., Chicherin I.A.* Model and numerical experiment in ship theory // Scale effect in hydrodynamics : Compendium of papers to the 100th anniversary of Yu. Kriktsov. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2001. P. 33–45 (in Russian).
3. Computational and experimental methods in modern ship hydrodynamics / *A.V. Pustoshny, V.O. Borusevich, V.V. Magarovsky, A.E. Taranov* // Transactions of Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 2(392). P. 36–50. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-36-50 (in Russian).
4. Validation of numerical simulation technology for cavitating flows / *D.V. Bagaev, S.V. Egorov, M.P. Lobachev* [et al.] // Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 4(382). P. 46–56. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-46-56 (in Russian).
5. *Taranov A.E.* Determination of local and integral hydrodynamic parameters for container cargo carrier in Digital Test Tank // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 3(389). P. 73–82. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82 (in Russian).
6. *Lobachev M.P., Rudnichenko A.A.* Determination of ship performance using modern numerical modeling methods // Supercomputing Days in Russia : Proceedings of the International Conference. Moscow : MAKS Press, 2023. P. 110–124 (in Russian).
7. Application specifics of numerical simulation in design of marine structures / *A.E. Taranov, T.I. Saifullin, A.A. Rudnichenko, S.V. Egorov* // Transactions of Krylov State Research Centre. 2018. Vol. 386(4). P. 28–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-28-40 (in Russian).
8. *Ovchinnikov N.A.* Efficiency of supercomputer in solving computational fluid dynamics problems // Supercomputer technologies in science, education and industry. Moscow : Publishing House of the Moscow University, 2014. P. 39–52 (in Russian).
9. *Lobachev M.P.* Scale effect in marine hydrodynamics: challenges of experimental and numerical assessment // Transactions of Krylov State Research Centre. 2024. Vol. 2(408). P. 35–52 (in Russian).
10. *Kanevsky G.I., Shtumpf V.M.* Measurements and comparative analysis of boundary layer characteristics on large-capacity tanker hull in full-scale and model conditions // Materials for the exchange of best practices / Krylov Scientific and Technical Society. Leningrad : Sudostroeniye, 1977. Vol. 249 : Experimental ship hydro-mechanics. P. 47–54 (in Russian).
11. *Kanevsky G.I., Alexandrov S.A.* Full-scale boundary layer measurement at *Krym* supertanker // Transactions of Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 3(405). P. 15–25. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-15-25 (in Russian).
12. *Alexandrov S.A., Kanevsky G.I.* Investigation of scale effect on hydrodynamic characteristics and propulsion performance of twin-shaft cargo/passenger vessel // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 3(401). P. 19–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-19-27 (in Russian).
13. Scale effect in shipbuilding – modern assessment possibilities / *M.P. Lobachev, N.A. Ovchinnikov, A.E. Taranov, I.A. Chicherin* // Supercomputer days in Russia : Proceedings of the international conference. Moscow : Moscow State University, 2016. P. 232–244 (in Russian).
14. Introduction of supercomputer-based optimization methods to waterjet design / *M.P. Lobachev, A.A. Rudnichenko, T.I. Saifullin, A.E. Taranov* // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 1(399). P. 49–54. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-49-54 (in Russian).
15. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
16. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer : proceedings of the Fourth International Symposium. New York : Begell House, 2003. P. 625–632.
17. Influence of a choice of a turbulence model on an accuracy of calculation of viscosity resistance of transport vessels / *D.M. Denisikhina, M.P. Lobachev, A.V. Pustoshny, I.A. Chicherin* // Morskoy Vestnik. 2008. No. 3. P. 95–100 (in Russian).
18. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities / *M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin* // International journal of heat and fluid flow. 2008. Vol. 29, No. 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
19. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki* [et al.] // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
20. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [Ya. Voitskunsky et al.]. Leningrad : Sudostroeniye, 1985. 764 p. (in Russian).
21. Developing prediction methods for propulsion performance of carrier ships / *B.V. Borusevich, G.I. Kanevsky,*

- S.V. Kaprantsev [et al.] // Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 4(382). P. 21–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-21-28 (*in Russian*).
22. The Propulsion committee : final report and recommendations to the 23rd ITTC // Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference (ITTC 2002). Venice, 2002. Vol. 1. P. 89–151.
23. Denisov V.I., Pashin V.M., Tumashik A.P. Investigation into the influence of ship hull roughness and scale effect upon hull-propeller interaction // Proceedings of Fourth international symposium on practical design of ships and mobail units (PRADS). Varna, 1989. P. 128 (p. 1–6).
24. Chicherin I.A., Lobachev M.P. Application of RANS-CODE to ship designing practical problem // Proceedings of IX International Maritime Association of Mediterranean Congress (IMAM'2000). Napoli, 2000. Vol. 3. P. 1–8.
25. Andreev V.A., Bagaev D.V. Calculation of total resistance for a gas carrier model // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2013. Vol. 78(362). P. 85–90 (*in Russian*).
26. Yegorova Ye., Lobachev M.P. Accuracy assessment of towing test data for ITTC benchmark test model (HALMATIC) in Deepwater Test Tank of KSRI // Challenges in practical resistance predictions for ships : Compendium of papers to the 100th anniversary of I. Girs. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2002. P. 60–85 (*in Russian*).
27. Yegorova Ye., Lobachev M.P. Application of least-square method for processing and accuracy assessment of measurement data // Challenges in practical resistance predictions for ships : Compendium of papers to the 100th anniversary of I. Girs. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2002. P. 122–142 (*in Russian*).
28. Lobachev M.P. Scale effect in shipbuilding problems: state of the art // Message read at scientific & technical conference Seakeeping performance of ships, marine hydrodynamics and offshore development challenges (43rd Krylov Readings). St. Petersburg, 2009. P. 9–13. (*in Russian*).
29. Katsman F.M., Pustoshny A.F., Shtumpf V.M. Propulsion performance of sea-going ships. Leningrad : Sudostroyeniye, 1972. 512 p. (*in Russian*).
30. Kozlov L.F., Babenko V.V. Experimental Study of a boundary layer. Kiev : Naukova dumka, 1978. 184 p. (*in Russian*).
31. Proceedings of the 8th International Towing Tank Conference (Madrid, 15–23 September, 1957) / Ed. M.L. Acevedo, L. Mazarredo. Madrid, 1959. 347 p.
32. Schlichting H. Grenzschicht-Theorie (*Russian translation*). Moscow : Nauka, 1969. 742 p.
33. Schoenherr K.E. Resistance of flat surfaces // Transactions of SNAME. 1932. Vol. 40. P. 279–313.
34. Grigson C.W.B. A planar friction algorithm and its use in analysing hull resistance // Transactions of RINA. 1999. Vol. 142. P. 76–115.
35. The proposal of a new friction line / T. Katsui, H. Asai, Y. Himeno, Y. Tahara // Proceedings of Fifth Osaka colloquium on advanced CFD applications to ship flow and hull form design. Osaka, 2005. P. 76–83.
36. Eca L., Hoekstra M. On the accuracy of the numerical prediction of scale effects on ship viscous resistance // International conference on computational methods in marine engineering (Marine 2005). Barcelona : CIMNE, 2005. P. 254–263.
37. Larsson L., Stern F., Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: The Gothenburg 2000 Workshop // Journal of ship research. 2003. Vol. 47, No. 1. P. 63–81. DOI: 10.5957/jsr.2003.47.1.63.
38. Chicherin I.A., Pustoshny A.V. Discussion on the Report of the 23rd ITTC Propulsion Committee: Some comments on the Chapters “Form factor prediction from The Gothenburg 2000 Workshop” and “Development of the formulation of the flat friction line” // Proceedings of the 23rd International towing tank conference (ITTC 2002). Venice, 2002. Vol. 3. P. 679–681.
39. ITTC : Recommended procedures and guidelines : 7.5–02–03–1.4. 1978 ITTC Performance Prediction Method : Rev. 04 / Ed. Propulsion committee of the 28th ITTC. [S. l.], 2017. 15 p.
40. Chicherin I.A., Lobachev M.P. Scaling of towing resistance using RANS CODE // Proceedings of 10th International conference on hydrodynamics (ICH2012). St. Petersburg, 2012. Vol. 1. P. 155–159.
41. Taranov A.E., Lobachev M.P. Determination of propeller models hydrodynamic performance in terms of laminar-turbulent transition // Transactions of Krylov State Research Centre. 2015. Vol. 90(374). P. 47–54 (*in Russian*).
42. Egorova E.Yu., Lobachev M.P. Components of random error analysis in measuring propellers performance in water // Morskoy Vestnik. 2004. Vol. 1. P. 75–77 (*in Russian*).
43. Lobachev M.P., Chicherin I.A. Assessing scale effect for velocity field and viscous resistance of hull based on Reynolds equations // Scale effect in hydrodynamics : Compendium of papers to the 100th anniversary of Yu. Krivtsov. St. Petersburg, 2001. P. 19–32 (*in Russian*).
44. Lobachev M.P. Investigation of viscous liquid flow specifics at the aft end of full lined ship // Transactions of Krylov State Research Centre. 2015. Vol. 78(362). P. 5–28 (*in Russian*).
45. Garbaruk A.V., Strelets M.H., Shur M.L. Turbulence modeling in calculations of complex flows : tutorial. St. Petersburg : Polytechnic University Publishing House. 2012. 88 p. (*in Russian*).

46. *Lobachev M.P., Bagaev D.V.* Experimental and numerical study of flow formation mechanism in the aft end of full lined ship // Models and methods of aerodynamics : Materials of the 14th International School Seminar. Yevpatoria : Moscow Centre for Continuing Mathematical Education, 2014. P. 99–100 (*in Russian*).
47. *Lobachev M.P., Chicherin I.A.* Design estimation of wake scale effect in terms of propeller operation // Ship seaworthiness and hydromechanics issues : 34th Krylov Readings : scientific & technical conference abstracts. St. Petersburg, 1999. P. 20–21 (*in Russian*).
48. *Bagaev D.V., Lobachev M.P., Ovchinnikov N.A.* Determination of propeller-hull interaction coefficients scale effect based on Reynolds equations solution // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2012. Vol. 69(353). P. 59–72 (*in Russian*).
49. Prediction of the scale effect for the hull-propeller interaction factors / *D.V. Bagaev, M.P. Lobachev, N.A. Ovchinnikov, A.E. Taranov* // Proceedings of 5th International conference on computational methods in marine engineering (Marine 2013). Barcelona: Int. Centre for numerical methods in engineering, 2013. P. 699–710.
50. *Kanevsky G.I., Kruglova S.N., Lobachev M.P.* Study of blade roughness effect on propellers hydrodynamic performance // Shipbuilding industry. Series: Ship Design. 1987. Vol. 4 (*in Russian*).
51. *Orlov O.P.* Scale effects of hull and propeller hydrodynamic and kinematic characteristics for full lined single-shaft container cargo carrier // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 4(390). P. 33–46. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-33-46 (*in Russian*).
52. *Orlov O.P., Pashin V.M.* Development of physical modeling principles for viscous flow in turbulent boundary layer and in wake of ships and vessels / On the 150th anniversary of birth of Academician A.N. Krylov. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2013. P. 33–64 (*in Russian*).
53. *Egorova E.Yu., Lobachev M.P., Chicherin I.A.* Analytical assessment of ship propeller-hull interaction coefficients // Transactions of Krylov Central Research Institute. 1997. Vol. 6(290): Ship seaworthiness and propulsion. P. 86–93 (*in Russian*).

Сведения об авторе

Лобачев Михаил Павлович, к.т.н., начальник отдела математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-99. E-mail: M_Lobachev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5669-9058>.

About the author

Mikhail P. Lobachev, Cand. Sci. (Eng), Head of Mathematical Simulation Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-99. E-mail: M_Lobachev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5669-9058>.

Поступила / Received: 20.03.24
Принята в печать / Accepted: 28.08.24
© Лобачев М.П., 2024

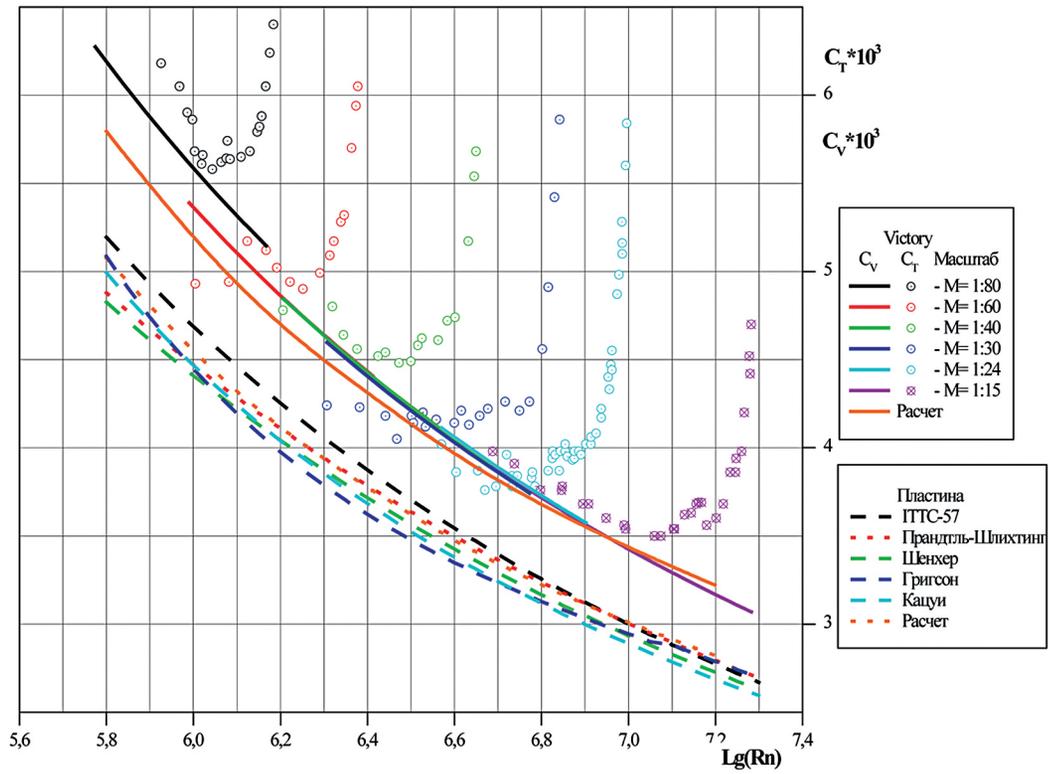


Рис. 1. Коэффициенты полного и вязкостного сопротивления моделей судна Victory
Fig. 1. Total and viscous resistance coefficients for Victory ship models

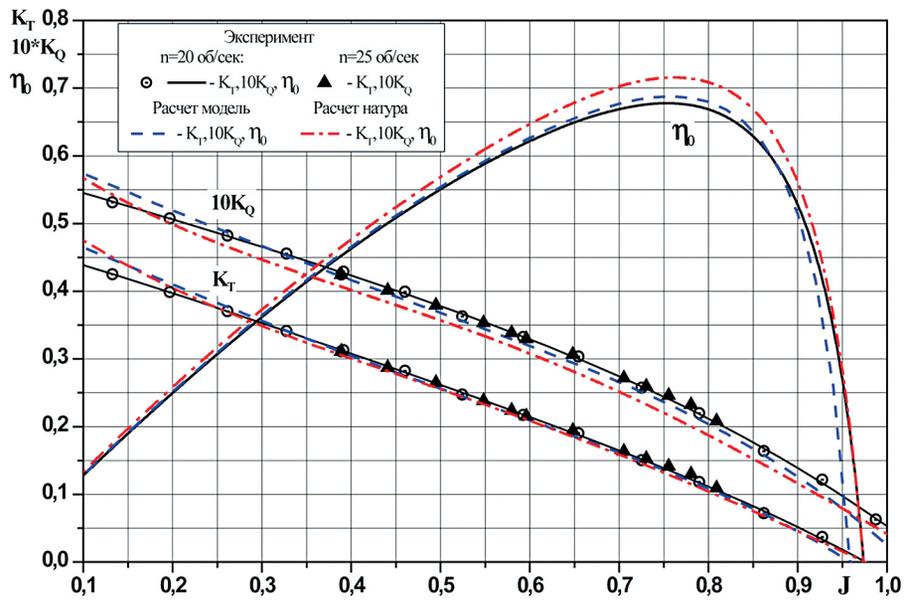


Рис. 3. Кривые действия гребного винта А [41]
Fig. 3. Performance curves of Propeller A [41]

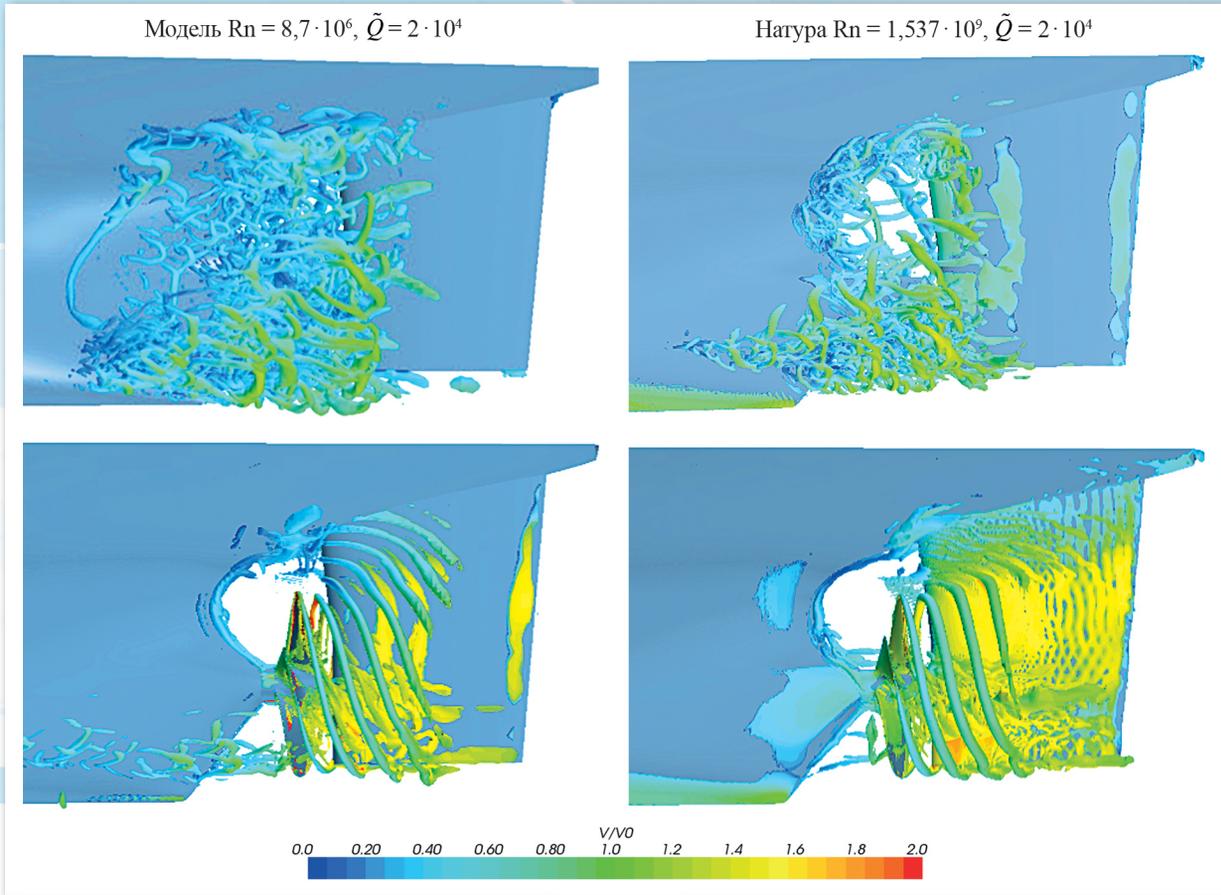


Рис. 7. Вихревые структуры в кормовой оконечности модели и судна танкера «Победа» без гребного винта и с гребным винтом ($J = 0,6$)

Fig 7. Vortex structures in the aft end of *Pobeda* tanker model with and without propeller ($J = 0,6$)

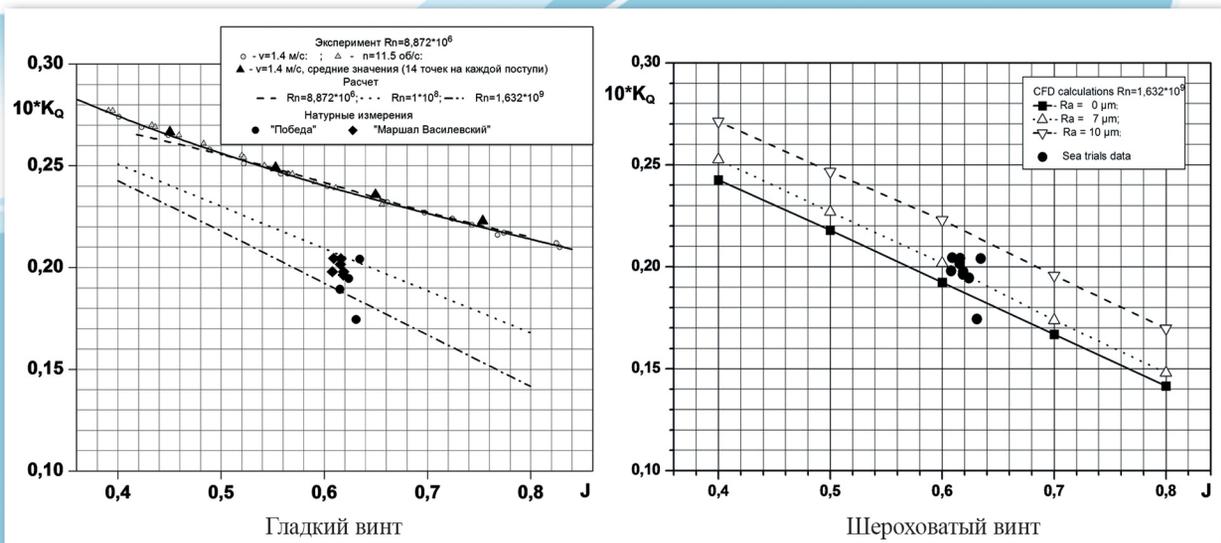


Рис. 9. Зависимости коэффициента момента гребного винта за корпусом от поступи

Fig. 9. Torque coefficient in behind condition as function of advance ratio