

Масштабный эффект в задачах судостроения – современные возможности оценки

М.П. Лобачев, Н.А. Овчинников, А.Е. Таранов, И.А. Чичерин

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

В работе представлены примеры использования современных численных методов и высокопроизводительной вычислительной техники для оценки масштабного эффекта в задачах корабельной гидродинамики и смежных областях. Под масштабным эффектом здесь понимается изменение гидродинамических характеристик объектов морской техники при переходе от условий модельного эксперимента к условиям, соответствующим эксплуатации натурального объекта. Показано изменение возможностей такой оценки в связи с переходом к использованию суперкомпьютерных вычислительных технологий. Даны примеры прямого использования при выполнении проектных работ результатов численного моделирования для натуральных условий.

Ключевые слова: корабельная гидродинамика, турбулентность, масштабный эффект, уравнения Рейнольдса.

1. Введение

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 для них является то, что они проводятся с нарушением законов подобия, в первую очередь по числу Рейнольдса, т.е. по схемам частичного моделирования. Именно таким нарушением 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 решении задачи о масштабном эффекте можно выделить два основных направления: экспериментальное и численное моделирование. Экспериментальное направление решения данной задачи связано с проведением испытаний масштабных серий моделей. При численном моделировании возможно выполнение расчетов течений вязкой жидкости непосредственно при натуральных условиях. Ранее в работе [1] было показано, что, 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 развитием вычислительной техники.

Данная работа является обобщением результатов, полученных в Крыловском центре после выхода [1], с учетом достигнутых за прошедшие годы успехов в численном моделировании. При этом значительные успехи были получены за счет перехода к использованию высокопроизводительных кластерных систем (суперкомпьютеров). Если для задач, рассмотренных в работе [1], максимальная размерность использованной расчетной сетки едва достигала 500-600 тыс. ячеек, то в настоящее время типичная для большинства базовых задач корабельной гидродинамики размерность – 6-10 млн. ячеек, а в ряде случаев доходит до 200 млн. ячеек. Это в свою очередь приводит к использованию для выполнения расчетов от 240 до 2400 ядер (AMD Opteron 6174) или до 1080 ядер (Intel Xeon E5-2697 v2). Здесь указаны основные ресурсы используемые непосредственно в КГНЦ. В качестве основной математической модели использовались уравнения Рейнольдса, а в ряде случаев непосредственно уравнения Навье-Стокса. Замыкались уравнения Рейнольдса моделью турбулентности типа $k-\epsilon$ или $k-\omega$ SST. При решении уравнений Навье-Стокса использовался метод LES. Для ряда задач использовался гибридный метод DES.

Скорость и стоимость численного решения ряда задач на имеющейся на предприятиях судостроительной отрасли ЭВМ еще недостаточна для прямого их использования при выполнении проектных работ. Однако во многих случаях ресурсы, по крайней мере КГНЦ, позволяют выполнять подобные работы. Что касается судостроительной отрасли за рубежом, то многие предприятия уже имеют требуемую технику. При этом наиболее востребованными являются простейшие виды расчетов, типа определения сопротивления корпуса судна в модельных условиях; либо решение тех задач, для которых невозможно получение решения на основе модельного эксперимента. В первую очередь это определение масштабного эффекта, а в ряде случаев прямой расчет для натуральных условий. Далее обозначим те задачи, для решения которых численные методы могут быть использованы наиболее эффективно. Причем остановимся в основном на ресурсоемких задачах, для которых требуется использование высокопроизводительной вычислительной техники. Информацию о требуемых ресурсах и эффективности распараллеливания для таких задач можно найти в [2].

2. Традиционные задачи теории корабля

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 натурных (ходовых) испытаний с результатами модельных испытаний.

2.1 Определение сопротивления корпусов судов

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 19 веке 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 при этом определялась по эмпирическим формулам и переносилась с модели на натуру в соответствии с другим критерием подобия – числом Рейнольдса.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}, \quad Rn = \frac{VL}{\nu},$$

где V – скорость движения судна, L – длина судна, g – ускорение свободного падения, ν – коэффициент кинематической вязкости.

В настоящее время определение сопротивления корпусов судов практически любой геометрии обеспечивается численными методами с отклонением от экспериментальных результатов в пределах не более 3 %. При этом отсутствие или наличие на корпусе отрывных явлений практически не влияет на точность получаемого результата (при правильном выборе используемой математической модели и построении адекватной расчетной сетки). Это дает основание рекомендовать эти методы, по крайней мере, для оценки масштабного эффекта. Особенно если учесть, что испытания одной и той же модели в различных опытовых бассейнах мира дали погрешность в определении полного (волновое + вязкостное) сопротивления 3,6 %. Сравнение с данными, проведенных в КГНЦ специальных, направленных на валидацию математической модели, экспериментов также показывает, что отличие расчета от эксперимента лежит в пределах погрешности эксперимента.

Пересчет вязкостного сопротивления традиционно основывается на методиках, использующих экстраполяторы трения, и проверяется на испытаниях масштабных серий. При этом если при натуральных числах Рейнольдса течение всегда практически полностью турбулентное, то при модельных числах Рейнольдса имеется значительный ламинарный участок. При испытаниях моделей судов для устранения ламинарного обтекания используется искусственная турбулизация течения. Для моделей больших размеров эту задачу можно до некоторой степени считать решенной. Однако при испытаниях масштабных серий для малых моделей сопротивление турбулизаторов составляет заметную долю от сопротивления самих моделей. Именно по этой при-

чине для корректного сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными следует оценивать и собственное сопротивление турбулизаторов. В данной работе такое сопоставление проводится на примере серии серии “Victory” [3].

Для корректировки данных буксировочного сопротивления использовались результаты по расчетному определению сопротивления турбулизаторов. Также учитывалось наличие ламинарного участка до турбулизатора. Для выделения из экспериментальных данных по полному сопротивлению вязкостного сопротивления использовали метод Прохазки [3]. Коэффициент полного сопротивления определяется как $C_T = 2R_x / (\rho V^2 S)$, где R_x – полное сопротивление

корпуса судна (модели), V – скорость движения, ρ – плотность воды, S – площадь смоченной поверхности судна (модели). Результаты такой обработки вместе со всем массивом экспериментальных данных приведены на Рис.4. Для каждой модели выделенное вязкостное сопротивление показано сплошными линиями. Там же приведены и результаты численного определения вязкостного сопротивления моделей серии “Victory”, выполненные с использованием высокорейнольдсовой нелинейной $k-\epsilon$ модели турбулентности (пунктирная линия с точками). Отличие наблюдается только для самой маленькой модели, длиной $L=1,695$ м. Для этой модели видимо весьма значимыми оказались кроме сопротивления турбулизатора еще какие-то факторы.

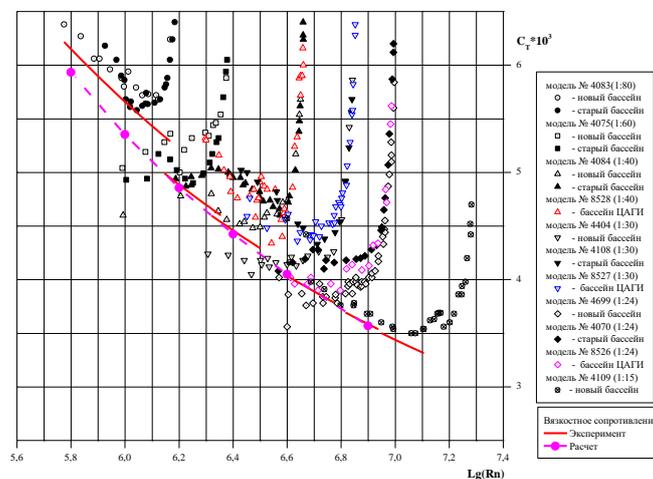


Рис. 1. Коэффициенты полного и вязкостного сопротивления моделей судна «Victory»

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 наблюдающиеся периодически попытки изменения экстраполятора трения для улучшения согласования результатов расчетов ходкости с данными ходовых испытаний.

2.2 Определение гидродинамических характеристик гребных винтов

При проведении испытаний гребных винтов определяются упор, создаваемый гребным винтом и момент сопротивления вращению. По терминологии, принятой в теории корабля зависимости этих величин от относительной скорости (поступи - J) называются кривыми действия гребного винта. $J = V/nD$, $K_T = T/\rho n^2 D^4$, $K_Q = Q/\rho n^2 D^5$, $\eta_0 = J/2\pi \cdot K_T/K_Q$, где T – упор

гребного винта, Q – момент гребного винта, η_0 – КПД гребного винта, ρ – плотность воды, n – частота вращения гребного винта, D – диаметр гребного винта. Получение кривых действия гребного винта численными методами в настоящее время возможно примерно с такой же точностью, как и сопротивление корпусов судов. В то же время в отличие от традиционных методов оценки масштабного эффекта возможно получение результатов с учетом локальных особенностей геометрии, таких как оформление выходящей кромки лопастей (закругление, обрезка и т.п.). Ниже приводится пример определения гидродинамических характеристик гребного

винта, показывающий, что для их корректного прогнозирования требуется учет всех особенностей течения. Только учет ламинарно-турбулентного перехода на лопастях гребного винта позволил получить правильный результат для модельных условий. В таблице 1 приведены погрешности в определении характеристик гребного винта на рабочем режиме применительно к модельным условиям. Соответственно для данного гребного винта, обладающего традиционной геометрией (рис. 2), это позволило получить при пересчете на натурные условия масштабный эффект, соответствующий, как и должно было быть, инженерной методике пересчета. Результаты приведены на рисунке 3 в виде изменения коэффициентов упора и момента, а также КПД в зависимости от поступи (относительной скорости) гребного винта. В качестве инженерной методики оценки масштабного эффекта использовался метод ИТТС (МКОБ) [3]. В последнее время с использованием методики, основанной именно на численном моделировании и хорошо отработанной на винтах традиционной геометрии, в КГНЦ были выполнены по коммерческим заказам расчеты для нескольких гребных винтов и рабочих колес водометов с нетрадиционной геометрией.

Расчеты выполнялись с использованием низкорейнольдсовой $k-\omega$ SST модели турбулентности Ментера, учет ламинарно-турбулентного перехода осуществлялся с использованием $\gamma-Re_\theta$ модели. Размерность расчетной сетки – 8,5 млн. ячеек.

Таблица 1. Погрешности в определении характеристик ГВ

Модель турбулентности	K_T (упор)	K_Q (момент)	η_0 (кпд)
$k-\omega$ SST	4.9%	0.2%	3.3%
$k-\omega$ SST + $\gamma-Re_\theta$	2.5%	3.3%	0.5%

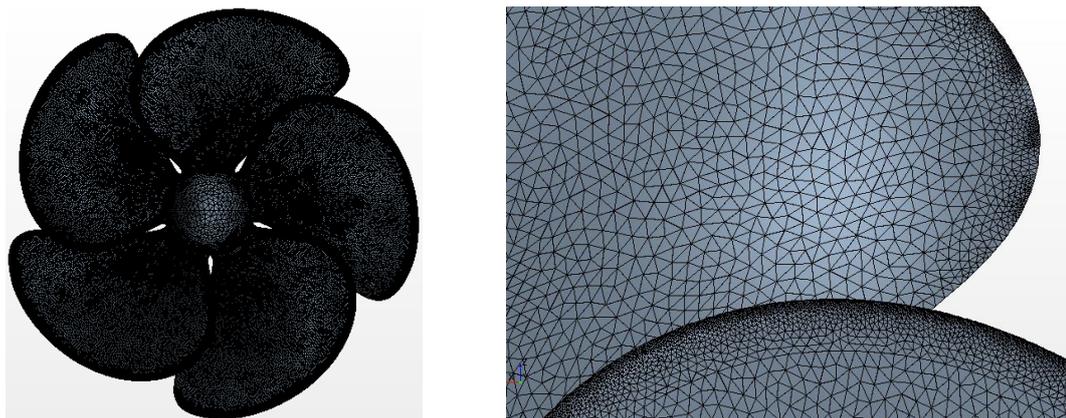


Рис. 2. Общий вид и поверхностная сетка на лопастях гребного винта

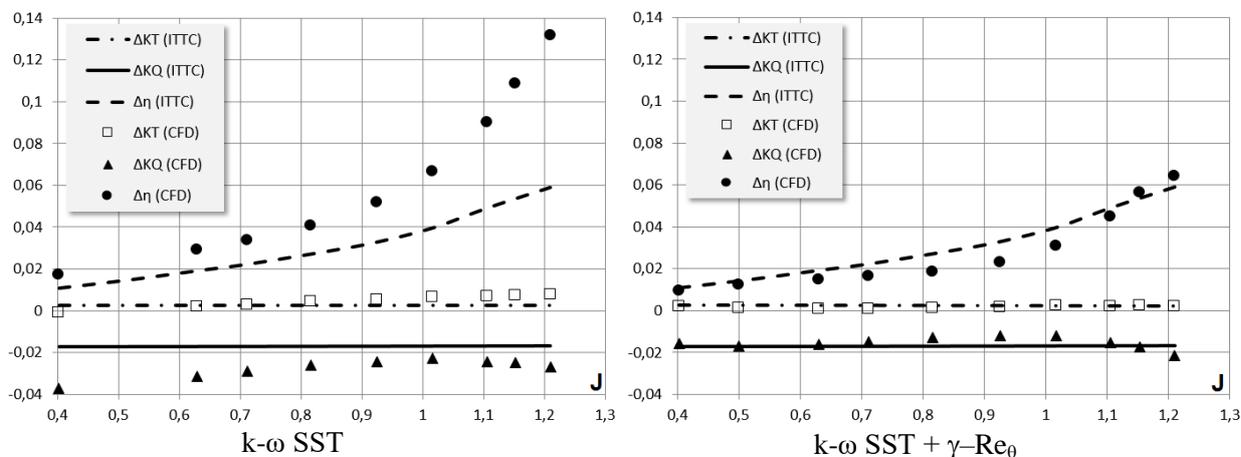


Рис. 3. Масштабный эффект гидродинамических характеристик гребного винта (упора, момента и КПД) без учета в модельных условиях ламинарно-турбулентного перехода и с учетом

2.3 Определение поля скоростей

Определение номинального поля скоростей (т.е. без учета работы гребного винта) для судов с общей полнотой до 0,7 в настоящее время практически не вызывает никаких затруднений. Под коэффициентом общей полноты понимается отношение объема корпуса судна к объему параллелепипеда, построенного на габаритных размерах корпуса. Пример такого расчета приведен на рисунке 4 в виде зависимости продольной скорости на относительном радиусе гребного винта r/R , где r – текущий радиус, R – радиус гребного винта, V_x – обезразмеренная по скорости движения судна продольная составляющая скорости. Результаты расчета приведены как для модельных, так и для натуральных условий. Результаты приведены в полярной системе координат, связанной с гребным винтом. Для судов с большой полнотой ряд особенностей поля скорости в кормовой оконечности не полностью моделируется при использовании традиционных полуэмпирических моделей турбулентности. Требуется 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. По этой причине, хотя такие расчеты и выполняются в КГНЦ, но их число существенно меньше, чем для других задач.

Современными численными методами достаточно точно прогнозируются зоны отрыва потока на корпусе, а также зоны резкого изменения направления течения вблизи поверхности корпуса. Никакие традиционные методы не позволяют учесть изменение этих зон при переходе от модельных условий к натурным, а так как их наличие и конфигурация оказывают весьма сильное влияние на поле в диске винта, то только использование численных методов позволяет выполнить корректную оценку масштабного эффекта поля скорости в этом случае.

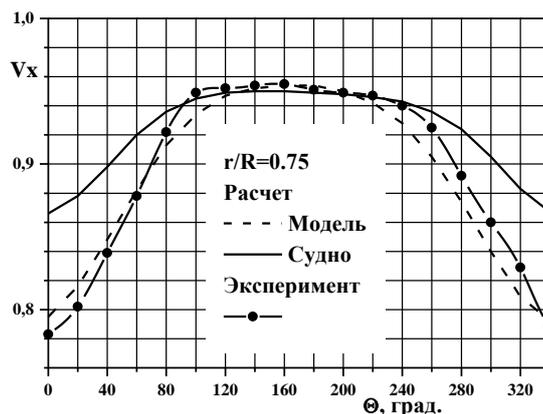


Рис. 4. Окружное распределение поля скоростей в диске гребного винта пассажирского судна.

Весьма показательным является использование численных методов для оценки масштабного эффекта поля скорости с работающим гребным винтом. 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. В качестве примера на рисунке 5 приведены распределения угла натекания $\gamma = \arctg \frac{V_r}{V_x}$ 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 согласование численных и экспериментальных данных по углам натекания в модельных условиях, представляется целесообразным элементы натурной преднасадки проекти-

ровать, 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. Для оценки масштабного эффекта в данной задаче вообще отсутствуют инженерные методики.

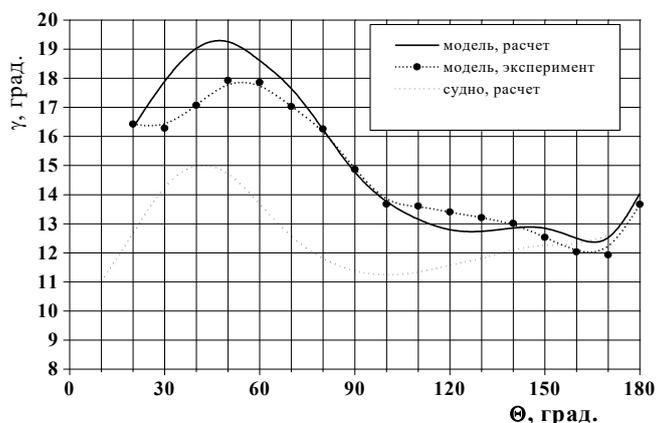


Рис. 5. Распределение углов натекания потока на элементы преднасадки в плоскости 19.5 шп. на входе преднасадки на модели пр. 12990 при работе гребного винта ($J=0.7$)

2.4 Определение коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом судна

За корпусом судна гребной винт работает в неоднородном потоке, обусловленном развитием пограничного слоя на корпусе судна. В таких условиях его гидродинамические характеристики отличаются от тех, что получаются при его работе в однородном потоке (в «свободной воде»). Работающий винт в свою очередь изменяет условия формирования течения вокруг корпуса судна. В теории корабля принято взаимное влияние винта и корпуса определять через так называемые коэффициенты взаимодействия, получаемые путем сравнения гидродинамических характеристик гребного винта в свободной воде и за корпусом судна. При этом учитывается и изменение сопротивления корпуса судна с винтом и без винта.

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. На рисунке 6 приведены результаты измерений коэффициента момента 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 как шероховатость корпуса, так и гребного винта, то были дополнительно выполнены расчёты с шероховатостью на винте. В качестве среднего размера зерна были приняты значения 7 и 10 мкм, что соответствует данным по катодному осадку. Как видно, учёт шероховатости винта приводит к значительному улучшению согласования расчётов и натуральных измерений.

На рисунке 7 для этого же объекта приведены результаты расчета коэффициента попутного потока W_T для модельных и натуральных условий и результаты модельных экспериментов. Методика определения W_T приведена в [3]. Приведены данные для чистой воды и для испытаний в растворе полимера, выполненных О.П. Орловым. На этом же рисунке приведены результаты определения коэффициента попутного потока по результатам ходовых испытаний, выполненные с использованием для оценки масштабного эффекта кривых действий гребного винта методики ИТТС-78. 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 использование RANS метода и методики ИТТС-78 [3] дают различный наклон кривых в зависимости от поступи, на рабочей поступи $J=0.6087$ результаты по этим методам дают

близкие результаты, лежащие между результатами О.П. Орлова для раствора полимера и натурным значением. Здесь следует отметить, что эксперимент О.П. Орлова дает «оценку сверху» так как в растворе полимера коэффициент сопротивления при проведении экспериментов оказался выше, чем прогнозируемый для натуральных условий. Следует отметить, что обтекание корпуса этого судна, как показывают и расчетные и экспериментальные данные, происходит без существенных аномалий. Ранее было показано, что для таких обводов практически все методы, включая традиционные, дают при расчетах ходкости близкий результат, совпадающий с ходовыми испытаниями. При расчете обтекания других объектов, выполненных в КГНЦ, в частности для судов, обтекающихся с отрывом потока, только метод, основанный на расчете обтекания корпуса судна RANS методом, позволяет получить соответствие прогноза с результатами ходовых испытаний. Такой метод может быть использован для судов практически любого типа и любой формы обводов. При этом следует отметить, что выполнение расчетов обтекания корпуса судна с работающим гребным винтом требует порядка 34 000 ядро-часов. Т.е. использование именно суперкомпьютерных технологий становится обязательным. Причем в данном случае использовалась технология выполнения расчетов, позволившая значительно (до 10 раз) ускорить сходимость расчетов. Без использования такой технологии выполнение подобных расчетов теряет смысл.

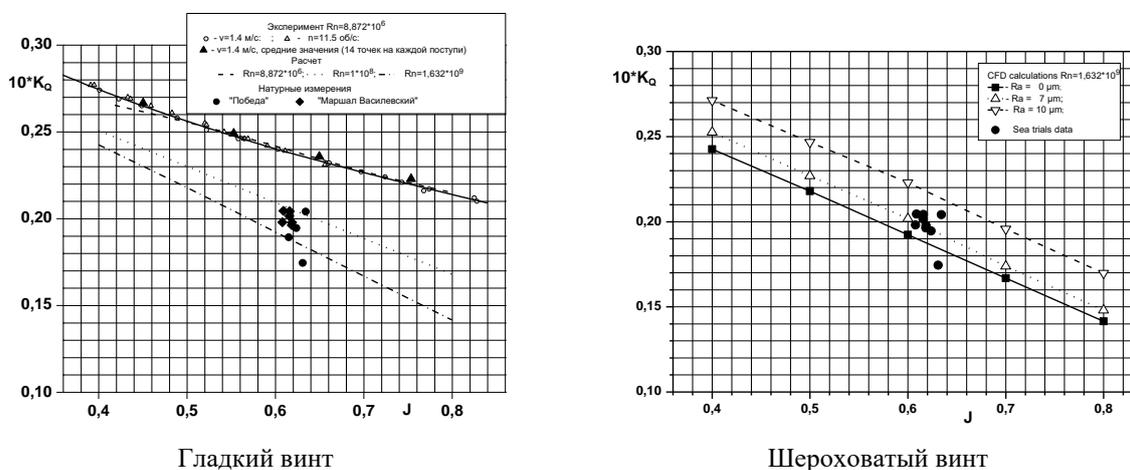


Рис. 6. Зависимости коэффициента момента гребного винта за корпусом от поступи

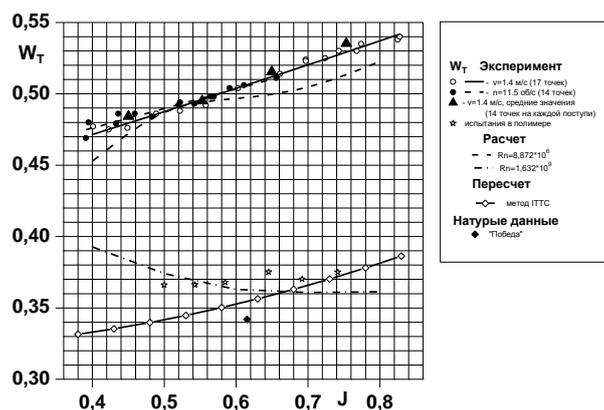


Рис. 7. Зависимость коэффициента попутного потока W_T от поступи при модельных и натуральных числах Рейнольдса

3. Нетрадиционные задачи теории корабля

Неоценимую помощь численные методы могут предоставить при оценке масштабного эффекта в тех задачах, в которых невозможно проведение экспериментов на масштабных сериях. В этом случае можно даже говорить о предпочтительности численного моделирования.

3.1 Задачи океанотехники и проектирования портовых сооружений

3.1.1 Течение у буровой платформы

При разработке ряда месторождений нефти на шельфе приходится сталкиваться с проблемой эксплуатации нефтеналивного флота в условиях мелководья. Характерные глубины, как у буровых, так и у загрузочных терминалов в Арктике составляют 16-20 метров. В этих условиях зазор между корпусом судна (танкера, судна-снабженца, буксира и т.д.) и дном акватории может быть весьма малым (до 2 метров при полной загрузке). При таких малых зазорах возможно воздействие струи от винта на грунт с силой, приводящей к размыву грунта. Подобное наиболее вероятно при швартовке судна к буровой платформе на шельфе, где глубина мала, а сам процесс загрузки судна длителен, либо при прохождении судном мелководных акваторий или каналов. Размыв грунта и его последующий перенос может представлять опасность как с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации флота, так и с экологической точки зрения.

Следует отметить, что решение этой задачи методами физического моделирования весьма затруднено, так как в эксперименте невозможно выдержать все критерии подобия. В таких условиях возрастает роль численного моделирования.

В качестве примера выбраны самые тяжелые условия – швартовка танкера дедвейтом 60 тыс. т. с осадкой 14 м к терминалу при глубине 16 м в зимних условиях. Для позиционирования судна 4х лопастной винт диаметром 6 м развивает упор 84 кН или 0.6 Т, где Т – максимальный упор на передний ход, при 77.4 об/мин.

В качестве грунта принимался несвязный песок с размером частиц от 0.05 до 0.4 мм. В качестве характерных напряжений приняты $\tau_1=1.16 \text{ н/м}^2$, ниже которого вообще не происходит размыв данного грунта, и $\tau_2=3.95 \text{ н/м}^2$, при котором происходит вынос всех частиц размером 0.4 мм при любой концентрации взвешенных частиц в потоке. Следует отметить, что при проведении модельных экспериментов обычно используется песок, соответствующий натурному.

Расчеты выполнялись как для модельных, так и для натуральных условий. Для модельных и натуральных условий была выдержана равной линейная скорость конца лопасти гребного винта. Соответствующие числа Рейнольдса, построенные по этой скорости и диаметру гребного винта были равны: в натуральных условиях $Re_D=9.12 \times 10^7$, в модельных – $Re_D=4.26 \times 10^6$.

Полученные в результате расчета зоны наиболее опасные с точки зрения размыва грунта показаны на рис.9 а для натуральных условий, на рис.9 б – для модельных условий. Размеры на рисунке даны в длинах судна между перпендикулярами L_{pp} , $X=0$ соответствует кормовому перпендикуляру, $Y=0$ – диаметральной плоскости. Гребной винт расположен в плоскости $X/L_{pp}=-0.016$. Границы, где касательные напряжения достигают значений τ_1 и τ_2 обозначены числами 1 и 2 соответственно. На этих рисунках можно выделить две зоны. Первая – под корпусом судна, вторая – вблизи буровой. Под корпусом струя от винта распространяется в узком зазоре и в результате касательные напряжения, действующие на грунт, резко возрастают и достигают опасных величин. За пределами корпуса скорости в струе падают, и размыва грунта не происходит. Различие между результатами, полученными для натуральных и модельных условий, здесь носят количественный, а не качественный характер.

Вторая зона размыва формируется за счет отражения струи от буровой. В этом районе отличие модельного распределения касательного напряжения от натурального значительно сильнее. Значительно более сильное влияние вязкости в модельных условиях затрудняет резкий разворот струи. Зона размыва в модельных условиях оказывается прижатой к буровой. В натуральных условиях отражение струи от буровой происходит значительно легче и зона размыва захватывает большую площадь.

Максимальные значения касательного напряжения под корпусом судна достигают в натуральных условиях величины 57.12 н/м^2 , в модельных – 46.26 н/м^2 . В зоне вблизи буровой имеется несколько локальных максимумов в распределении касательного напряжения, в диапазоне 6-8 н/м^2 для натуральных условий и 9-10 н/м^2 для модельных условий. Таким образом, для более корректного моделирования течения под корпусом в модельных условиях следовало бы увеличить скорость струи, т.е. увеличить нагрузку винта, а для лучшего моделирования течения у буровой требуется уменьшение скорости в струе. Проведенные с различными нагрузками расчеты под-

твердили данный тезис. Подобные противоречивые требования показывают, что корректное моделирование воздействия струи на грунт во всей области течения при использовании натурального грунта не представляется возможным.

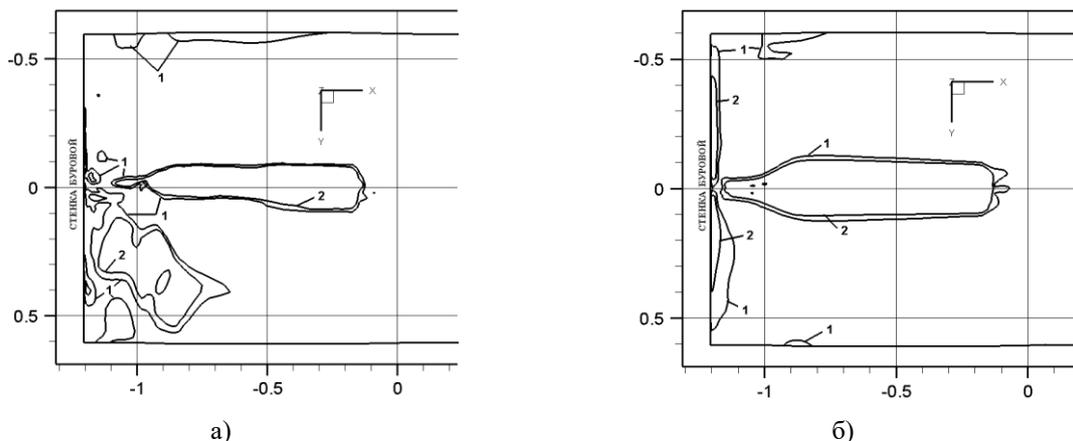


Рис. 9. Распределение касательного напряжения (зон возможного размыва) а) - для натуральных условий, б) – для модельных условий. 1 - $\tau_1 = 1.16 \text{ н/м}^2$ (при $\tau \leq \tau_1$ нет размыва), 2 - $\tau_2 = 3.95 \text{ н/м}^2$ (при $\tau \geq \tau_2$ есть размыв всех фракций)

Получение зоны размыва у буровой в модельных условиях близкой по конфигурации к натурной оказалось невозможным при любых скоростях струи. Это вызвано тем обстоятельством, что соотношение инерционных и вязкостных сил в модельных условиях совершенно другое. В таких условиях более тонкие эффекты, определяемые низким уровнем касательного напряжения, оказываются довольно сильно искаженными. Что же касается зоны интенсивного воздействия струи на грунт под корпусом судна, то в этой зоне за счет вариации нагрузки (скорости в струе) можно добиться примерного соответствия натурального и модельного распределения касательного напряжения по поверхности грунта и, следовательно, примерно одинакового размыва.

Проведенные численные исследования показали, что процесс эрозии грунта струей винта подвержен сильному масштабному эффекту. Численное моделирование помогает выбирать режим работы винта в модельном эксперименте таким образом, чтобы приблизить его результаты к натурным хотя бы в некоторых зонах. Результаты расчетов также показывают, что зоны размыва имеют нетривиальную конфигурацию, установление которой в модельном эксперименте требует значительных затрат. Кроме того, в отличие от модельного эксперимента, численный результат может быть получен для натуральных условий, т.е. без масштабного эффекта.

3.1.2 Определение ветровых условий на акватории

При проектировании одного из новых северных портов России проводилась оценка возможности маневрирования крупных транспортных судов в крайне сложных климатических условиях, и определялись погодные ограничения работы порта. Одним из важнейших ограничивающих факторов являются сильные ветры. Модель бухты со сложным скалистым (до 200м) рельефом берегов была продута в аэротрубе, однако опасения влияния масштабного эффекта заставили провести еще и расчетное исследование. Исследуемая зона соответствовала участку рельефа в натуральных размерах 15x15 километров и была значительно шире акватории, чтобы корректно учесть обтекание скал.

Как эксперименты в аэродинамической трубе, так и расчеты для модельных условий показали наличие весьма сложной структуры течения. Присутствуют как многочисленные следы от окружающих губу сопков, так и вихревые течения при обтекании наиболее крутых сопков. При этом общая структура течения получилась практически одинаковой в эксперименте и расчете.

Результаты оценки масштабного эффекта ветровой картины в виде изолиний скоростей потока на высоте 10 м для модельных и натуральных условий представлены на рисунке 8. Акватория порта – в нижней части рисунков, скалы – в верхней. Масштабный эффект в части конфигурации следов от сопков и зоны пониженных скоростей ветра над акваторией можно охарактеризо-

вать как значительный. Зоны торможения потока на рисунке в районе точек p20, p26, p30 окрашены более темным. Именно в этой зоне должны быть расположены причалы. Сравнение профилей скорости по высоте для двух точек на акватории при разных направлениях ветра, полученных как в эксперименте, так и в расчете, представлено на рисунке 9. Для натуральных и модельных условий высоты приведены соответствующие натурным условиям.

Традиционно для течений типа течений пограничного слоя при переходе от меньших чисел Рейнольдса к большим относительные скорости на равных относительных высотах увеличиваются. Однако в данном случае из-за весьма сложного характера течения относительные скорости при натуральных числах Рейнольдса могут оказаться меньше модельных. Масштабный эффект совершенно разный для разных точек и он различен для одних и тех же точек при разных направлениях ветра. Оценка такого масштабного эффекта невозможна никакими эмпирическими методами и может быть выполнена только на основе использования численного моделирования. В данном случае это численное решение уравнений Рейнольдса, замкнутых нелинейной к-ε моделью турбулентности. Размерность расчетной сетки для модели и природы в этой задаче совпадали – 6.5 млн. ячеек.

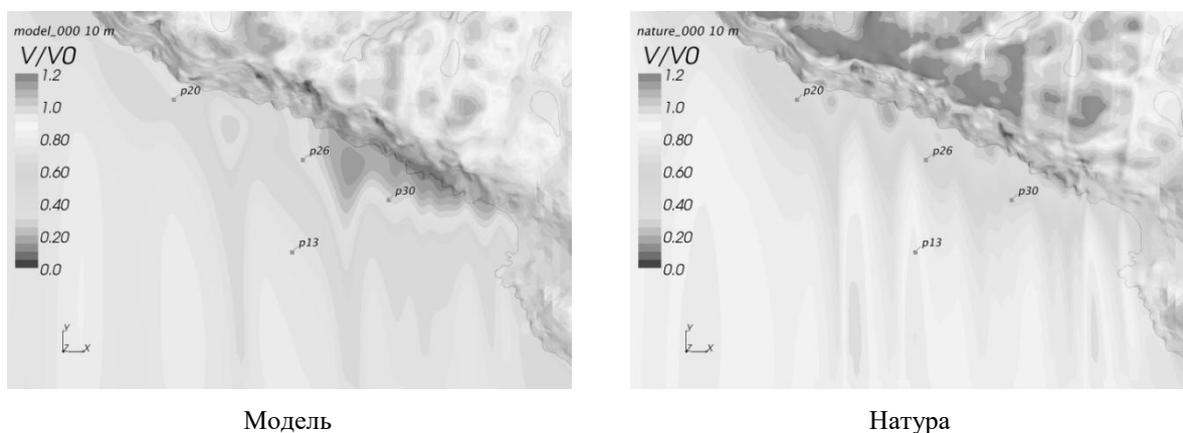


Рис. 8. Изолинии скорости ветра на высоте 10 м. от поверхности (расчет)

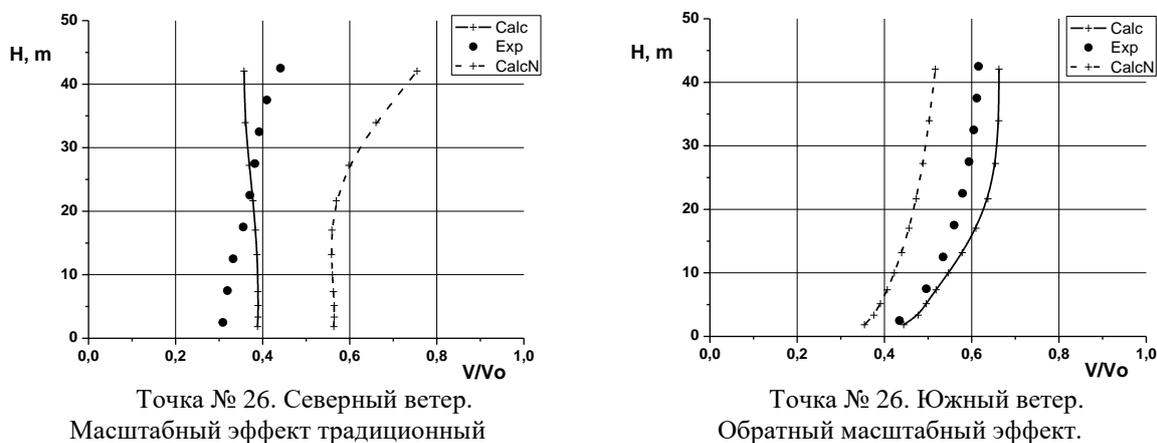


Рис. 9. Профиль скорости по высоте для заданных на акватории точек. Calc – расчет для модельных условий, CalcN – расчет для натуральных условий, Exp – эксперимент

3.2 Задачи ледотехники

Следует отметить, что для большого числа задач, связанных с ледотехникой, проведение измерений локальных характеристик в эксперименте практически невозможно. В этом случае численный эксперимент становится насущной необходимостью и проводится он непосредственно для натуральных условий. В данной работе приводится только пример расчета поля скоростей в диске гребного винта судна, движущегося в сплошных ровных льдах.

При эксплуатации судов в сплошных ровных льдах существенно изменяются условия, влияющие на формирование поля скорости в диске гребного винта. В первую очередь это свя-

зано с тем, что при движении судна в сплошном ровном поле на его подводной поверхности образуется слой притопленного льда, т.к. называемая “ледовая рубашка”. Граница распространения “ледовой рубашки” определяется из условия равенства на каждом шпангоуте ординаты действующей ватерлинии длине шпангоута. В кормовой оконечности судна примерно в районе 15 - 18 теоретических шпангоутов “ледовая рубашка” отрывается от корпуса и всплывает. Это соответствует 75 – 90 % длины корпуса.

В зазорах между “ледовой рубашкой” и корпусом реализуется сдвиговое течение типа Куэтта, а в месте ее отрыва начинает развиваться турбулентный пограничный слой. Поэтому можно считать, что в каждую точку начального сечения приходит пограничный слой, развившийся на пластине, длина которой соответствует расстоянию от места отрыва “ледовой рубашки” до начального сечения. Однако для его полного формирования не хватает ни места, ни времени. В район расположения движительно-рулевого комплекса попадает поток с совершенно другой, чем при движении на чистой воде структурой. Так, например, практически отсутствует скуловой вихрь, достаточно интенсивный при движении на чистой воде, т.к. при наличии «ледовой рубашки» вихрь не успевает сформироваться.

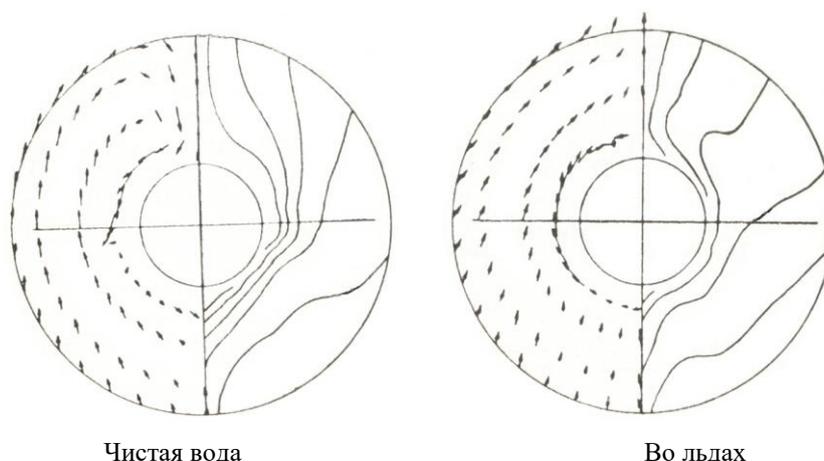


Рис. 10. Поле продольных и поперечных скоростей в диске гребного винта

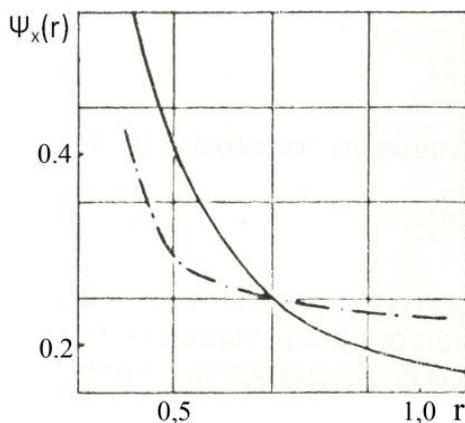


Рис. 11. Распределение по радиусу гребного винта номинального попутного потока

На рисунке 10 приведено поле продольных и поперечных скоростей в диске гребного винта одновального судна активного ледового плавания для случая плавания на чистой воде и во льдах. Расчеты выполнялись сразу для натуральных условий. Видно, что эти поля имеют существенные отличия друг от друга. Однако осредненные по диску гребного винта коэффициенты номинального попутного потока оказываются близкими: $(\bar{v}_x)_W = 0.267$ - при движении на чистой воде; $(\bar{v}_x)_I = 0.257$ - при движении в ледовых условиях. Коэффициент номинального попутного потока: $\Psi_x(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [1 - V_x(r, \theta)] d\theta$, где V_x – продольная скорость.

Распределение коэффициента номинального попутного потока по радиусу представлено на рисунке 11. Видно, что при наличии «ледовой рубашки» на корпусе судна концевые сечения лопастей гребного винта нагружаются сильнее, чем на чистой воде. Этот факт обязательно необходимо учитывать при проектировании гребных винтов судов ледового плавания.

4. Заключение

Представленные в данной работе примеры показывают, что численные методы решения уравнений Рейнольдса (Навье-Стокса) уже достигли такого развития, что стало возможным их использование для прогнозирования масштабного эффекта при решении задач, характерных для судостроения и эксплуатации флота. В ряде случаев также возможно непосредственное использование результатов численного моделирования. Использование подобных методов позволяет учитывать при определении масштабного эффекта конкретные особенности обтекания корпуса судна или инженерных сооружений.

При решении задач, для которых не накоплен достаточный для статистического анализа объем данных, использование численных методов может оказаться единственно разумной альтернативой. Использование численных методов позволяет получать результат в этом случае уже сейчас, а не по прошествии значительного времени, требуемого для накопления материала статистических испытаний, их анализа и нахождения каких-либо эмпирических зависимостей. Безусловно, некоторые погрешности при этом могут иметь место, однако, по всей видимости, их величина вряд ли будет больше, чем при использовании эмпирических зависимостей. 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.

Данные выводы лежат в русле естественного процесса изменения методологического подхода, изменения взгляда на место и роль модельного эксперимента в теории корабля, являющейся теоретической основой судостроения. Такой новый методологический подход стал развиваться в различных областях естествознания и техники, начиная с 60-х годов. Его появление связано с появлением и бурным развитием вычислительной техники, особенно с появлением в 90-е годы кластерных систем, которые сделали суперкомпьютерную технику существенно более доступной. Суть этого подхода заключается в большей ориентации при исследовании сложных явлений природы и техники на анализ результатов расчетов по математическим моделям, чем на результаты модельных экспериментальных исследований. При этом экспериментальные исследования остаются важнейшей и необходимой частью этапа разработки, тестирования и отладки математической модели.

Все большее распространение данного подхода опирается только в недостаточную обеспеченность, как судостроения, так и промышленности в целом, суперкомпьютерной техникой, а также отсутствием для решения ряда задач соответствующего программного обеспечения.

Литература

1. 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. СПб, 2001, с. 33-45.
2. Овчинников Н.А. Эффективность использования суперкомпьютера при решении задач вычислительной гидродинамики. Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах/ Под редакцией академика В.А. Садовниченко, академика Г.И. Савина, чл.-корр. РАН Вл.В.Воеводина. – М.: Издательство Московского университета, 2014, с.39-52.
3. Справочник по теории корабля / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т 1. 768с.

State-of-the-art of scale effect estimation in shipbuilding tasks

M.P. Lobachev, N.A. Ovchinnikov, A.E. Taranov, I.A. Chicherin

Krylov State Research Centre

The paper presents using of recent numerical methods and high-performance computing technologies to evaluate the scale effect in ship hydrodynamics and related areas. In terms of this paper the scale effect is the change in hydrodynamic characteristics of marine vehicles in the process of extrapolation from the model to the full-scale conditions. Capacity advancement in numerical estimation of the scale effect in connection with progress in supercomputer technologies is shown as well as the examples of direct use of the full-scale numerical simulation in engineering design.

Keywords: ship hydrodynamics, turbulence, scale effect, Reynolds equation.

References

1. Lobachev M.P., Sazonov K.E., Chicherin I.A. Modelnyj i chislennyj eksperiment v teorii korablja-Problemy masshtabnogo effekta v gidrodinamike [Model and numerical experiment in ship theory – Scale-effect problems in hydrodynamics]. Sbornik statej k stoletiju so dnja rozhdenija Y.V. Krivcova [Collection of articles on the 100th anniversary of Y.V. Krivcov's birth]. St.Petersburg, 2001. P. 33-45.
2. Ovchinnikov N.A. Effektivnost ispolzovanija superkompjutera pri reshenii zadach vychislitelnoj gidrodinamiki [Parallelization Efficiency of CFD Computation on Supercomputer]. Superkompjuternye tehnologii v nauke, obrazovaniii, promyshlennosti: almanah. [Supercomputer technologies in science, education and industry: almanac] / Pod redakciej akademika V.A. Sadovnichego, akademika G.I. Savina, chl-korr RAN VI.V. Voevodina [Ed. by acad. V.A. Sadovnichij, acad. G.I. Savin, corr.-member RAN VI.V. Voevodin]. – Moscow: Publishing of the Moscow State University, 2014. P.39-52.
3. Spravochnik po teorii korablja [Ship theory handbook] / Podred. Y.I. Voitkenskogo [Ed. By Y.I. Voitkounski], Leningrag, Sudostroenie, 1985. Vol. I, 768 p.