

УДК: 629.5

Использование приповерхностных сеток для численного моделирования вязкостных явлений в задачах гидродинамики судна

А. А. Аксёнов^{1,а}, В. И. Похилко², А. П. Моряк²

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13

²ООО «ТЕСИС»,
Россия, 127083, г. Москва, ул. Юннатов, 18, оф. 705

E-mail: ^а andrey@tesis.com.ru

Получено 04.05.2023, после доработки — 19.07.2023.

Принято к публикации 14.08.2023.

Численное моделирование обтекания судового корпуса, работы гребного винта, а также решение других задач гидродинамики судна в адаптивных локально-измельченных сетках на основе прямоугольных начальных сеток обладают рядом преимуществ в области подготовки расчетов и являются весьма удобными для проведения экспресс-анализа. Однако при необходимости существенного уточнения моделирования вязкостных явлений возникает ряд сложностей, связанных с резким ростом числа неизвестных при адаптации расчетной сетки до высоких уровней, которая необходима для разрешения пограничных слоев, и снижением шага по времени в расчетах со свободной поверхностью из-за уменьшения пролетного времени проадаптированных ячеек. Для ухода от этих недостатков предлагается использовать для разрешения пограничных слоев дополнительные приповерхностные сетки, представляющие собой одномерные адаптации ближайших к стенке слоев расчетных ячеек основной сетки. Приповерхностные сетки являются дополнительными (или химерными), их объем не вычитается из объема основной сетки. Уравнения движения жидкости интегрируются в обеих сетках одновременно, а стыковка решений происходит по специальному алгоритму. В задаче моделирования обтекания судового корпуса приповерхностные сетки могут обеспечивать нормальное функционирование низкорейнольдсовых моделей турбулентности, что существенно уточняет характеристики потока в пограничном слое у гладких поверхностей при их безотрывном обтекании. При наличии на поверхности корпуса отрывов потока или других сложных явлений можно делить поверхность корпуса на участки и использовать приповерхностные сетки только на участках с простым обтеканием, что тем не менее обеспечивает большую экономию ресурсов. В задаче моделирования работы гребного винта приповерхностные сетки могут обеспечивать отказ от пристеночных функций на поверхности лопастей, что ведет к значительному уточнению получаемых на них гидродинамических сил. Путем изменения числа и конфигурации слоев приповерхностных ячеек можно варьировать разрешение в пограничном слое без изменения основной сетки, что делает приповерхностные сетки удобным инструментом исследования масштабных эффектов в рассмотренных задачах.

Ключевые слова: приповерхностная сетка, гидродинамика судна, численное моделирование обтекания корпуса, численное моделирование работы винта

UDC: 629.5

Usage of boundary layer grids in numerical simulations of viscous phenomena in of ship hydrodynamics problems

A. A. Aksenov^{1,a}, V. I. Pokhilko², A. P. Moryak²

¹Joint Institute for High Temperatures RAS,
13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

²“TESIS” LLC,
off. 705, 18 Unnatov st., Moscow, 127083, Russia

E-mail: ^a andrey@tesis.com.ru

Received 04.05.2023, after completion – 19.07.2023.

Accepted for publication 14.08.2023.

Numerical simulation of hull flow, marine propellers and other basic problems of ship hydrodynamics using Cartesian adaptive locally-refined grids is advantageous with respect to numerical setup and makes an express analysis very convenient. However, when more accurate viscous phenomena are needed, they condition some problems including a sharp increase of cell number due to high levels of main grid adaptation needed to resolve boundary layers and time step decrease in simulations with a free surface due to decrease of transit time in adapted cells. To avoid those disadvantages, additional boundary layer grids are suggested for resolution of boundary layers. The boundary layer grids are one-dimensional adaptations of main grid layers nearest to a wall, which are built along a normal direction. The boundary layer grids are additional (or chimerical), their volumes are not subtracted from main grid volumes. Governing equations of flow are integrated in both grids simultaneously, and the solutions are merged according to a special algorithm. In simulations of ship hull flow boundary layer grids are able to provide sufficient conditions for low-Reynolds turbulence models and significantly improve flow structure in continues boundary layers along smooth surfaces. When there are flow separations or other complex phenomena on a hull surface, it can be subdivided into regions, and the boundary layer grids should be applied to the regions with simple flow only. This still provides a drastic decrease of computational efforts. In simulations of marine propellers, the boundary layer grids are able to provide refuse of wall functions on blade surfaces, what leads to significantly more accurate hydrodynamic forces. Altering number and configuration of boundary grid layers, it is possible to vary a boundary layer resolution without change of a main grid. This makes the boundary layer grids a suitable tool to investigate scale effects in both problems considered.

Keywords: boundary layer grid, ship hydrodynamics, numerical simulation of hull flow, numerical simulation of marine propellers

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 995–1008 (Russian).

1. Введение

В настоящее время моделирование задач гидродинамики судна чаще всего основано на математических моделях, включающих уравнения Рейнольдса и двухпараметрические модели турбулентности (RANS) [Wilcox, 1994; Белов, Исаев, 2001; Гарбарук, Стрелец, Шур, 2012]. Чаще всего используется модель турбулентности SST [Menter, Kuntz, Langtry, 2003; Menter et al., 2003], для моделирования ламинарно-турбулентного перехода используется модель SST с расширением $\gamma-Re_\theta$ [Langtry, Menter, 2009]. Пристеночные функции для модели SST изложены в работе [Grotjans, Menter, 1998]. Также используются модели $k-\epsilon$ [Wilcox, 1994] и ее низкорейнольдсовые версии, например модель AKN [Abe, Kondoh, Nagano, 1994].

В ряде работ [Печенюк, 2014; Aksenov, Pechenyuk, Vučinić, 2015; Aksenov et al., 2017] были представлены подобные подходы к численному моделированию различных задач гидродинамики судна на основе адаптивной локально измельченной сетки (АЛИС), реализованной в программном комплексе (ПК) FlowVision. Особенностью АЛИС является построение на основе начальной прямоугольной сетки, задаваемой пользователем без учета ее пересечений с граничными условиями (ГУ). Ячейки начальной сетки, пересекающиеся с ГУ, перед началом расчета автоматически преобразуются в многогранники сложной формы, которые и формируют пристеночный слой расчетных ячеек (так называемое подсеточное разрешение геометрии [Aksenov, Dyadkin, Pokhilko, 1998]). В некоторых случаях пристеночные ячейки АЛИС могут перестраиваться на каждой итерации (например, при моделировании движения тел). Данный подход существенно упрощает постановку и ускоряет подготовку расчетов. Однако особенности АЛИС, очень удобные при проведении экспресс-анализа с небольшим числом неизвестных, могут создавать препятствия для резкого сгущения расчетной сетки с целью повышения точности решения. Такая необходимость обычно связана с моделированием процессов в пограничном слое (ПС).

В качестве эффективного способа повышения точности, особенно в задачах, включающих такие элементы, как свободная поверхность, скользящие ГУ, отрывы ПС или другие сложные явления, предлагается комбинировать АЛИС с приповерхностными сетками. Приповерхностная сетка в ПК FlowVision представляет собой дополнительную (химерную) сетку по отношению к основной АЛИС. Уравнения движения жидкости интегрируются в обеих сетках одновременно, а стыковка решений происходит по специальному алгоритму. Приповерхностная сетка ориентирована на дополнительное разрешение двух пристеночных слоев ячеек только вдоль нормали к стенке, т. е. представляет собой одномерную адаптацию. Очевидно, такая реализация имеет свои сильные и слабые стороны.

В настоящей статье показано, что при рациональном использовании приповерхностных сеток в задачах гидродинамики судна можно достичь существенного уточнения распределения скоростей в ПС на участках безотрывного обтекания при минимальном приросте числа неизвестных. При этом, применяя различные конфигурации приповерхностных сеток, можно легко варьировать числа y^+ в достаточно широких пределах для улучшения условий работы моделей турбулентности и пристеночных функций либо создавать условия для отказа от последних. Такое варьирование, при неизменности основной сетки, может также служить удобным инструментом исследования масштабных эффектов.

2. Технология приповерхностной сетки

Приповерхностная сетка в ПК FlowVision реализована как наложенная (химерная) сетка. Геометрически она представляет собой призматическую криволинейную сетку. Призматическая сетка строится как экструзия криволинейных треугольных или четырехугольных форм, образованных пересечением основной сетки со стенкой. Высота призматической сетки (расстояние экструзии) соизмерима с размером ячеек основной сетки, примыкающих к стенке. Толщина ячеек

призматической сетки может быть постоянной либо меняться в направлении от стенки согласно заданному коэффициенту от 0 до 2 (обычно используется коэффициент 1,2). Таким образом, применение призматической сетки позволяет получать разные размеры первой ячейки, в том числе такие, у которых безразмерная толщина y^+ может быть меньше 1, что позволяет отказаться от применения пристеночных функций при расчете уравнений RANS [Wilcox, 1994].

Взаимодействие решений на двух сетках происходит следующим образом. На внешнюю поверхность приповерхностной сетки интерполируются все искомые данные, найденные на основной сетке. Эти значения используются в качестве ГУ для решения на приповерхностной сетке. Решения из приповерхностной сетки, получаемые на стенке (касательное напряжение и др.), передаются в основную сетку.

3. Использование приповерхностных сеток в численном моделировании обтекания судового корпуса

В работе [Печенюк, 2014] были представлены результаты численного моделирования обтекания корпуса контейнеровоза KCS, известного объекта исследований в вычислительной гидродинамике судна, выполненные в АЛИС в натурном масштабе. Численное моделирование было ориентировано на получение буксировочного сопротивления корпуса в условиях тихой и глубокой воды для сравнения с данными модельного эксперимента в опытовом бассейне [Kim, Van, Kim, 2001]. В расчетах использовалась математическая модель несжимаемой жидкости на основе уравнений Рейнольдса со стандартной $k-\epsilon$ -моделью турбулентности; на поверхности корпуса использовались пристеночные функции с логарифмическим законом для скорости. Для моделирования волнообразования на свободной поверхности использовался модифицированный метод Volume of fluid (VOF) [Hirt, Nichols, 1981] в варианте взаимодействия сплошной среды ($VOF = 1$) и нерасчетной фазы типа «вакуум» ($VOF = 0$). Невозмущенная свободная поверхность задавалась с помощью соответствующего начального условия. Задача ставилась по схеме гидрлотка в расчетной области, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 1). Размеры расчетной области и ГУ на ее границах выбирались так, чтобы имитировать безграничный поток.

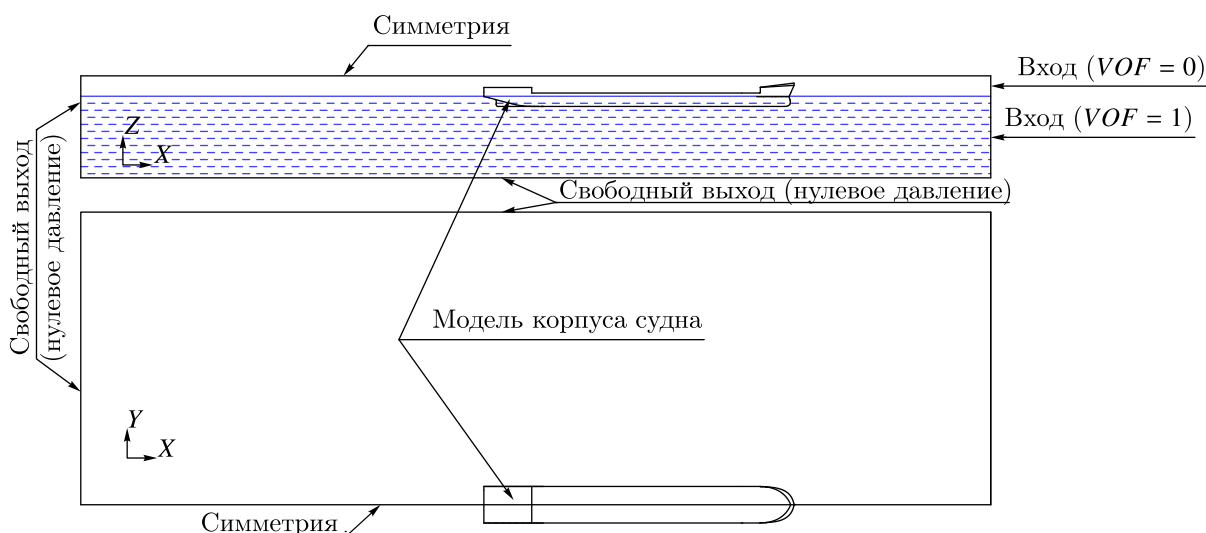


Рис. 1. Схема расчетной области и ГУ в задаче моделирования обтекания судового корпуса

По результатам численного моделирования была зафиксирована достаточно хорошая точность по буксировочному сопротивлению на фоне экспериментальных данных [Larsson, Stern,

Visonneau, 2014]. Подобная постановка продолжает использоваться при решении исследовательских и инженерных задач [Печенюк, 2017]. В докладе [Aksenov et al., 2017] представлены ее доработки, касающиеся изменения структуры АЛИС с отказом от локальной адаптации в районе свободной поверхности. Оказалось, что локальная адаптация в объеме, охватывающем часть свободной поверхности, может приводить к нефизичным эффектам в виде возмущений по границам объема. Причиной возмущений, по-видимому, является слишком резкий переход между ячейками с разными уровнями адаптации, размеры которых при равномерной начальной сетке отличаются в два раза. Прямоугольная сетка с полностью одинаковым уровнем адаптации, в том числе нулевым, может быть построена с более плавным изменением размеров соседних ячеек.

В обоих указанных вариантах расчетная АЛИС ориентирована на разрешение полей давлений движущегося корпуса и вызванного ими волнообразования на свободной поверхности. Как видно из распределения величин y^+ (рис. 2), соответствующего расчетной сетке в работе [Aksenov et al., 2017], разрешение ПС как таковое отсутствует. В подобных условиях стандартная $k-\epsilon$ -модель турбулентности и пристеночные функции все же позволяют получать касательные напряжения и силу трения, которые хорошо согласуются с оценками на основе экстраполяции результатов испытаний пластин, причем моделирование позволяет учесть эффекты трехмерности судовой поверхности на силу трения.

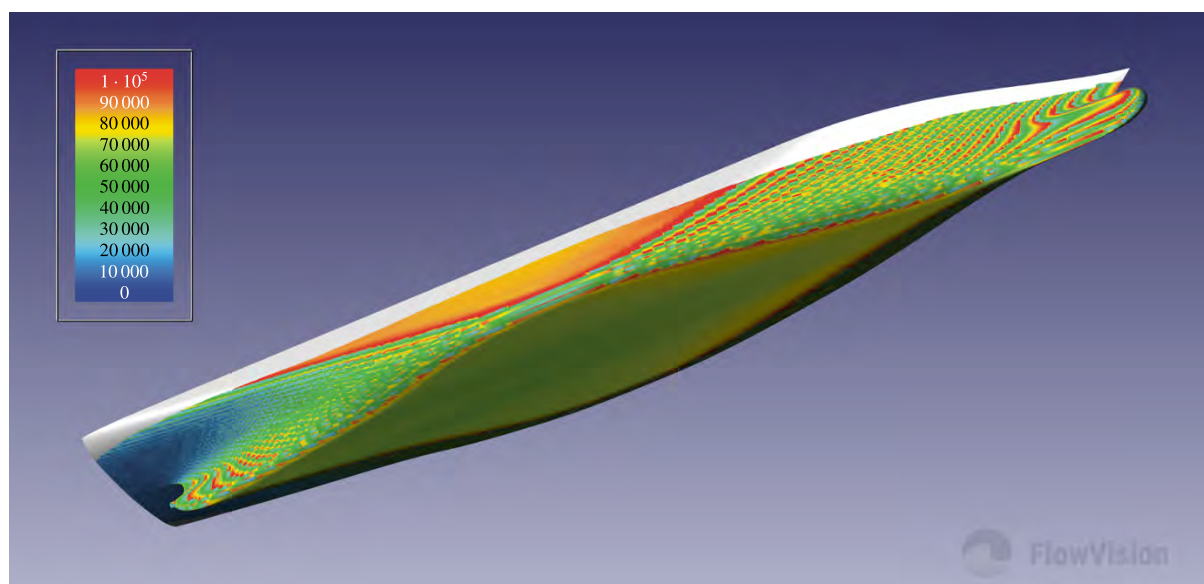


Рис. 2. Распределение y^+ по поверхности натурального корпуса KCS при скорости 24 узла ($Fr = 0,26$), расчетная сетка без локальной адаптации с 1,8 млн расчетных ячеек на половину симметричного потока

Наиболее заметным недостатком столь грубого подхода к моделированию ПС является отсутствие или недоразвитие отрывов потока в кормовой части корпуса. Это может приводить к заниженной величине буксировочного сопротивления и неверной картине скоростей и давлений в попутном потоке (гидродинамическом следе) корпуса. Вместе с тем во многих случаях моделирование обтекания корпуса со свободной поверхностью в подобных сетках, на наш взгляд, оправданно. Это относится к корпусам, у которых заведомо отсутствуют существенные отрывы ПС (например, корпуса с острыми обводами) или отрывы имеют фиксированные границы на сломах поверхности; к случаям, когда обтекание кормовой части играет второстепенную роль в исследовании (например, оптимизационные задачи типа [Печенюк, 2017]); к случаям, когда эффекты волнообразования и вязкости допустимо исследовать отдельно (например, некоторые тихоходные суда).

При раздельном исследовании эффекты вязкости можно моделировать более точно в постановке с плоскостью симметрии на уровне невозмущенной свободной поверхности (соответствует испытанию дублированной модели в аэродинамической трубе или в опытовом бассейне глубоко под поверхностью воды). При этом локальные адаптации АЛИС не вызывают проблем на свободной поверхности и, что не менее важно, не ограничивают шаг по времени, поскольку в ПК FlowVision модель свободной поверхности (модифицированный метод VOF) реализована по явной схеме и устойчива при шагах по времени, которые существенно меньше, чем могут быть при неявной модели безграничного потока. Последняя особенность подталкивает выбирать в расчетах со свободной поверхностью более крупные размеры ячеек, особенно в направлении потока, поскольку они прямо влияют на минимальное пролетное время, принимаемое за шаг по времени. К счастью, корабельные волны при характерных для движения судов числах Фруда являются достаточно крупномасштабными структурами по отношению к размерам судна, поэтому такой подход в целом не противоречит их корректному моделированию. Под раздельным моделированием можно также понимать выполнение расчетов со свободной поверхностью вообще без учета вязкости. Методы пересчета на основе гипотезы Фруда о независимости составляющих сопротивления позволяют и в этом случае оценить полное сопротивление корпуса с учетом результатов, полученных с волнообразованием без вязкости и в вязком безграничном потоке. Однако, на наш взгляд, присутствие в расчетах с волнообразованием вязкости, пусть даже в упрощенном виде, полезно, так как позволяет при минимальных затратах ресурсов учитывать и некоторые эффекты взаимодействия между вязкостной и волновой составляющими потока.

С другой стороны, существует целый ряд практических задач, где требуются более точные подходы к моделированию влияния вязкости. К ним можно отнести исследования корпусов полных обводов, в кормовой части которых происходит интенсивный отрыв ПС [Лобачев, 2013]; корпусов со сложной поверхностью в кормовой части (например, туннельные обводы речных судов), которые нуждаются в отработке с учетом возможных отрывов ПС; корпусов с незначительными отрывами ПС или даже с безотрывным обтеканием, для которых нужно получить приближенное к реальности распределение скоростей в ПС или в попутном потоке (например, с целью проектирования движителей или различных специальных устройств).

В настоящее время предлагается все больше подходов к численному моделированию вязкостных явлений, но многие из них являются очень сложными и затратными в отношении вычислительных ресурсов. Если же попытаться уточнить решение, в целом сохраняя описанную выше постановку, то в качестве первого шага можно перейти на низкорейнольдсовую модель турбулентности (например, модель $k-\omega$ или SST (от англ. shear stress transport)). Для этого необходимо снизить числа y^+ до величин порядка 10^2 . В случае если основная АЛИС рассматривается как достаточная для разрешения полей давления, волнообразования и других явлений, за исключением ПС, этого легко достичь с помощью приповерхностных сеток. Например, при задании по всей поверхности корпуса контейнеровоза KCS приповерхностной сетки из четырнадцати слоев, с коэффициентом роста толщины слоя в направлении от стенки 1,5, распределение y^+ , показанное на рис. 1, изменится желаемым образом (рис. 3). При этом в задаче с 1,8 млн расчетных ячеек добавляется лишь 186 тыс. расчетных ячеек приповерхностной сетки, которые к тому же не влияют на шаг по времени, поскольку он определяется по пролетному времени ячеек основной сетки. Подобные параметры расчетной сетки вполне позволяют выполнять вычисления на достаточно мощном персональном компьютере. Поперечное сечение АЛИС и приповерхностной сетки показано на рис. 4. Модель SST в ПК FlowVision реализована так, что при $y^+ > 300$ работает как стандартная $k-\epsilon$ -модель, поэтому приповерхностные сетки допустимо задавать на отдельных ГУ и включать на любом этапе расчета, что достаточно удобно для поэтапного уточнения решения и анализа результатов.

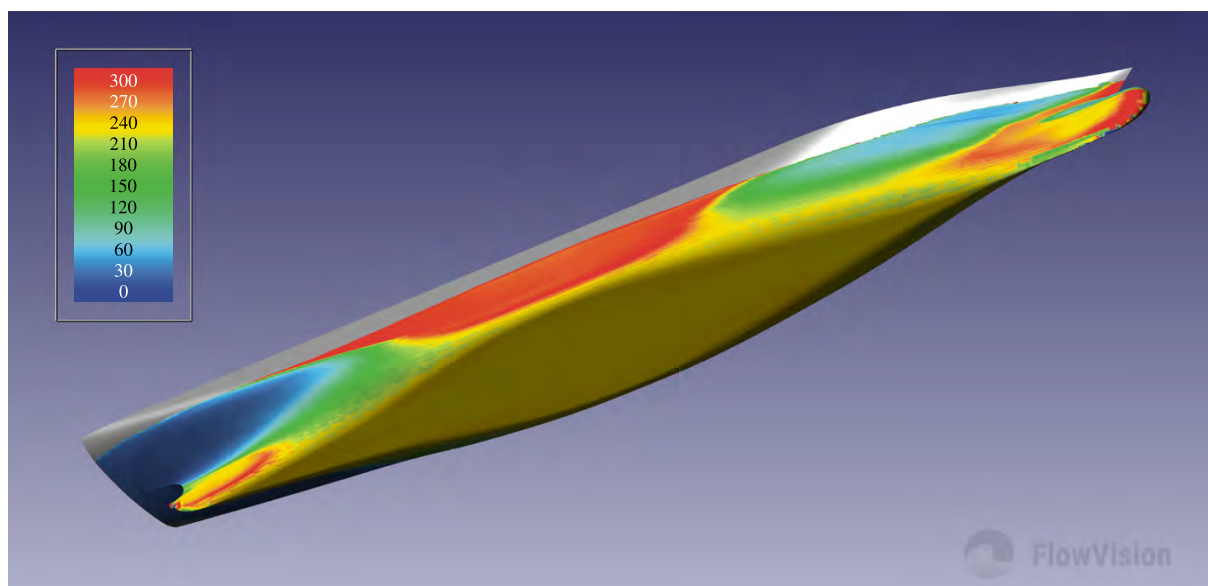


Рис. 3. Распределение y^+ по поверхности натурального корпуса KCS при скорости 24 узла ($Fr = 0,26$), по сравнению с рис. 1 добавлена приповерхностная сетка с 186 тыс. расчетных ячеек

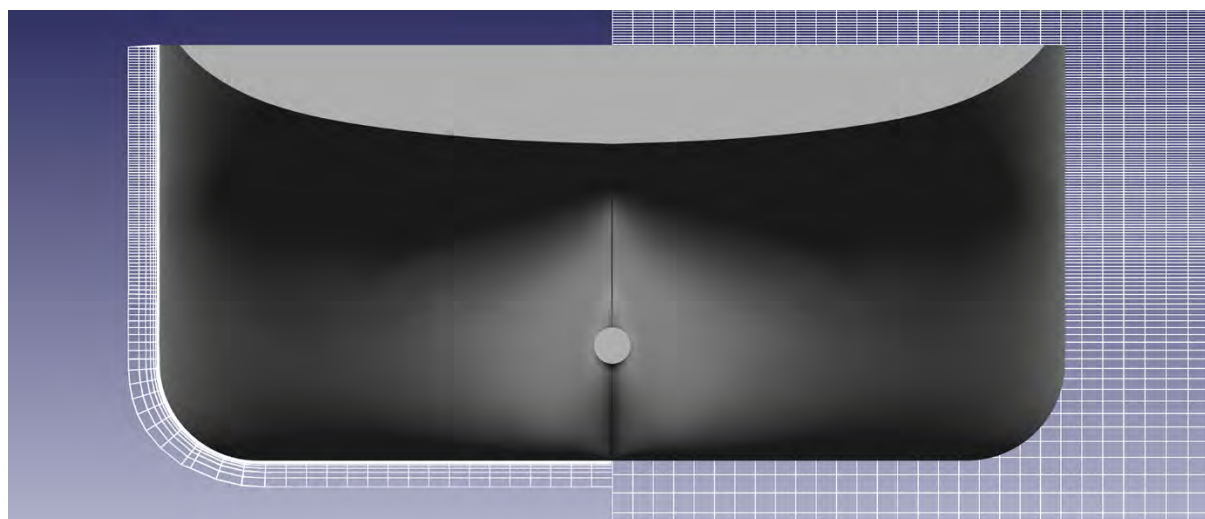


Рис. 4. Поперечное сечение (вид на корму корпуса KCS) основной АЛИС (справа) и приповерхностной сетки (слева)

Еще проще обеспечить аналогичные условия по y^+ для расчетов, выполняемых в масштабе модели. Для этого можно задать меньшее число слоев приповерхностной сетки. Таким образом, в расчетах, выполняемых в разных масштабах, можно задать одинаковую основную сетку, но разные приповерхностные сетки, обеспечивающие при этом одинаковые числа y^+ . В некотором приближении можно считать, что подобие основной сетки соответствует равенству чисел Фруда (поскольку основная сетка ориентирована в основном на волнообразование), а разные приповерхностные сетки позволяют корректно учесть разные числа Рейнольдса. Так можно отслеживать масштабные эффекты. Например, масштабный эффект, описанный в работе [Печенюк, 2014] при использовании стандартной $k-\epsilon$ -модели и одинаковой АЛИС в виде изменения величины буксировочного сопротивления и изменения формы кормовой волны, при использовании

приповерхностных сеток и модели SST в величине буксировочного сопротивления не обнаруживается. Очевидно, данный эффект носит чисто схемный характер.

При отсутствии существенных отрывов ПС применение приповерхностных сеток влияет на силу буксировочного сопротивления в небольших пределах. На примере расчетов контейнеровоза KCS в модельном масштабе (рис. 5) видно, что с приповерхностной сеткой и моделью турбулентности SST буксировочное сопротивление получается несколько ближе к экспериментальному значению.

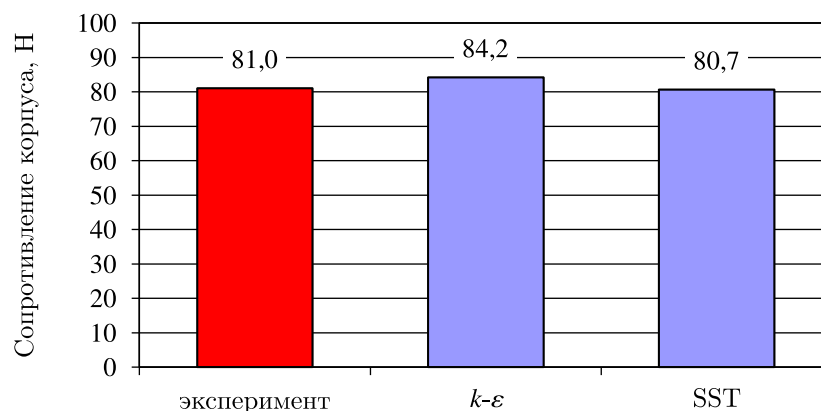


Рис. 5. Буксировочное сопротивление корпуса KCS в модельном масштабе при $Fr = 0,26$

Однако при всех своих преимуществах приповерхностные сетки неспособны обеспечить адекватное моделирование сложных течений, в том числе отрывов ПС, если основная АЛИС является слишком грубой. Для разрешения сложных участков потока необходимо выполнять адаптацию АЛИС, поскольку в этом случае расчетная сетка измельчается во всех трех измерениях, а решение уточняется по всем параметрам потока. При моделировании судовых корпусов адаптацию можно выполнять локально, заданием повышенных уровней на участках кормовой оконечности, где потенциально может возникнуть отрыв ПС. Если такие участки находятся ниже свободной поверхности, их адаптация не приведет к уменьшению шага по времени. Для корректного моделирования также важно, чтобы ПС подходил к месту отрыва с адекватным распределением скоростей и параметров турбулентности, поэтому соседние участки поверхности корпуса, особенно расположенные выше по потоку, должны быть разрешены до величин y^+ , сопоставимых с достигнутыми на участке с отрывом, что нетрудно осуществить с помощью приповерхностных сеток.

На рис. 6 и 7 представлены примеры визуализации моделирования обтекания корпусов по описанному выше методу. На изображениях с линиями тока дополнительно показано разделение корпусов на участки: голубым цветом выделена зона адаптации АЛИС, зеленым — участки с приповерхностными сетками, серым — второстепенные участки без дополнительного уточнения сетки. На рис. 6 показано обтекание корпуса речного буксира с туннельными образованиями в кормовой части, внутри которых наблюдаются отрывные явления. На рис. 7 показано обтекание корпуса двухвинтового транспортного судна река-море плавания с большой полнотой обводов, у которого отрыв ПС наблюдается на кормовых обтекателях-мотогондолах.

Аналогичный подход может быть использован при моделировании обтекания корпуса с работающими гребными винтами, которое применяется для определения параметров гидродинамического взаимодействия в системе «корпус – движитель» (рис. 8).

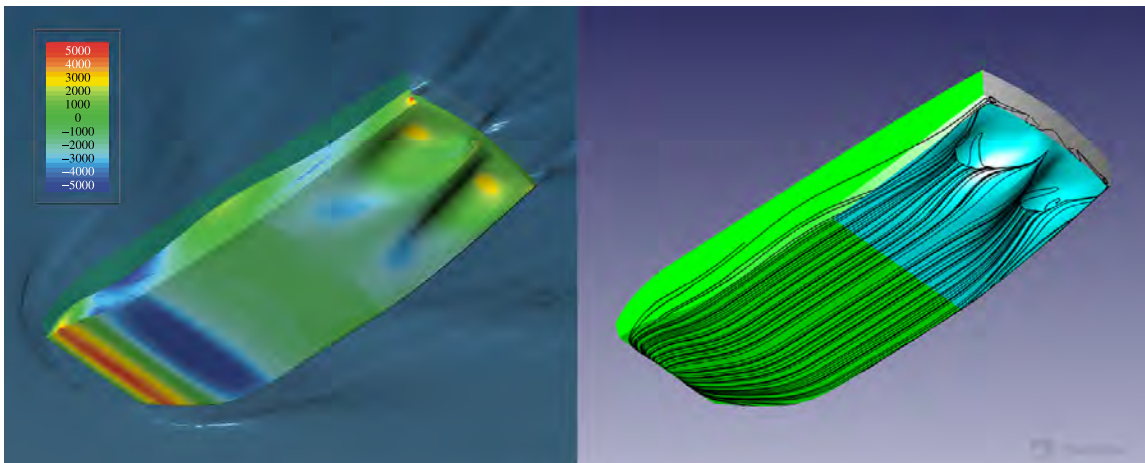


Рис. 6. Линии тока (справа) и распределение давлений (палитра в Па) со свободной поверхностью (слева) по поверхности корпуса речного буксира при скорости 8,5 узла

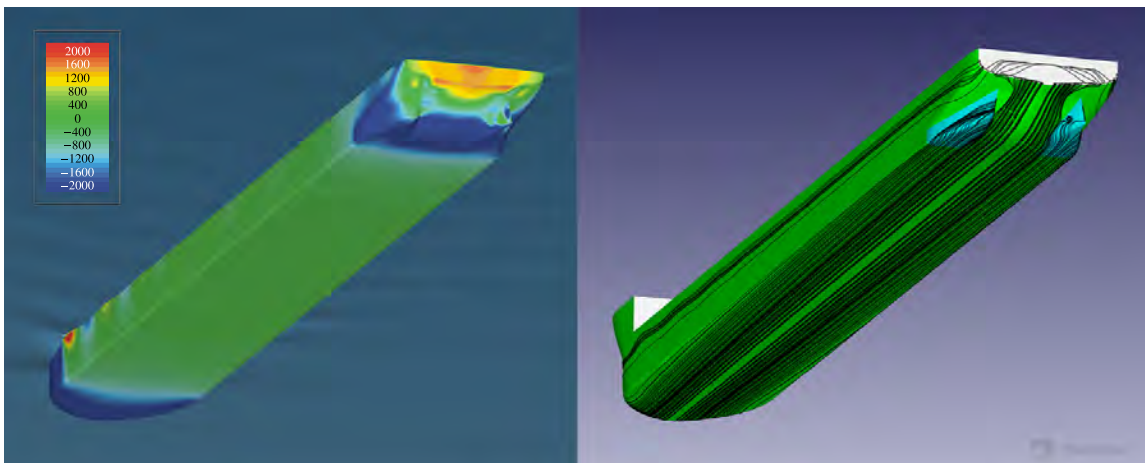


Рис. 7. Линии тока (справа) и распределение давлений (палитра в Па) со свободной поверхностью (слева) по поверхности корпуса транспортного судна река-море плавания при скорости 9 узлов

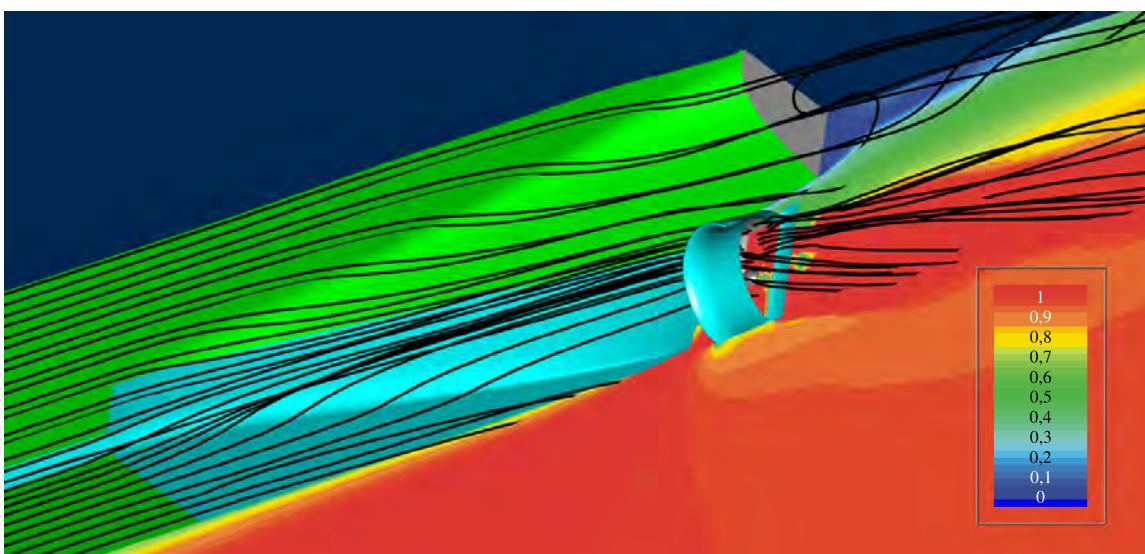


Рис. 8. Пространственные линии тока и безразмерное распределение скоростей в продольной вертикальной плоскости при моделировании обтекания корпуса судна с работающими гребными винтами

4. Использование приповерхностных сеток в численном моделировании работы судового гребного винта

Специфика моделирования судового гребного винта, как в свободном потоке, так и за корпусом судна, заключается в необходимости обеспечить высокую точность определения сил и моментов на лопастях, обтекание которых напоминает обтекание крыльев малого размаха при небольших углах атаки. На основных рабочих режимах, как правило, обтекание лопастей безотрывное. Сложность заключается в скрупулезном учете всех особенностей геометрии лопастей и обтекающего их потока, поскольку даже небольшие неточности ведут к существенным ошибкам в упоре и моменте. Упор гребного винта (или сумма упоров всех винтов, если на судне их несколько) представляет собой силу, уравнивающую сопротивление корпуса и различные дополнительные эффекты, для обеспечения движения судна с постоянной скоростью. Поскольку площадь поверхности гребного винта во много раз меньше, чем поверхность корпуса, это приводит к более высоким требованиям к точности моделирования. В зависимости от задачи моделирования постановка может осложняться наличием скользящих поверхностей (например, для моделирования вращения винта относительно неподвижного корпуса судна), моделей кавитации или ламинарно-турбулентного (ЛТ) перехода.

Как и в случае судового корпуса, в основе предлагаемой постановки лежит математическая модель несжимаемой жидкости, включающая уравнения Рейнольдса и модель турбулентности. Однако для получения достаточно точных для практики результатов полезно использовать низко-рейнольдсовы модели турбулентности, а также отказаться от пристеночных функций. Для этого необходимо обеспечить на лопастях величины $y^+ \approx 1$, что может быть эффективно выполнено с помощью приповерхностных сеток (рис. 9).

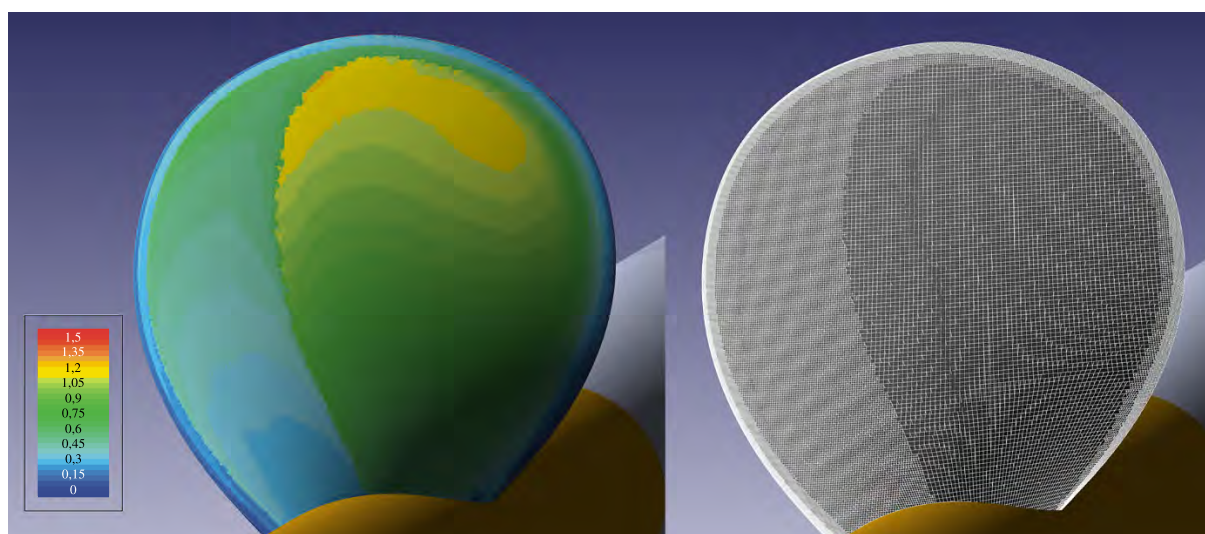


Рис. 9. Распределение y^+ по поверхности лопасти гребного винта (слева) и сечение основной АЛИС поверхностью лопасти (справа)

На рис. 9 показаны характеристики расчетной сетки для моделирования трехлопастного гребного винта DTMB 4119 [Jessup, 1989] в модельном масштабе. Структура основной АЛИС построена на основе опыта численного моделирования дозвукового обтекания крыльев [Жлуктов, Аксёнов, Харченко, Москалёв, Сушко, Шишаева, 2010; Жлуктов, Аксёнов, Карасёв, 2016], согласно которому сетку полезно сгущать, в первую очередь вдоль кромок, а затем вдоль носовой части профиля сечения. Приповерхностные сетки (три отдельные для каждой лопасти) строятся на основе четырехугольников, образованных сечением АЛИС поверхностями лопастей.

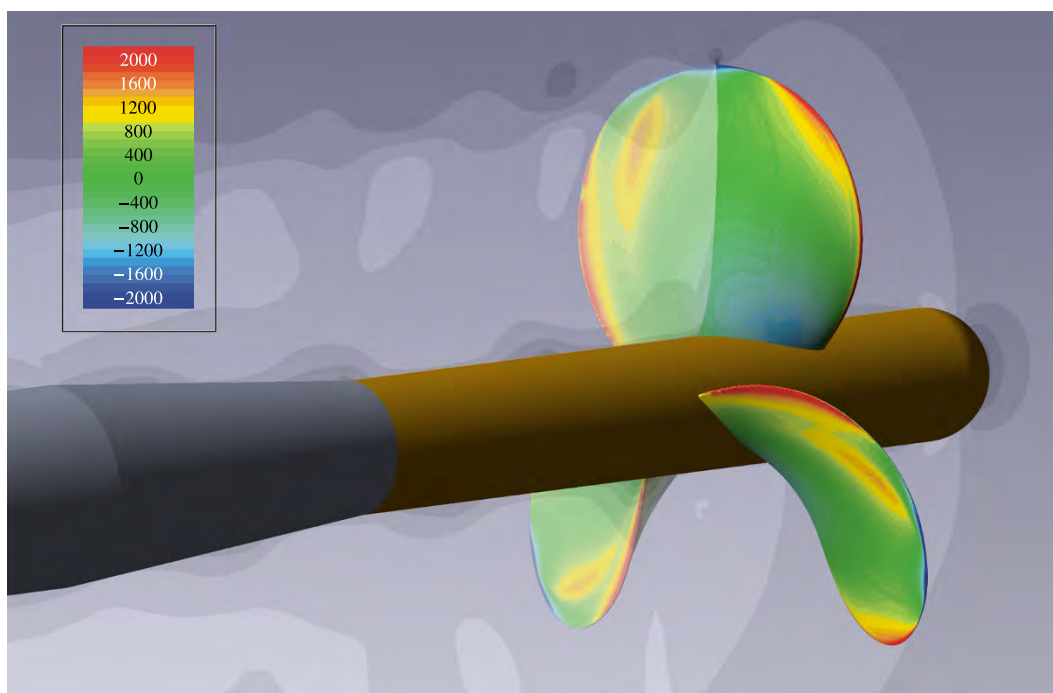


Рис. 10. Распределение давления по лопастям гребного винта DTMB 4119 (палитра в Па) и контуры скоростей потока в вертикальной продольной плоскости

Всего в представленном проекте 5,4 млн расчетных ячеек основной сетки и 3,7 млн ячеек приповерхностных сеток, заданных в четырнадцать слоев с коэффициентом роста толщины слоев 1,4, что обеспечивает достаточно подробное разрешение потока (рис. 10). Подобные параметры расчетной сетки, в принципе, позволяют выполнять вычисления на персональных компьютерах. В случае моделирования изолированного винта можно дополнительно снизить размер задачи, применив роторно-секторную постановку.

Для близкого соответствия силовых характеристик гребного винта экспериментальным данным в большинстве случаев необходимо обеспечивать моделирование ЛТ-перехода на лопастях [Панов и др., 2013]. Однако эта проблема в большей степени касается тестовых расчетов в модельных условиях. При работе натурального гребного винта обтекание лопастей, как правило, становится полностью турбулентным. Немаловажно, что натуральный винт большего размера может иметь заметно больший коэффициент полезного действия (в зависимости от его числа Рейнольдса), что желательно учитывать в проектировочных расчетах ходовых качеств судов. Поэтому представляется, что работу гребных винтов в практических целях можно моделировать в натурном масштабе, не учитывая явления перехода. Достаточно удобным инструментом для этого могут служить приповерхностные сетки. В качестве примера на рис. 11 показано сравнение коэффициентов полезного действия (КПД) винта DTMB 4119, полученных численно в модельном и натурном масштабах без использования модели ЛТ-перехода (в расчетах отличались приповерхностные сетки по условию обеспечения $y^+ \approx 1$), с экспериментальными данными в оригинальном виде и пересчитанными на тот же натуральный масштаб по стандартной методике ITTC 1978 [Carlton, 2007, с. 95].

5. Заключение

Представлена технология приповерхностной сетки, дополняющей основную адаптивную локально измельченную сетку, реализованную в ПК FlowVision. Приповерхностные сетки слу-

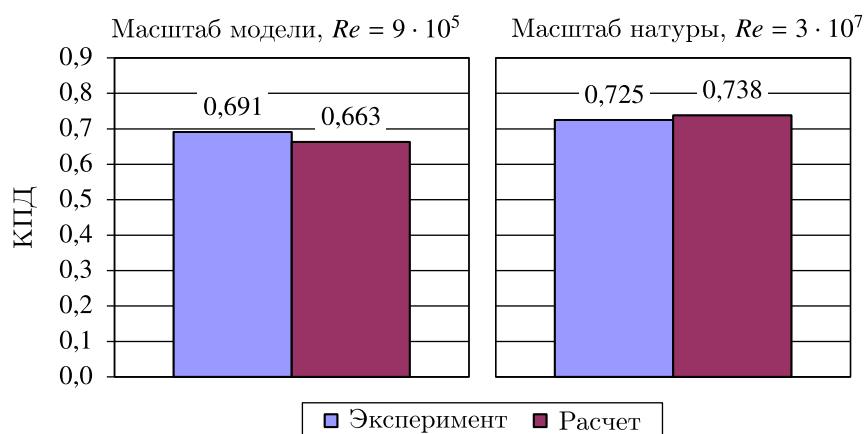


Рис. 11. Сравнение КПД гребного винта DTMB 4119 при относительной поступи 0,833

жат для дополнительного разрешения ближайших к стенке слоев расчетных ячеек, что ведет к уточнению распределения скоростей и других характеристик потока в пограничных слоях.

Показано, что приповерхностные сетки позволяют значительно уточнить моделирование обтекания судовых корпусов без усложнения постановки за счет создания условий для нормального функционирования низкорейнольдсовых моделей турбулентности, в том числе при моделировании в натурном масштабе. При безотрывном обтекании на гладких поверхностях этого вполне достаточно для получения буксировочного сопротивления с высокой точностью. Одновременно применение приповерхностных сеток не снижает явный шаг по времени, используемый в задачах со свободной поверхностью, так как он определяется по пролетному времени ячеек основной сетки.

При наличии в потоке сложных явлений, таких как отрывы пограничного слоя с незафиксированными границами, рекомендуется в районах этих явлений выделять на поверхности корпуса участки с высокоуровневой адаптацией основной сетки, а участки с безотрывным обтеканием адаптировать с помощью приповерхностных сеток, обеспечивая по всей поверхности корпуса близкие величины y^+ .

В задаче моделирования работы судового гребного винта приповерхностные сетки являются удобным и эффективным способом обеспечить отказ от пристеночных функций на поверхности лопастей, что позволяет значительно уточнить получаемые на них гидродинамические силы.

Поскольку приповерхностные сетки по существу являются одномерными локальными адаптациями основной сетки, их применение сопровождается большой экономией вычислительных ресурсов по сравнению с полной (трехмерной) адаптацией основной сетки. Разница в числе неизвестных между такими вариантами адаптации резко возрастает с ростом числа Рейнольдса при фиксированном требовании к величине y^+ .

Благодаря возможности варьирования величин y^+ путем изменения числа и конфигурации слоев приповерхностных сеток при неизменной основной сетке, они являются удобным инструментом исследования различного рода масштабных эффектов в рассмотренных задачах.

Список литературы (References)

Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. — СПб.: Издательство Балтийского государственного технического университета, 2001. — 108 с.

- Belov I. A., Isaev S. A.* Modelirovanie turbulentnykh techeniy: uchebnoye posobie [Simulation of turbulent flows: textbook]. — Saint Petersburg: Izdatelstvo Baltiyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Publishing house of the Baltic state technical university], 2001. — 108 p. (in Russian).
- Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие. — СПб.: Издательство Политехнического университета, 2012. — 88 с.
- Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L.* Modelirovaniye turbulentnosti v raschetah slozhnykh techeniy: uchebnoye posobie [Simulation of turbulence in calculations of complex flows: textbook]. — Saint Petersburg: Izdatel'stvo Politeknicheskogo Universiteta [Publishing house of the Polytechnic University], 2012. — 88 p. (in Russian).
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Карасёв П. И.* Моделирование отрывного течения с использованием двухпараметрической модели турбулентности // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 1. — С. 79–88.
- Zhluktov S. V., Aksenov A. A., Karasev P. I.* Modelirovaniye otryvnogo techeniya s ispol'zovaniem dvukhparametricheskoi modeli turbulentnosti [Simulation of separation flow using two-parametric turbulence model] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8, No. 1. — P. 79–88 (in Russian).
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Харченко С. А., Москалёв И. В., Сушко Г. Б., Шишаева А. С.* Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НПС // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11. — С. 234–245.
- Zhluktov S. V., Aksenov A. A., Kharchenko S. A., Moskalev I. V., Sushko G. B., Shishaeva A. S.* Modelirovaniye otryvnykh techeniy v programmnom komplekse FlowVision-НПС [Simulation of separating flows in software FlowVision-НПС] // Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye [Numerical methods and programming]. — 2010. — Vol. 11. — P. 234–245 (in Russian).
- Лобачев М. П.* Исследование особенностей течения вязкой жидкости в кормовой оконечности судов с полными обводами // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2013. — № 78 (362). — С. 5–28.
- Lobachev M. P.* Issledovanie osobennostey techeniya vyazkoj zhidkosti v kormovoy okonechnosti sudov s polnymi obvodami [Investigation of viscous flow features around afterbody of ships with fat lines] // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra [Proc. of Krylov State Research Centre]. — 2013. — No. 78 (362). — P. 5–28 (in Russian).
- Панов Д. О., Смирнов Е. М., Таранов А. Е., Лобачев М. П.* Моделирование ламинарно-турбулентного перехода в задаче численного определения кривых действия гребного винта // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2013. — № 78 (362). — С. 29–42.
- Panov D. O., Smirnov E. M., Taranov A. E., Lobachev M. P.* Modelirovanie laminarno-turbulentnogo perekhoda v zadache chislennogo opredeleniya krivykh deystviya grebnogo vinta [Simulation of laminar-turbulent transition in problem of numerical determination of propeller open-water curves] // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra [Proc. of Krylov State Research Centre]. — 2013. — No. 78 (362). — P. 29–42 (in Russian).
- Печенюк А. В.* Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению // Компьютерные исследования и моделирование. — 2017. — Т. 9, № 1. — С. 57–65.
- Pechenyuk A. V.* Optimization of a hull form for decrease ship resistance to movement // Computer Research and Modeling. — 2017. — Vol. 9, No. 1. — P. 57–65 (in Russian).
- Печенюк А. В.* Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 889–899.
- Pechenyuk A. V.* Jetalonnoye testirovanie PK FlowVision v zadache modelirovaniya obtekanija sudovogo korpusa [Benchmarking of CEA FlowVision in ship flow simulation] // Computer Research and Modeling. — 2014. — Vol. 6, No. 6. — P. 889–899 (in Russian).
- Abe K., Kondoh T., Nagano Y.* A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows — I. Flow field calculation // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. — 1994. — Vol. 37, No. 1. — P. 139–151.
- Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V.* Overcoming of barrier between CAD and CFD by modified finite volume method // Proc. of 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. — San Diego (California, USA), 1998. — Vol. 377-1.
- Aksenov A. A., Pechenyuk A. V., Vučinić D.* Ship hull form design and optimization based on CFD // Towards green marine technology and transport / Guedes Soares C., Dejhalla R., Pavletic D. (eds.). — 1st ed. — London (UK), 2015. — P. 215–224.
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Silaev D. P., Kharchenko S. A., Ilyin V. A., Pechenyuk A. V., Ryabinkin E. A., Velikhov V. E.* Investigating the problems of ship propulsion on a supercomputer //

- Proc. of Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS-2017). — Los Alamitos (USA), 2017. — P. 124–132.
- Carlton J.* Marine propellers and propulsion. — 2nd ed. — Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, 2007. — 560 p.
- Grotjans H., Menter F.R.* Wall functions for industrial applications // Proc. of Computational Fluid Dynamics'98, ECCOMAS / ed. K.D. Papailiou. — Wiley (UK), 1998. — Vol. 1 (2). — P. 1112–1117.
- Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. — 1981. — Vol. 39, No. 1. — P. 201–225.
- Jessup S.D.* An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow. — Washington (D. C.): the Catholic University of America, 1989.
- Kim W.J., Van D.H., Kim D.H.* Measurement of flows around modern commercial ship models // Exp. in Fluids. — 2001. — Vol. 31. — P. 567–578.
- Langtry R.B., Menter F.R.* Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized // AIAA Journal: Computational Fluid Dynamics Codes. — 2009. — Vol. 47, No. 12. — P. 2894–2906.
- Larsson L., Stern F., Visonneau M.* Numerical ship hydrodynamics: an assessment of the Gothenburg 2010 workshop. — Dordrecht: Springer, 2014.
- Menter F., Carregal F.J., Esch T., Konno B.* The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines // Proc. of the International Gas Turbine Congress. — Tokyo, 2003. — P. 1–7.
- Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, heat and mass transfer / eds. K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. — 2003. — No. 4. — P. 625–632.
- Wilcox D.C.* Turbulence modeling for CFD. — La Caceria (USA, California): DCW Industries, Inc., 1994. — 460 p.