

УДК 532.517.4+629.5.018.8
EDN: JYOJBO

М.П. Лобачев 

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

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ В ЗАДАЧАХ КОРАБЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ: ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ

Объект и цель научной работы. В работе рассматривается структура задач, возникающих при оценке масштабного эффекта гидродинамических характеристик объектов морской техники. Под масштабным эффектом здесь понимается изменение гидродинамических характеристик объектов морской техники при переходе от условий модельного эксперимента к условиям, соответствующим эксплуатации натурального объекта. Анализ специфики возникающих при оценке масштабного эффекта задач выполняется как для методик оценки, основанных на пересчете результатов модельного эксперимента, так и для методов численного моделирования.

Материалы и методы. В работе использованы как результаты модельного эксперимента, так и результаты расчетов, выполненных на основе технологий численного моделирования. Характеристики течения вязкой жидкости вокруг объектов морской техники находились из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности.

Основные результаты. Показано, что с методологической точки зрения расчетный и экспериментальный методы определения характеристик объекта в натуральных условиях являются равноправными, а выбор того или иного подхода должен зависеть от решаемой задачи, с учетом требований к достоверности окончательного результата. При этом под окончательным результатом следует понимать характеристики натурального объекта.

Заключение. Современный уровень развития вычислительной техники и технологий численного моделирования турбулентных течений вязкой жидкости при модельных и натуральных условиях уже достиг такого развития, что стало возможным его использование для прогнозирования масштабного эффекта. Выбор традиционной методики пересчета данных модельных испытаний на натуре или численного моделирования зависит от наличия соответствующих валидированных методик, стоимости и сроков выполнения соответствующих работ. При этом для решения задач, для которых не накоплен достаточный для статистического анализа объем натуральных данных, использование численных методов может оказаться единственно разумной альтернативой.

Ключевые слова: модельный эксперимент, натурные условия, масштабный эффект, численное моделирование, турбулентность, уравнения Рейнольдса.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 532.517.4+629.5.018.8
EDN: JYOJBO

М.П. Lobachev 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

SCALE EFFECT IN MARINE HYDRODYNAMICS: CHALLENGES IN ITS EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ASSESSMENT

Object and purpose of research. This paper discusses the structure of tasks related to scale effect assessment for hydrodynamic characteristics of marine objects. Scale effect is the difference between model-scale and full-scale values of hydrodynamic characteristics for given object. The specifics of the tasks related to scale effect assessment is analysed for both numerical simulation methods and model test data extrapolation procedures.

Для цитирования: Лобачев М.П. Масштабный эффект в задачах корабельной гидродинамики: проблемы экспериментальной и численной оценки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 35–52.

For citations: Lobachev M.P. Scale effect in marine hydrodynamics: challenges in its experimental and numerical assessment. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 35–52 (in Russian).

Materials and methods. The study relies on both model test data and calculation results obtained as per numerical simulation technologies. Viscous flow parameters around marine objects were obtained through finite volume (FVM) solution of unsteady Reynolds equations (URANS) closed by semi-empirical turbulence model.

Main results. The paper shows that numerical calculation and experimental determination of full-scale object parameters are methodologically equivalent, so the choice between them should depend on given task, with consideration of reliability requirements to the final result, i.e. full-scale object parameters.

Conclusion. Today's computers and numerical simulation technologies for turbulent viscous flows in both model and full-scale conditions are powerful enough to enable predictions of scale effects. The choice between conventional extrapolation of model test data and numerical simulation depends on the availability of corresponding validated procedures, as well as on cost and timelines of given research project. For the tasks where available volume of full-scale data is not sufficient for statistical analysis, numerical simulation could be the only alternative.

Keywords: model test, full-scale conditions, scale effect, numerical simulation, turbulence, Reynolds equations.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Conclusion

Основным источником исходной информации для выполнения проектных работ в задачах корабельной гидродинамики и смежных областях в настоящее время 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 вынужденно 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.

В данной работе рассматривается структура масштабного эффекта. В этой части работа лежит в русле подходов, развитых А.Ф. Пустошным для анализа масштабных серий в начале 1960-х гг. [2]. Данные результаты частично были представлены на 43-й конференции «Крыловские чтения» в 2009 г. [3], а результаты использования численных методов для оценки масштабного эффекта – на международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» в 2016 г. [4].

Значительные успехи в решении конкретных задач с использованием численного моделирования в XXI веке были получены за счет перехода к использованию высокопроизводительных кластерных систем (суперкомпьютеров). Развитие методов математического моделирования также весьма способствовало внедрению расчетных методов в практику. Это и совершенствование методов решения линейных алгебраических уравнений, к которым

сводятся практически все решаемые задачи, и совершенствование методов моделирования (расчета) турбулентности. Сегодня большинство задач, характерных для корабельной гидродинамики, при математическом моделировании решаются на основе уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирическими моделями турбулентности [5–9].

Правильный выбор математических моделей, используемых при численном моделировании, весьма сильно влияет на точность расчетов. Особенно это относится к выбору модели турбулентности, что обусловлено отсутствием универсальной модели. Для каждого класса течений должна быть выбрана наиболее подходящая модель турбулентности. Даже использование метода отсоединенных вихрей (DES) не всегда гарантирует получение правильного результата. Так, если в основе этого метода будет лежать модель Спаларта – Алмареса, то, учитывая результаты работы [10], погрешность расчета будет неприемлемой, по крайней мере для вязкостного сопротивления. В этой связи утверждение в [11], что «в рамках применения URANS методов применение различных моделей турбулентности не привело к заметному повышению точности», представляется несколько неточным.

Несмотря на указанный выше недостаток (отсутствие универсальной модели турбулентности) использование в численных методах единой методологической основы в виде законов сохранения (количества движения, массы и т.д.) определяет коренное отличие численного моделирования от традиционных эмпирических методов расчета масштабного эффекта, делая его в достаточной степени универсальным.

Безусловно, в настоящее время полностью исключить введение корреляционных поправок в методики численного расчета масштабного эффекта не представляется возможным, однако их величина может быть значительно уменьшена. К таким кор-

реляционным поправкам, например, при расчете масштабного эффекта сопротивления корпуса, относится поправка на учет влияния сварных швов. Принципиально учет сварных швов в расчете вполне возможен, однако возрастание необходимых вычислительных ресурсов [12] сделает расчет излишне дорогостоящим. Величина же поправки будет весьма незначительной и может быть определена на основе сопоставления с ограниченным количеством ходовых испытаний. И представление такой поправки, как и некоторых других, возможно в универсальном виде, не зависящем от особенностей геометрии исследуемых объектов.

Структура масштабного эффекта

Structure of scale effect

Основная претензия к расчету – любой расчетный метод строится на основе идеальных представлений о физике явления. В результате достоверность метода априори ограничена используемой идеальной моделью, и нельзя получить новые данные, которые выходят за рамки этой физической модели. В то же время и эксперимент не свободен от идеализаций, хотя степень идеализаций чаще всего меньше, чем в расчете.

К идеализации в эксперименте следует отнести прежде всего замену объекта исследования. Испытывается не сам объект – реальный корпус судна, а его уменьшенная во много раз модель. В результате возникает необходимость дополнять эксперимент теоретическими построениями, зачастую не имеющими достаточного экспериментального подтверждения. Так, относительно формулы для экстраполятора трения ИТТС-57 с чисел Рейнольдса 10^6 – 10^7 до чисел Рейнольдса 10^9 в [13, с. 327] сказано: «Эта формула не имеет физического обоснования, но обеспечивает согласование результатов буксировочных испытаний в больших и малых бассейнах». О применении различных экстраполяторов трения можно получить представление по материалам [14].

Весьма примечательными являются также замечания о вводимых различными гидродинамическими центрами корреляционных коэффициентах в разделе 2.4.4 методики ИТТС-78 (МКОБ-78) [15]. Поэтому с методологической точки зрения расчетный и экспериментальный методы определения характеристик образца являются равноправными, а выбор должен зависеть от решаемой задачи, с учетом требований к достоверности окончательного результата. При этом под окончательным результа-

том следует понимать характеристики натурального объекта. Лежащая в основе как модельного (физического), так и численного экспериментов идеализация явлений порождает родственность подходов к рассмотрению их внутренних проблем.

А.Ф. Пустошный дает следующее определение [2]: «На практике под масштабным эффектом понимают расхождение в безразмерных коэффициентах геометрически подобных объектов, обусловленные не только тем, что они не удовлетворяют тем или иным критериям подобия, но и отклонением условий проведения эксперимента от принятых в системе анализа (метода пересчета)».

Согласно этому в проблеме масштабного эффекта выделяются две задачи. Одна из них – внешняя – связана с установлением зависимости исследуемых характеристик от числа Рейнольдса (или другого немоделируемого критерия) и разработкой практических способов экстраполяции результатов опыта на природу. Вторая задача – внутренняя – при экспериментальном подходе в основном касается причин расхождения безразмерных коэффициентов в области чисел Рейнольдса, соответствующих лабораторным условиям и, главным образом, влияния на получаемые результаты методологических погрешностей эксперимента.

В случае численных исследований для внутренней задачи можно сопоставить обеспечение адекватности используемой математической модели исследуемому явлению. Сюда же следует отнести вопросы, связанные с изменением свойств среды и различием подходов к определению искомых величин при переходе от лабораторных к натурным условиям. Причем это относится как к экспериментальным, так и к численным исследованиям.

Внешняя задача в проблеме масштабного эффекта

External problem in scale effect determination

Согласно данному выше определению внешняя задача в проблеме масштабного эффекта – это установление зависимости исследуемых характеристик от числа Рейнольдса (или другого немоделируемого критерия) и разработка практических способов экстраполяции результатов опыта на природу.

В решении задачи о масштабном эффекте можно выделить два основных направления: экспериментальное и численное. Экспериментальное направление связано с проведением испытаний масштабных серий моделей [2, 13, 14, 16, 17] или установлением корреляционных зависимостей на

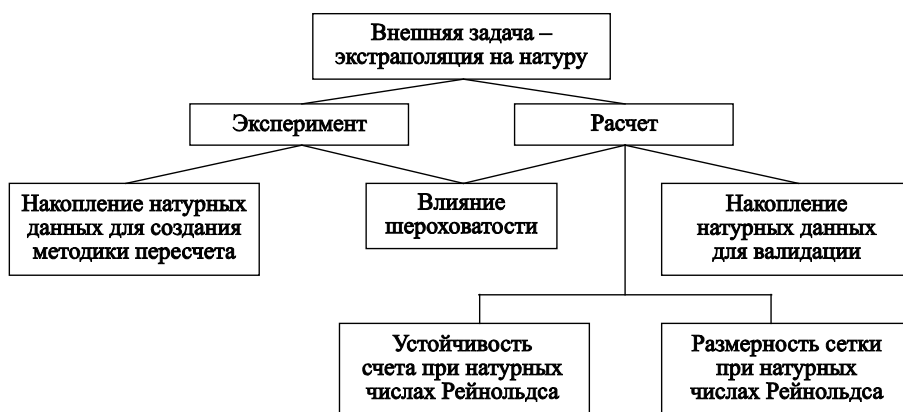


Рис. 1. Внешняя задача в проблеме масштабного эффекта

Fig. 1. External problem in scale effect determination

основе анализа результатов модельных и натуральных испытаний. Для последнего требуется наличие большого объема данных по натурным испытаниям. Анализ корреляции результатов модельных и натуральных испытаний лежит в основе метода прогнозирования ходовых качеств одновальных судов МКОБ-78 (ИТТС-78), когда анализировались результаты по более чем 400 судам [13].

В настоящее время такой подход в наибольшей степени характерен для деятельности компании MARIN (Вагенинген, Голландия), которая располагает большой базой результатов ходовых испытаний. Прежде всего именно о практике этой компании идет речь в уже упоминавшемся разделе 2.4.4 методики ИТТС-78 [15]. При численном моделировании возможно выполнение расчетов течений вязкой жидкости непосредственно для натуральных условий. Но те же данные натуральных испытаний требуются для валидации соответствующих методик, хотя уже в существенно меньшем объеме. Точно так же меньший объем натуральных данных используется для валидации методик пересчета данных модельных испытаний на природу при внесении изменений в уже разработанные методики [18]. Некоторые составляющие внешней задачи представлены на рис. 1.

В случае экспериментальных исследований для внешней задачи (экстраполяции данных на природу) существенным является учет влияния шероховатости. Он осуществляется на основе либо статистических данных, либо специально проведенных экспериментов. Следует отметить, что для численных исследований также необходимым является привлечение эмпирических данных для учета шероховатости.

На первый взгляд учет влияния шероховатости относится к внутренней задаче масштабного эф-

фекта: модель гладкая, а природа шероховатая. Однако на самом деле это внешняя задача. При масштабировании с природы на модель должны пересчитываться и геометрические характеристики шероховатости, так что для модельных условий шероховатость становится такой, что не оказывает влияния на гидродинамические характеристики объекта. Принятый для натуральных корпусов высотный параметр шероховатости $h = 150$ мкм [15] при масштабе модели 1:30 превращается в 5 мкм. Причем речь идет о параметре $h_{МАА}$ [15] или R_z [19]. Высотный параметр шероховатости 5 мкм соответствует гидродинамически гладкой поверхности. По использовавшемуся до 1975 г., но часто фигурирующему и сейчас понятию «класс чистоты обработки поверхности» такой размер соответствует поверхностям, шлифованным по 7-му классу.

В конце 1970-х – первой половине 1980-х гг. в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова был выполнен большой цикл работ, посвященный исследованию влияния шероховатости на сопротивление трения [20–23]. Полученные результаты были вполне приемлемыми для практического использования и вошли в руководящие документы [24]. Современный вариант традиционной методики пересчета на натурные условия кривых действия гребных винтов с использованием этих данных представлен в [18].

В большинстве коммерческих пакетов инженерного анализа для учета влияния шероховатости используется подход с так называемой эквивалентной песочной шероховатостью с двухпараметрической функцией шероховатости. Проявление песочной шероховатости автотомельно по числу Рейнольдса. Технологическая шероховатость в большинстве случаев, включая лакокрасочное покрытие и катодный осадок, неавтотомельна. По этой причине функции из данных пакетов можно использо-

вать в узком диапазоне чисел Рейнольдса. Для расширения возможностей использования подобных функций следует отказаться от концепции «песочной шероховатости» и перейти к трехпараметрическим зависимостям [22, 23].

К сожалению, при использовании существующих коммерческих программ (Fluent, CFX, Star CCM+ и подобных) это невозможно. Но для чисел Рейнольдса, построенных по высотному параметру шероховатости и динамической скорости, характерных для натуральных условий эксплуатации судов, для этих пакетов получены новые функции шероховатости [12] (свежеокрашенный корпус, достройки судна (до 11 месяцев), новый гребной винт, катодный осадок), которые могут быть использованы как при экстраполяции экспериментальных результатов, так и при численном определении натуральных характеристик обтекания корпусов судов и гребных винтов.

Для численного моделирования к внешней задаче можно отнести также обеспечение устойчивости счета и сокращение размерности расчетных сеток, следовательно, и требуемых машинных ресурсов, при натуральных числах Рейнольдса. Поскольку эти аспекты численного моделирования не относятся к «влиянию на получаемые результаты методологических погрешностей», а просто обеспечивают саму возможность «установления зависимости исследуемых характеристик от числа Рейнольдса», они отнесены именно к внешней задаче, а не к внутренней.

В силу специфики пристенных течений приходится использовать ячейки расчетной сетки с весьма большим отношением продольного и поперечного размера к размеру по нормали к твердой поверхности. При увеличении числа Рейнольдса это

отношение растет, в т.ч. именно из-за наличия таких ячеек в ряде случаев возникают неустойчивости в счете.

В ряде задач для решения этой проблемы возможны два пути: 1) создание устойчивых алгоритмов; 2) дробление ячеек в продольном и поперечном направлениях. Такое дробление приводит к значительному росту размерности сетки. Однако в настоящее время благодаря развитию вычислительной техники подобное увеличение размерности становится значительно менее критичным. Проблема устойчивости счета часто усугубляется еще и тем обстоятельством, что при переходе к натурным числам Рейнольдса отношение сил вязкостной природы к инерционным уменьшается и вязкость уже перестает в достаточной мере играть роль демпфирующего фактора, обеспечивающего более устойчивый счет. Особенно это заметно при расчетах кавитации гребных винтов за корпусом судна для натуральных условий.

Внутренняя задача в проблеме масштабного эффекта

Internal problem in scale effect determination

Согласно определению А.Ф. Пустошного внутренняя задача в проблеме масштабного эффекта – это влияние на результат погрешности методик исследования. Некоторые составляющие внутренней задачи представлены на рис. 2.

Для экспериментальных исследований это прежде всего несоответствие режима течения. Если при натуральных числах Рейнольдса течение всегда практически полностью турбулентное, то при модельных числах Рейнольдса имеется значительный ламинарный участок. При испытаниях моделей

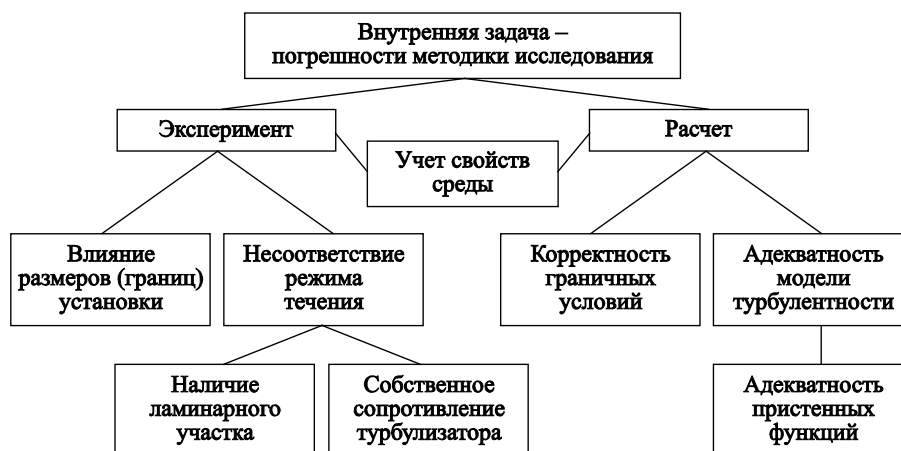


Рис. 2. Внутренняя задача в проблеме масштабного эффекта

Fig. 2. Internal problem in scale effect determination

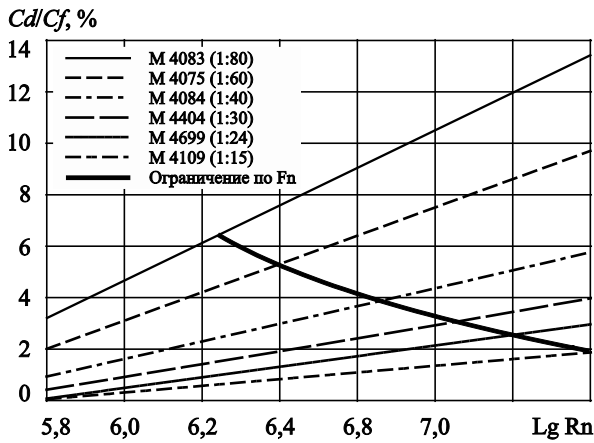


Рис. 3. Собственное сопротивление турбулизатора C_d в долях от сопротивления эквивалентной плоской пластины C_f

Fig. 3. Turbulizer's own resistance C_d as percentage of equivalent plate resistance C_f

корпусов судов для устранения ламинарного обтекания используется искусственная турбулизация течения. Для моделей больших размеров эту задачу можно до некоторой степени считать решенной (при строгом соблюдении методик установки турбулизаторов и проведения буксировочных испытаний) [14, 25].

Однако при испытаниях масштабных серий для малых моделей сопротивление турбулизаторов составляет заметную долю от сопротивления самих моделей [26]. В т.ч. и этим обусловлен т.н. кризис малых бассейнов: малый размер турбулизатора не обеспечивает эффективную турбулизацию течения, большой – дает слишком большую добавку в сопротивление модели.

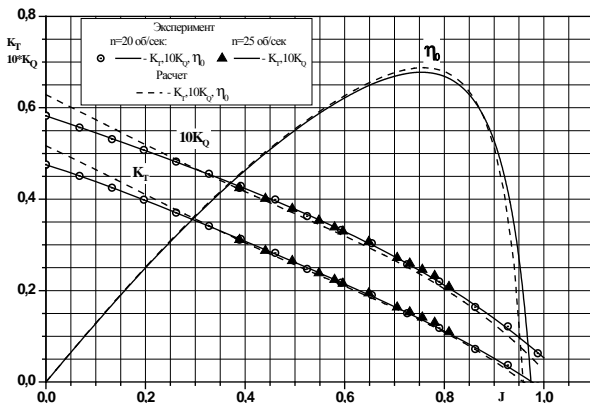


Рис. 4. Кривые действия гребного винта А [27]

Fig. 4. Performance curves of Propeller A [27]

На 43-й конференции «Крыловские чтения» были представлены оценки собственного сопротивления турбулизаторов, расположенных на плоской пластине [3]. Пластины брались соответствующие масштабам испытанных моделей серии Victory [13]. На рис. 3 для удобства использования результатов собственное сопротивление турбулизаторов C_d приведено в долях от сопротивления эквивалентной плоской пластины C_f для каждой из моделей масштабной серии Victory. При выполнении расчетов размер турбулизаторов соответствовал минимальному, обеспечивающему эффективную турбулизацию течения. Сопоставление результатов численных расчетов вязкостного сопротивления серии Victory с данными экспериментов и корректировкой на сопротивление турбулизаторов были представлены на конференциях [3, 4].

Жирной линией поперек зависимостей $C_d(\lg Rn)$ ограничены реальные режимы, соответствующие максимальным числам Фруда, достигавшимся при испытаниях моделей разных масштабов. И если для моделей с масштабом 1:15–1:24 (длина модели 9,04; 5,65 м соответственно), как показывает практика, еще можно с уверенностью утверждать, что собственное сопротивление можно не учитывать, для масштаба 1:30 (длина модели 4,52 м) – под вопросом, то для меньших это не учитывать нельзя. Для модели длиной 5,65 м собственное сопротивление турбулизатора будет порядка 2,5 % от сопротивления трения эквивалентной пластины, в то время как для самой малой модели – почти 6,5 % (рис. 3).

Для гребных винтов при проведении модельных испытаний турбулизация течения не осуществляется. Попытки ее осуществления показали, что слишком значимым оказывается в этом случае собственное сопротивление турбулизатора (при обеспечении эффективной турбулизации). Поэтому для компенсации несоответствия режима течения в кривые действия гребных винтов при пересчете данных модельных экспериментов на натурные условия вводятся соответствующие поправки [15, 18].

При численном моделировании здесь важно учесть ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) [27, 28]. На рис. 4 для винта А из [27] дано сопоставление экспериментальных и рассчитанных кривых действия в свободной воде. Эксперимент проводился на БТ-1 глубоководного бассейна Крыловского центра. Расчет осуществлялся с использованием низкорейнольдсовской версии $k-\omega$ SST модели турбулентности и модели $\gamma-Re_\theta$ для учета ЛТП. Представленные на рис. 4 данные показывают приемлемую точность расчетов при поступях больше 0,3, особенно если

учесть величины погрешностей при проведении экспериментов по определению гидродинамических характеристик гребных винтов [29].

На рис. 5 представлен внешний вид гребного винта А и дано сопоставление изменения КПД гребного винта при переходе от модели к натуре, полученного с учетом и без учета для модельных условий ЛТП [27] и по методике [15]. 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 реальности, а также необходимости учета в расчетах ЛТП.

Для корпуса модели судна влияние выбора модели турбулентности показано в работе [10]. На рис. 6 из [10] приведено отличие вязкостного сопротивления модели корпуса судна HSVA от полученного при проведении модельных испытаний. Расчеты выполнялись для числа Рейнольдса $Rn = 5 \cdot 10^6$, что для испытаний в глубоководном бассейне модели длиной 7 м соответствует довольному числу Фруда. Значение Cv_{exp} принято как среднее между испытаниями в глубоководном опытовом бассейне и аэродинамической трубе Крыловского центра. В последнем случае испытывалась дублированная модель.

В [10] расчеты выполнялись в программном комплексе Star CD. Более поздние расчеты в Star CCM+, выполненные с усовершенствованным вариантом $k-\omega$ SST модели турбулентности [6], показали приближение к экспериментальному значению сопротивления. Однако результаты, полученные в коде ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова с нестандартными пристенными функциями (keWF), описанными в [30, 31], по-прежнему остаются лучшими. Отклонение этого результата от экспериментального существенно меньше погрешности измерения при малых числах Фруда [32, 33] ($Rn = 5 \cdot 10^6$).

Примыкает к указанной выше проблеме и адекватность пристенных функций. Задачи судостроения характеризуются большими числами Рейнольдса (существенно выше, чем для машиностроения и энергомашиностроения). В силу этого неизбежным является использование т.н. высокорейнольдсовых моделей турбулентности. Для этих моделей характерным является использование для постановки граничных условий на твердых поверхностях эмпирических зависимостей (пристенных функций, или wall functions). От адекватности

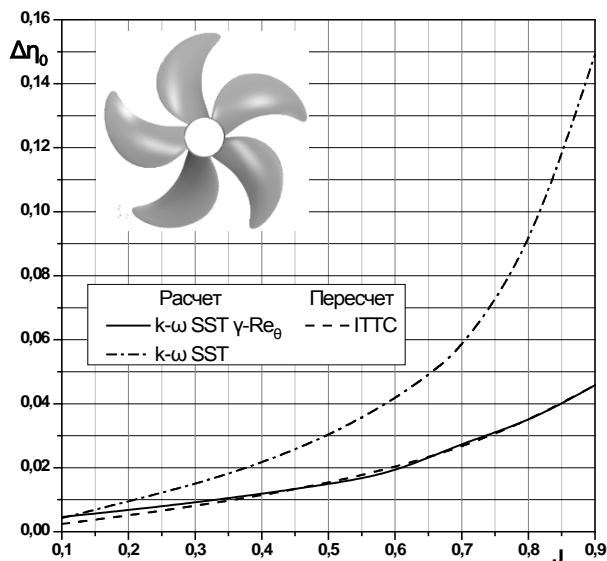


Рис. 5. Винт А [27]. Внешний вид; изменение КПД при переходе от модели к натуре ($k-\omega$ SST – расчет без учета ламинарно-турбулентного перехода; $k-\omega$ SST + $\gamma-Re_\theta$ – расчет с учетом ламинарно-турбулентного перехода; ИТТС – пересчет по методике ИТТС [15])

Fig. 5. Propeller A [27]. General view, efficiency change after transition from model to full scale ($k-\omega$ SST – calculation without consideration of laminar-turbulent transition (LTT); $k-\omega$ SST + $\gamma-Re_\theta$ – calculation with consideration of LTT; ITTC – extrapolation as per ITTC procedure [15])

этих зависимостей реальным течениям во многом зависит точность выполняемых расчетов. Для ряда задач корабельной гидродинамики обязательным условием адекватности пристенных функций является учет неблагоприятных (положительных) градиентов давления.

Выполненные в Крыловском центре исследования показали пути совершенствования пристенных функций [30, 31]. Собственно, именно благодаря используемым в коде Крыловского центра пристенным функциям был получен результат, представленный на рис. 6 под названием keWF. На обтекание модели танкера HSVA в кормовой оконечности оказывают влияние именно неблагоприятные градиенты давления. Из коммерческих программных комплексов достаточно адекватные пристенные функции, хотя и дающие менее точный результат в пристенной области, чем описанные в [30, 31], внедрены в Star CD под названием «неравновесные пристенные функции» (nonequilibrium wall functions).

Однако благодаря тому, что данные функции могут использоваться совместно с нелинейной $k-\epsilon$ моделью турбулентности, они дают лучший резуль-

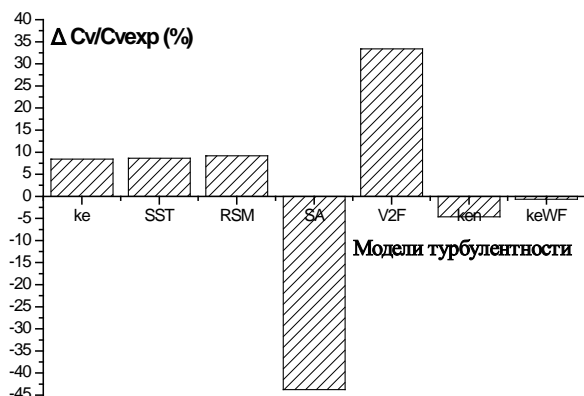


Рис. 6. Влияние модели турбулентности на вязкостное сопротивление модели танкера HSVA [11]: ke – стандартная $k-\epsilon$ модель; SST – $k-\omega$ SST модель Ментера; RSM – модель переноса рейнольдсовых напряжений, SA – модель турбулентной вязкости Спаларта – Алмареса; V2F – модель Дурбина; ken – нелинейная (квадратичная) $k-\epsilon$ модель; keWF – стандартная $k-\epsilon$ модель, дополненная нестандартными пристенными функциями разработки ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова

Fig. 6. Turbulence model effect upon viscous resistance of HSVA tanker model [11]. ke – standard $k-\epsilon$ model; SST – $k-\omega$ SST Menter model; RSM – Reynolds stress model, SA – Spalart – Almares turbulent viscosity model; V2F – Durbin model; ken – non-linear (quadratic) $k-\epsilon$ model; keWF – standard $k-\epsilon$ model with additional non-standard wall-effect functions developed by Krylov Central Research Institute

тат во внешней области течения в кормовой оконечности. На рис. 7 представлены результаты эксперимента и расчетов с использованием комплекса Star CD с нелинейной $k-\epsilon$ моделью турбулентности

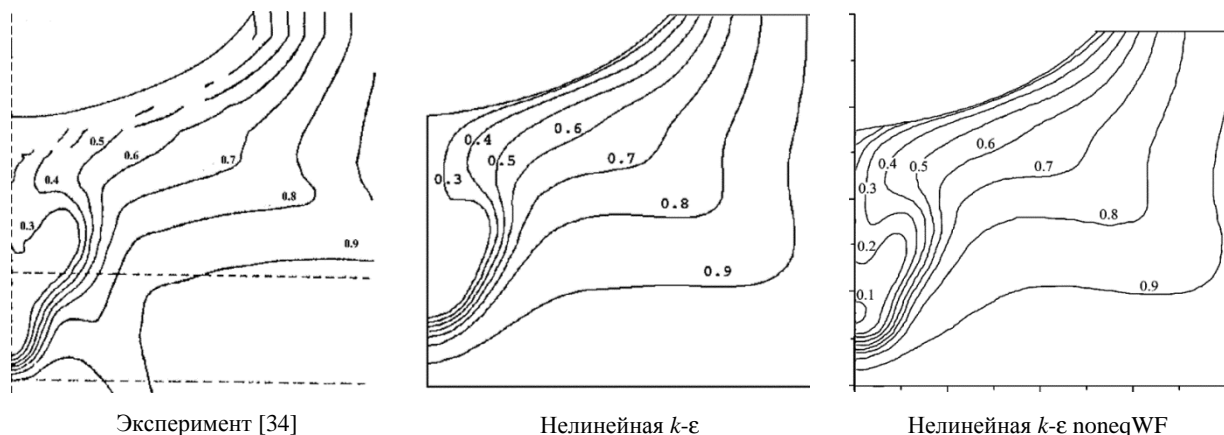


Рис. 7. Модель танкера HSVA. Поле продольной скорости в плоскости диска гребного винта ($x/L_{pp} = 0,976$). Расчет с использованием Star CD

Fig. 7. HSVA tanker model. Longitudinal velocity field in propeller plane ($x/L_{pp} = 0,976$). Calculated in Star CD

без использования (нелинейная $k-\epsilon$) и с использованием неравновесных пристенных функций (нелинейная $k-\epsilon$ noneqWF). Результат с использованием неравновесных пристенных функций оказывается ближе к экспериментальному.

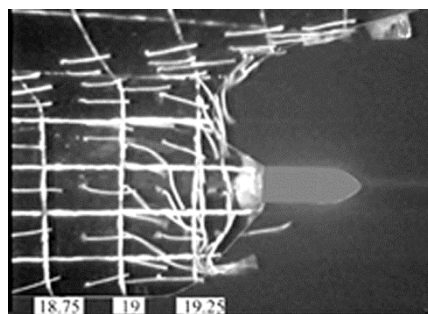
Использование адекватных пристенных функций позволяет также достаточно точно рассчитывать характеристики обтекания корпусов судов, обтекающихся с отрывом потока в кормовой оконечности. Причем успешно использовать для этого решение уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирическими моделями турбулентности типа $k-\epsilon$ или $k-\omega$ SST. На рис. 8 представлены результаты визуализации течения в кормовой оконечности балкера [30]. В расчете показаны предельные линии тока, что вполне соответствует картине в эксперименте при визуализации шерстинками.

Рассчитанная величина вязкостного сопротивления для данного корпуса составляет $C_v = 3,74 \cdot 10^{-3}$ ($Rn = 8,09 \cdot 10^6$). Вязкостное сопротивление, определенное по результатам модельных испытаний при том же самом числе Рейнольдса, составило $C_v = 3,67 \cdot 10^{-3}$, что также можно считать достаточно хорошим совпадением. Получение такого совпадения расчетных и экспериментальных данных (разница 1,9 % по сопротивлению) при использовании стандартной системы пристенных функций практически невозможно даже при существенно меньшем влиянии отрывных явлений.

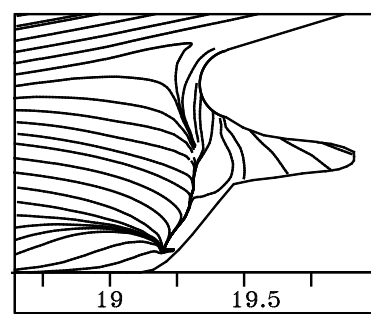
Выбор используемой модели турбулентности и пристенных функций зависит как от функционала используемого программного обеспечения и поставленной задачи, так и от привлечения для по-

Рис. 8. Предельные линии тока в кормовой оконечности балкера [30]

Fig. 8. Limit flow lines in bulker stern [30]



Эксперимент $Rn = 8,09 \cdot 10^6$



Расчет, модель $Rn = 8,09 \cdot 10^6$

строения пристенных функций соответствующей эмпирической информации, как это было сделано в работах [30, 31] по материалам докторской диссертации Б.А. Кадера [35]. Естественно, в тех случаях, когда требуется знание структуры отрывных явлений во внешней области потока (внешней относительно пристенного слоя), требуется переход к гибридным методам URANS-LES, в частности к DES [9]. Для осредненного поля можно ограничиться использованием нелинейной k - ϵ модели турбулентности с неравновесными пристенными функциями, а для определения зон отрыва и сопротивления можно использовать даже стандартную k - ϵ модель, но с пристенными функциями из [30, 31].

Влияние границ в эксперименте хорошо видно из сопоставления результатов измерений сопротивления моделей судов в больших и малых опытовых бассейнах. Для больших опытовых бассейнов это влияние достаточно мало. Для глубоководного опытового бассейна Крыловского центра еще в 1990-х гг. М.П. Лобачев и И.А. Чичерин выполнили расчеты сопротивления модели стандартного размера (длина 7 м) с учетом влияния стенок бассейна (выполнение условий прилипания и непротекания) и без их учета (мягкие граничные условия на градиенты давления, возможность протекания). Разница составила всего 0,4 %, что существенно меньше погрешностей эксперимента [32, 33].

Для бассейнов меньшего размера из-за загроможденности при использовании моделей большого размера влияние стенок существенно выше, а при использовании моделей меньшего размера, как показано ранее, существенным оказывается собственное сопротивление турбулизаторов. При использовании же турбулизаторов малого диаметра их эффективность недостаточна для турбулизации обтекания корпуса модели. В настоящее время глубоководный опытовый бассейн Крыловского центра является наиболее точной установкой для определения сопро-

тивления моделей судов. Влияние границ экспериментальных установок для гребных винтов наиболее наглядно проявляется при сопоставлении КПД гребных винтов в случае испытаний в опытовом бассейне и в кавитационных трубах при атмосферном давлении. Разница доходит до 2 %.

Все вышесказанное относится и к проведению численных экспериментов. Если требуется валидация результатов расчетов, то граничные условия при расчете должны соответствовать границам экспериментальной установки. Если же требуется получение результатов для безграничного пространства, то требуется удаление границы зоны счета на достаточное расстояние. Так, для корпусов водоизмещающих судов требуется удаление зоны счета в поперечном направлении не меньше чем на длину судна. Это, кстати, соответствует соотношению размеров обычно испытываемых моделей и размерам глубоководного бассейна Крыловского центра.

При сопоставлении результатов расчетов характеристик гребных винтов с экспериментальными данными также требуется учет расположения границ и постановки соответствующих граничных условий. Особенно это относится к расчетам для кавитационных труб. При численном моделировании гребных винтов в свободном потоке применительно к модельным масштабам одним из наиболее значимых параметров в граничных условиях является корректное задание степени турбулентности на входной границе зоны счета. Этот параметр существенно влияет на ламинарно-турбулентный переход [27, 28]. Для натурных гребных винтов или для винтов за корпусом модели судна этот параметр уже не столь важен.

Что касается влияния размеров экспериментальной установки и ее отдельных элементов на получаемые результаты, то характерной иллюстрацией такого влияния является работа [36], в которой описано физическое и численное моделирова-

ние течения в зазоре между крылом и твердой стенкой. Результаты численного моделирования совпали с результатами экспериментального исследования в аэродинамической трубе Крыловского центра только после учета в численном моделировании размеров рабочего участка и геометрии экспериментальной установки, включая оборудование для закрепления и перемещения моделей [37].

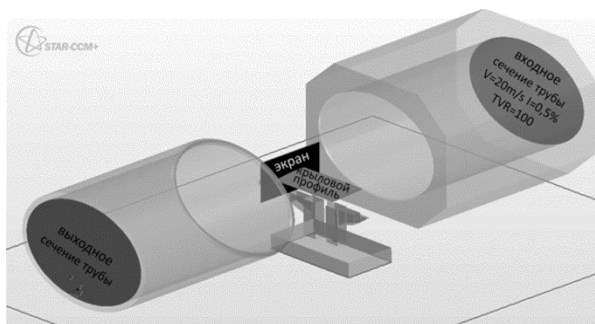
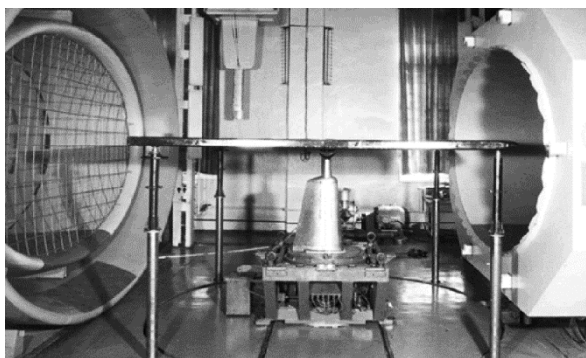
Поскольку аэродинамическая труба в Крыловском центре открытого типа, то моделировалось и само помещение, в котором находится рабочий участок трубы. Хотя эти результаты получены при численном моделировании, необходимость учета таких деталей четко говорит именно об особенностях самих экспериментальных установок.

В ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ) именно с использованием численных методов проводится большая работа по определению

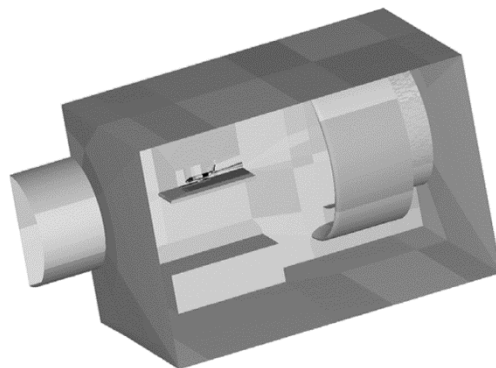
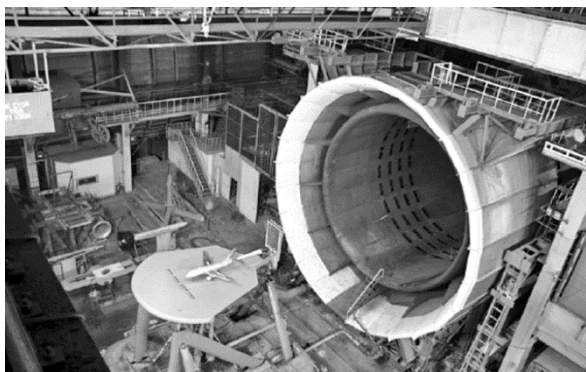
поправок к измерениям в аэродинамических трубах с целью переноса результатов на безграничное пространство. Часть этих материалов опубликована в виде тезисов (в основном работы С.А. Глазкова и А.В. Семенова) и содержат только общие сведения о выполненных работах. Более подробными являются старые материалы по трубе Т-104 [38].

Для сравнения общности подходов в Крыловском центре и ЦАГИ на рис. 9 приводятся общий вид аэродинамических труб и областей расчета. Для аэродинамической трубы Крыловского центра в [36] несколько другие элементы крепления, чем на фотографии из [39]. На области счета также не приведены внешние границы, совпадающие со стенами помещения; представлены только входной и выходной участки, модели экрана и крыла, элементы крепления моделей.

Важной внутренней задачей в проблеме масштабного эффекта как для экспериментальных, так



а)



б)

Рис. 9. Общий вид аэродинамических труб и структура математических моделей разработки: а) Крыловского центра [36, 39]; б) Центрального аэрогидродинамического института [38]

Fig. 9. General view of wind tunnels and structure of mathematical models: а) by Krylov Central Research Institute [36, 39]; б) by TsAGI [38]

и для численных исследований является учет изменения свойств среды при переходе от лабораторных к натурным условиям и различия подходов к определению искомых величин. Наиболее сильно изменение среды проявляется при прогнозировании начала кавитации: кавитационная прочность воды в лабораторных и натуральных условиях существенно отличается. Даже в лабораторных условиях кавитационная прочность значительно изменяется в зависимости от воздухо содержания.

Этому вопросу посвящено достаточно много работ. В качестве наиболее характерных для корабельной гидродинамики приведем [40–42]. Более новые работы чаще всего посвящены вопросам кавитации при акустическом воздействии [43, 44]. Для условий, характерных для кавитационных труб, в [41, фиг. 2] приведены экспериментальные результаты определения критического числа пузырьковой кавитации, при котором фиксировалось наблюдаемое начало кавитации на профиле в акустической кавитационной трубе ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (1973 г.). На рис. 10 представлены результаты из [41] при объемном воздухо содержании $\alpha = 1,25\%$; $\alpha = 0,75\%$ и $\alpha = 0,45\%$.

В натуральных условиях, когда не только существенно изменяется воздухо содержание, но присутствуют примеси, фитопланктон и т.п., кавитационная прочность морской воды сильно зависит от региона, состояния моря, глубины, на которой она определяется [45–47]. По [45] в верхнем деятельном слое океана наиболее характерными зародышами кавитации являются газовые пузырьки, концентрация и размеры которых определяются прежде всего поверхностным волнением и гидрофизическими параметрами, определяющими процесс образования и растворения газовых пузырьков в водной среде. В зависимости от этих условий газовые пузырьки в этом слое океана могут иметь различные размеры: от 10^{-1} см до 10^{-5} см.

Определение кавитационной прочности морской воды в натуральных условиях обычно производится с использованием источников мощного акустического поля. Порогом акустической кавитации или акустической прочностью жидкости на разрыв называют величину амплитуды акустического давления P_m^* , при которой в воде возникает кавитация. В морской воде величина P_m^* зависит от многих гидрофизических и гидрохимических параметров, а также от гидростатического давления P_0 , которое в морской среде линейно растет с глубиной и является одним из наиболее значительных факторов, влияющих на возникновение кавитации. Величины

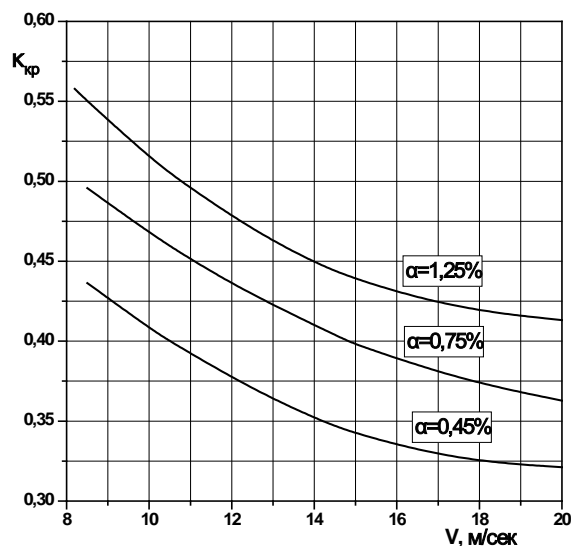


Рис. 10. Зависимость критического числа возникновения кавитации крыла от скорости

Fig. 10. Critical cavitation inception number versus speed

P_m^* и P_0 связаны соотношением $P_m^* = P_0 - P_c$, где P_m^* и P_c – пороговое гидродинамическое давление в жидкости, при котором возникает кавитация.

Здесь следует отметить, что акустическая кавитационная прочность и гидродинамическая кавитационная прочность совпадают в большинстве случаев только до частот акустического воздействия 10–15 кГц [44, 47, 48]. Так, по результатам измерений, представленных в [45], порог акустической кавитации в Балтийском море в полтора раза ниже, чем в Тихом океане, но практически равен величине порога акустической кавитации в Охотском море. Измерения проводились на глубине 10 м при частоте акустического возбуждения 10 кГц.

В качестве примера зависимости кавитационной прочности морской воды от глубины на рис. 11 приведена зависимость, построенная в бухте Витязь в северо-восточной части залива Посьета Японского моря [46]. Данные результаты получены при акустическом воздействии 10,7 кГц, так что вполне соответствуют гидродинамической кавитационной прочности.

Существенным для разработки методики пересчета с данных модельного эксперимента на натурные условия является тот факт, что фиксация начала кавитации в лабораторных условиях осуществляется на основе визуального наблюдения, в натуральных – на основе анализа акустического сигнала. Точно так же для численного моделирования весьма важным оказывается выбор критерия начала кавитации.

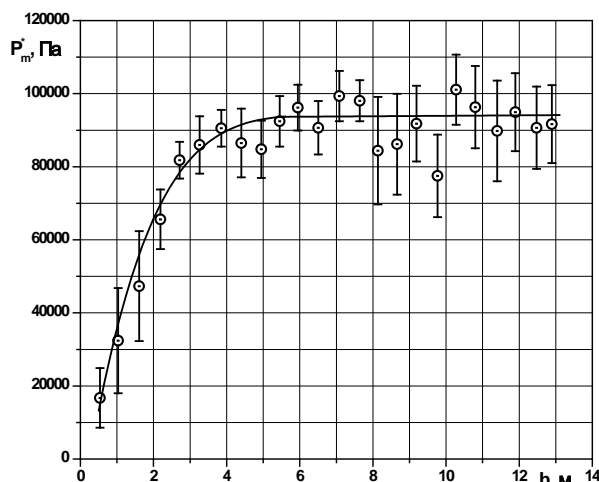


Рис. 11. Зависимость кавитационной прочности P_m^* от глубины h [46]

Fig. 11. Cavitation strength P_m^* versus depth h [46]

Какой параметр в численном расчете для условий модельного эксперимента сопоставить с визуальными наблюдениями? Для натуральных условий эта задача еще более усложняется. В настоящий момент критерий начала кавитации при выполнении расчетов для натуральных условий может быть только косвенным, т.к. прямой расчет акустического поля при кавитации нереален. В такой ситуации чрезвычайно важным оказывается доступ к натурным данным.

Для пересчета данных модельного эксперимента на натуру в соответствующие методики введены корректирующие коэффициенты. Для численного моделирования в модельных условиях первый шаг в определении критерия начала кавитации был сделан в работах [48, 50]. Однако результаты указанных работ можно считать только предварительными. После проведения большого числа подобных расчетов для различных объектов указанный критерий, несомненно, будет корректироваться.

Выполненные в настоящее время расчеты уже показывают, что для объемной и поверхностной кавитации критерии начала кавитации применительно к модельным условиям должны быть различными. Под объемной кавитацией здесь понимается кавитация, при которой кавитационная каверна со всех сторон окружена жидкостью. К объемной кавитации относится, например, вихревая кавитация; к поверхностной – кавитация у входящей кромки, которая ограничена с одной стороны поверхностью гребного винта. Это различие объясняется различными наблюдаемыми площадями объемных и поверхност-

ных каверн при одинаковом их объеме. Разница эта оказывается существенной с точки зрения практического определения начала кавитации.

Заклучение

Conclusion

Выполненный в данной работе обзор задач, возникающих при разработке методик оценки масштабного эффекта в корабельной гидродинамике, показывает общность проблем как при пересчете результатов модельного эксперимента с использованием инженерных методик, так и при использовании методов численного моделирования. Таким образом, с методологической точки зрения расчетный и основанный на инженерных методиках методы определения характеристик объекта в натуральных условиях являются равноправными, а выбор того или иного подхода должен зависеть от решаемой задачи, с учетом требований к достоверности окончательного результата. При этом под окончательным результатом следует понимать характеристики натурального объекта.

При решении задач, для которых не накоплен достаточный для статистического анализа объем натуральных данных, использование численных методов для оценки масштабного эффекта может оказаться единственной разумной альтернативой. Использование численных методов для оценки масштабного эффекта позволяет получать результат в этом случае уже сейчас, а не по прошествии значительного времени, требуемого для накопления материала сдаточных испытаний, их анализа и нахождения каких-либо эмпирических зависимостей.

Безусловно, некоторые погрешности при этом могут иметь место, однако нет оснований полагать, что их величина будет больше, чем при использовании таких эмпирических зависимостей, для построения которых имеющийся объем экспериментальных данных, в т.ч. натуральных, крайне ограничен. К тому же в этом случае процесс совершенствования методов пересчета не завязан жестко на получение новой экспериментальной информации (причем в значительном объеме) и может проводиться параллельно со строительством новых объектов или даже опережая его.

Более широкое распространение данного подхода упирается главным образом в недостаточную обеспеченность как судостроения, так и промышленности в целом суперкомпьютерной техникой, а также отсутствием для решения ряда задач разработанных методик и соответствующего программного обеспечения.

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. 255 с.
2. *Пустошный А.Ф.* Анализ некоторых масштабных серий // Материалы по обмену опытом / НТО судостроителей им. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1963. Вып. 46 : Гидромеханика судна. С. 62–90.
3. *Лобачев М.П.* Масштабный эффект в задачах судостроения – современное состояние проблемы // Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа (XLIII Крыловские чтения) : докл. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2009. С. 9–13.
4. 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 им. М.В. Ломоносова, 2016. С. 232–244.
5. *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.
6. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // *Turbulence, heat and mass transfer 4 : Proceedings of Fourth International symposium on turbulence, heat and mass transfer*. Ankara : Begell, 2003. P. 625–632.
7. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities / *Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K.* // *International journal of heat and fluid flow*. 2008. Vol. 29, No. 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
8. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R.* [et al.] // *Journal of Turbomachinery*. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
9. *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.
10. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчета вязкостного сопротивления транспортных судов / *Денисихина Д.М., Лобачев М.П., Пустошный А.В., Чичерин И.А.* // *Морской вестник*. 2008. № 3. С. 95–100.
11. Соотношение расчетных и экспериментальных методов в современной гидродинамике судна / *Пустошный А.В., Борусевич В.О., Магаровский В.В., Таранов А.Е.* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 2(392). С. 36–50. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-36-50.
12. *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.
13. 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.
14. *Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М.* Пропульсивные качества морских судов : (Исследования и прогнозирование). Ленинград : Судостроение, 1972. 510 с.
15. 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.
16. *Пустошный А.Ф.* Экспериментально-теоретическое исследование вязкостного сопротивления судов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Ленинград, 1963. 16 с.
17. Результаты буксировочных испытаний масштабных серий моделей речного судна на глубокой и мелкой воде и дальнейший анализ причин масштабного эффекта / *Войткунский Я.И., Михайлов В.Н., Базилевский Ю.С.* [и др.] // Материалы по обмену опытом / НТО судостроителей им. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1963. Вып. 46 : Гидромеханика судна. С. 4–27.
18. *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.
19. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Москва : Стандартинформ, 2018. 6, [1] с.
20. Методы анализа влияния шероховатости на гидродинамические характеристики поверхности корпуса судна / *Дробленков В.В., Каневский Г.И., Штумпф В.М., Щередин В.Н.* // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1977. Вып. 15. С. 56–62.
21. *Душина Л.Н., Каневский Г.И.* Исследование геометрии шероховатости и ее влияния на гидродинамические характеристики потока // Вопросы судострое-

- ния. Серия: Проектирование судов. 1978. Вып. 19. С. 38–42.
22. Влияние шероховатости наружной обшивки корпуса на сопротивление транспортных судов / Душина Л.Н., Каневский Г.И., Штумпф В.М., Щереди́н В.Н. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1981. Вып. 287 : Сборник статей по гидродинамике транспортных судов. С. 53–61.
23. Каневский Г.И., Лобачев М.П. Исследование влияния состояния лопастей гребных винтов на их гидродинамические характеристики // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1984. Вып. 41. С. 57–62.
24. РД5.0365-82. Ходовые качества морских водоизмещающих судов гражданского назначения. Методика проведения приемо-сдаточных скоростных испытаний. Основные требования. Ленинград, 1983. 65 с.
25. Прищемихин Ю.Н., Пустошный А.Ф. Исследование способов турбулизации пограничного слоя судов при испытаниях в опытовом бассейне. // Материалы по обмену опытом / НТО судостроителей им. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1966. Вып. 76. С. 42–50.
26. Базилевский Ю.С., Пустошный А.Ф. Методы турбулизации пограничного слоя при буксировочных испытаниях моделей в малых опытовых бассейнах // Материалы по обмену опытом / НТО судостроителей им. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1966. Вып. 76. С. 19–28.
27. 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.
28. Taranov A.E., Lobachev M.P. Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading : [Proceedings]. Piscataway : IEEE, 2015. P. 243–246. DOI: 10.1109/Polyakhov.2015.7106783.
29. Егорова Е.Ю., Лобачев М.П. Анализ составляющих погрешности измерений характеристик гребных винтов в «свободной воде» // Морской вестник. 2004. № 1. С. 75–77.
30. Chicherin I.A., Lobachev M.P. Application of RANS-CODE to ship designing practical problem // International Maritime Association of Mediterranean IX congress (IMAM'2000) : proceedings. Napoli, 2000. Vol. 3. P. 1–8.
31. 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.
32. Егорова Е.Ю., Лобачев М.П. Оценка погрешности результатов буксировочных испытаний эталонной модели МКОБ (NALMATIC) 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.
33. 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.
34. Ship Viscous Flow : Proceedings of 1990 SSPA-CTH-PHR Workshop / ed. L. Larsson, V.C. Patel, G. Dyne. Gothenburg : Flowtech Int., 1991. 62, [200] p. (Research report / Flowtech International AB ; No. 2).
35. Кадер Б.А. Перенос тепла, массы и импульса в турбулентных пограничных слоях : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.14 / АН СССР, Ин-т высоких температур. Москва, 1988. 460 с.
36. 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.
37. Особенности использования численного моделирования при проектировании объектов морской техники / Таранов А.Е., Сайфуллин Т.И., Рудниченко А.А., Егоров С.В. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 4(386). С. 28–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-28-40.
38. Использование методов вычислительной аэродинамики в экспериментальных работах ЦАГИ / С.М. Босняков, В.О. Акинфиев, В.В. Власенко [и др.] // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 11. С. 65–98.
39. Трещевский В.Н., Волков Л.Д., Короткин А.И. Аэродинамический эксперимент в судостроении. Ленинград : Судостроение, 1976. 190 с.
40. Ильин В.П., Левковский Ю.Л., Чалов А.В. Кавитационная прочность воды при возникновении гидродинамической кавитации // Акустический журнал. 1975. Т. 21, № 4. С. 661–664.
41. Ильин В.П., Левковский Ю.Л., Чалов А.В. Исследование влияния концентрации и распределения кавита-

- ционных ядер на возникновение и шум пузырьковой кавитации // *Акустический журнал*. 1981. Т. 27, № 3. С. 399–403.
42. *Чалов А.В.* Влияние воздухо содержания воды на возникновение кавитационного шума концевой вихря // *Акустический журнал*. 1992. Т. 38, № 4. С. 750–755.
43. *Волков Г.А., Груздков А.А., Петров Ю.В.* Критерий инкубационного времени и акустическая прочность морской воды // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 2. С. 149–152.
44. Анализ пороговых параметров начала акустической кавитации жидкости в зависимости от частоты ультразвукового поля, гидростатического давления и температуры / *И.В. Смирнов, Н.В. Михайлова, Б.А. Якупов, Г.А. Волков* // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91, № 11. С. 1631–1640. DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51521.352-20.
45. *Акуличев В.А., Ильичев В.И.* Пороги акустической кавитации в морской воде в различных районах мирового океана // *Акустический журнал*. 2005. Т. 51, № 2. С. 167–179.
46. Исследования рассеяния и затухания звука, акустической нелинейности и кавитационной прочности морской воды в приповерхностном слое моря / *В.А. Буланов, И.В. Корсков, П.Н. Попов, А.В. Сторожженко* // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2(22). С. 56–66.
47. *Мельников Н.П., Резников Б.И.* О связи кавитационных порогов с карбонатной системой и биогенными параметрами морской воды // *Труды XIX Международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2018»*: Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Нижний Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2018. 7 с. URL: <http://vf-река-море.рф/2018/PDF/86.pdf> (дата обращения: 02.04.2024).
48. *Богуславский Ю.Я., Корец В.Л.* К вопросу о пороге кавитации и его зависимости от частоты // *Акустический журнал*. 1966. Т. 12, № 4. С. 416–421.
49. *Лобачев М.П., Рудниченко А.А.* Определение начала кавитации рабочего колеса водомета с использованием современных численных методов // *Суперкомпьютерные дни в России: труды международной конференции*. Москва: Макс пресс, 2019. С. 113–125.
50. *Лобачев М.П., Рудниченко А.А.* Расчетное определение начала кавитации рабочего колеса водометного движителя насосного типа // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. Вып. 3(389). С. 63–72. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-63-72.

References

1. *Barenblatt G.I.* Similarity, self-similarity, intermediate asymptotics: theory and applications to geophysical hydrodynamics. 2nd ed., rev. and enl. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 255 p. (in Russian).
2. *Pustoshny A.F.* Analysis of certain scaled series // *Materials of the experience exchange / Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1963. Vol. 46. Ship Hydro-mechanics. P. 62–90 (in Russian).
3. *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).
4. Scale effect in shipbuilding tasks: Modern assessment capabilities / *M.P. Lobachev, N.A. Ovchinnikov, A.E. Taranov, I.A. Chicherin* // *Russian Supercomputer Days: Proceedings of International Conference*. Moscow: M.V. Lomonosov Moscow State University, 2016. P. 232–244 (in Russian).
5. *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.
6. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // *Turbulence, heat and mass transfer 4: Proceedings of Fourth International symposium on turbulence, heat and mass transfer*. Ankara: Begell, 2003. P. 625–632.
7. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities / *Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K.* // *International journal of heat and fluid flow*. 2008. Vol. 29, No. 6. P. 1638–1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
8. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R.* [et al.] // *Journal of Turbomachinery*. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
9. *Garbaruk A.V., Strelets M.H., Shur M.L.* Simulation of turbulence in calculations of complex flows: Student's Guide. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg Polytechnical University, 2012. 88 p. (in Russian).
10. Effect of turbulence model selection upon viscous resistance calculation accuracy for carrier vessels /

- D.M. Denisikhina, M.P. Lobachev, A.V. Pustoshny, I.A. Chicherin // Morskoy Vestnik. 2008. No. 3. P. 95–100 (in Russian).*
11. Modern ship hydrodynamics: calculations vs experiments / A.V. Pustoshny, V.O. Borusevich, V.V. Margarovskiy, A.E. Taranov // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 2(392). P. 36–50. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-36-50 (in Russian).
 12. Lobachev M.P., Rudnichenko A.A. Determination of ship propulsion performance with modern numerical simulation methods // Proceedings of international conference *Russian Supercomputing Days*. Moscow, MAKS Press, 2023. P. 110–124 (in Russian).
 13. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [Ya. Voitkunsky et al.]. Leningrad : Sudostroyeniye, 1985. 764 p. (in Russian).
 14. Katsman F.M., Pustoshny A.F., Shtumpf V.M. Propulsion performance of sea-going ships (Research and assessments). Leningrad : Sudostroyeniye, 1972. 510 p. (in Russian).
 15. 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.
 16. Pustoshny A.F. Viscous resistance of ships : Experimental and theoretical study : theses ... Cand. Sci. / Krylov Central Research Institute, 1963. 16 p. (in Russian).
 17. Towing test results for scaled series of river-going vessel in shallow and deep water, with further analysis of scale effect / Ya.I. Voitkunsky, V.N. Mikhailov, Yu.S. Bazilevsky [et al.] // Materials for the Exchange of Experience / Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders. Leningrad : Sudostroyeniye, 1963. Vol. 46. Ship Hydrodynamics. P. 4–27 (in Russian).
 18. Alexandrov S.A., Kanevsky G.I. Investigation of scale effect on hydrodynamic characteristics and propulsion performance of twin-shaft cargo/passenger vessel // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 3(401). P. 19–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-19-27 (in Russian).
 19. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow, Publishing House of Standards, 1990, 10 p. (in Russian).
 20. Analysis method for the roughness effect upon hull hydrodynamics / V.V. Droblenkov, G.I. Kanevsky, V.M. Shtumpf, V.N. Scheredin // *Voprosy sudostroyeniya* (Shipbuilding matters). Ship Design series. 1977. Vol. 15. P. 56–62 (in Russian).
 21. Dushina L.N., Kanevsky G.I. Roughness geometry and its effect upon hydrodynamic flow properties // *Voprosy sudostroyeniya* (Shipbuilding matters). Ship Design series. 1978. Vol. 19. P. 38–42 (in Russian).
 22. Effect of skin roughness upon resistance of carrier ships / L.N. Dushina, G.I. Kanevsky, V.M. Shtumpf, V.N. Scheredin // Transactions of the Krylov Central Research Institute. 1981. Vol. 287. P. 53–61 (in Russian).
 23. Kanevsky G.I., Lobachev M.P. Blade condition implications for propeller hydrodynamics. *Voprosy sudostroyeniya* (Shipbuilding matters). Ship Design series. 1984. Vol. 41. P. 57–62 (in Russian).
 24. Regulatory document RD5.0365-82. Propulsion performance of commercial sea-going ships. Procedure of speed acceptance trials. Main requirements. Leningrad, 1983. 65 p. (in Russian).
 25. Prischemikhin Yu.N., Pustoshny A.F. Boundary layer turbulization methods for ship model tests // Materials of the experience exchange / Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders. Leningrad : Sudostroyeniye, 1966. Vol. 76. P. 42–50 (in Russian).
 26. Bazilevsky Yu.S., Pustoshny A.F. Boundary layer turbulization methods for towing tests in small tanks // Materials of the experience exchange / Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders. Leningrad : Sudostroyeniye, 1966. Vol. 76. P. 19–28 (in Russian).
 27. Taranov A.E., Lobachev M.P. Hydrodynamic calculation of propeller model taking laminar-turbulent transition into account // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Vol. 90(374). P. 47–54 (in Russian).
 28. Taranov A.E., Lobachev M.P. Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading : [Proceedings]. Piscataway : IEEE, 2015. P. 243–246. DOI: 10.1109/Polyakhov.2015.7106783.
 29. Yegorova Ye.Yu., Lobachev M.P. Analysis of measurement error components for open-water propeller characteristics // *Morskoy Vestnik*. 2004. No. 1. P. 75–77 (in Russian).
 30. Chicherin I.A., Lobachev M.P. Application of RANS-CODE to ship designing practical problem // International Maritime Association of Mediterranean IX congress (IMAM'2000) : proceedings. Napoli, 2000. Vol. 3. P. 1–8.
 31. Lobachev M.P., Chicherin I.A. Assessing scale effect for velocity field and viscous resistance of hull based on Reynolds equations // Compendium of papers to the 100th anniversary of Yu. Krivtsov. St. Petersburg, 2001. P. 19–32 (in Russian).

32. Ye. Yegorova, M.P. Lobachev. 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).
33. Ye. Yegorova, M.P. Lobachev. 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).
34. Ship Viscous Flow : Proceedings of 1990 SSPA-CTH-IIHR Workshop / ed. L. Larsson, V.C. Patel, G. Dyne. Gothenburg : Flowtech Int., 1991. 62, [200] p. (Research report / Flowtech International AB ; No. 2).
35. Kader B.A. Transfer of heat, mass and impact in turbulent boundary layers : Doctoral Theses : 01.04.14 / Academy of Sciences of the USSR, Institute for High Temperatures. Moscow, 1988. 460 p. (in Russian).
36. Egorov S.V., Kornilov D.V. Calculation of flow in the gap between the wing and the solid wall as per separated-vortex method Averaged flow parameters // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Vol. 78(362). P. 43–46 (in Russian).
37. Application specifics of numerical simulation in design of marine structures / A.E. Taranov, T.I. Saifullin, A.A. Rudnichenko, S.V. Yegorov // Transactions of the Krylov Central Research Institute. 2013. Vol. 78(362). P. 43–46 (in Russian).
38. Application of CFD methods in experimental studies of TsAGI / S.M. Bosnyakov, V.O. Akinfiev, V.V. Vlasenko [et al.] // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2011. Vol. 23, No. 11. P. 65–98 (in Russian).
39. Treschevsky V.N., Volkov L.D., Korotkin A.I. Wind tunnel tests in shipbuilding. Leningrad : Sudostroyeniye, 1976. 190 p. (in Russian).
40. Ilyin V.P., Levkovsky Yu.L., Chalov A.V. Cavitation strength of water during inception of hydrodynamic cavitation // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 1975. Vol. 21, No. 4. P. 661–664 (in Russian).
41. Ilyin V.P., Levkovsky Yu.L., Chalov A.V. Effect of cavitation nuclei concentration and distribution upon inception and noise of bubble cavitation // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 1981. Vol. 27, No. 3. P. 399–403 (in Russian).
42. Chalov A.V. Effect of air content in water upon generation of tip vortex cavitation noise // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 1992. Vol. 38, No. 4. P. 750–755 (in Russian).
43. Volkov G.A., Gruzdkov A.A., Petrov Yu.V. Incubation time criterion and acoustic strength of sea water // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 2007. Vol. 53, No. 2. P. 149–152 (in Russian).
44. Threshold parameters of acoustic cavitation inception in fluid depending on ultrasonic field frequency, hydrostatic pressure and temperature / I.V. Smirnov, N.V. Mikhailova, B.A. Yakupov, G.A. Volkov // *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki (Technical Physics)*. 2021. Vol. 91, No. 11. P. 1631–1640. DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51521.352-20 (in Russian).
45. Akulichev V.A., Ilyichev V.I. Acoustic cavitation thresholds in sea water in different parts of the Ocean // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 2005. Vol. 51, No. 2. P. 167–179 (in Russian).
46. Sound scattering and attenuation, acoustic nonlinearity and cavitation strength of sea water in subsurface sea layer / V.A. Bulanov, I.V. Korskov, P.N. Popov, A.V. Storozhenko // *Underwater Investigations and Robotics*. 2016. No. 2(22). P. 56–66 (in Russian).
47. Melnikov N.P., Reznikov B.I. Interconnection between cavitation thresholds, carbonate system and biogenic properties of sea water // Proceedings of 19th International Scientific and Industrial Forum *Great Rivers-2018*. Materials of scientific and methodical conference of professors, post-graduates, graduates and students Challenges in operation and innovative development of inland waterways in major river basins. Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport, 2018. 7 p. URL: <http://вф-река-море.рф/2018/PDF/86.pdf> (Accessed: 02.04.2024) (in Russian).
48. Boguslavsky Yu.Ya., Korets V.L. On cavitation threshold and its relation to frequency // *Akusticheskij Zhurnal (Acoustical Physics)*. 1966. Vol. 12, No. 4. P. 416–421 (in Russian).
49. Lobachev M.P., Rudnichenko A.A. Cavitation inception calculation for waterjet impeller as per modern numerical methods // Proceedings of international conference *Russian Supercomputing Days*, Moscow, MAKS Press, 2019. P. 113–125 (in Russian).
50. Lobachev M.P., Rudnichenko A.A. Cavitation inception calculation for pumpjet impeller // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 3(389). P. 63–72 (in Russian). DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-63-72.

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: 29.02.24
Принята в печать / Accepted: 22.05.24
© Лобачев М.П., 2024