

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДЕЛИ БУКСИРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА NUMECA FINE/MARINE

Никущенко Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, доцент кафедры Теории корабля
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
e-mail: Ndmityr@list.ru

Чебан Егор Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры Гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603905, Нижний Новгород, Нестерова 5
e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Вьюшкин Алексей Романович

начальник отдела концептуального и технического проектирования
Открытое акционерное общество конструкторское бюро по проектированию судов «Вымпел»
603104, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д. 6, корпус 6
e-mail: info@vypmel.ru

Михайлов Дмитрий Сергеевич

Начальник сектора
Открытое акционерное общество конструкторское бюро по проектированию судов «Вымпел»
603104, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д. 6, корпус 6
e-mail: info@vypmel.ru

Аннотация

Использование численного моделирования при проектировании судов позволяет существенно увеличить количество информации об их гидродинамических качествах. В статье приведены результаты моделирования буксировочных испытания модели буксира, разработанного ОАО КБ «Вымпел». Основной задачей выполненной работы являлась проверка возможностей программного комплекса NUMECA FINE/Marine™ и сравнение результатов численного моделирования с результатами буксировочных испытаний.

Использовался программный комплекс NUMECA/FineMarine™, основанный на подходе RANS, и предназначенный для решения специализированных задач корабельной гидродинамики, включая определение сопротивления движению судна.

Исследовано влияние сеток различной плотности и моделей турбулентности на величину сопротивления при численном моделировании. Получено, что результаты, полученные с использованием $k-\omega$ SST и EASM моделей турбулентности для судна с одной степенью свободы отличаются несущественно. Сравнение численных и экспериментальных результатов показало достаточно хорошую сходимость. Незначительные расхождения в результатах объясняются особенностями проведения эксперимента и отсутствием достаточной информации об инерционных характеристиках модели.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, буксировочные испытания, NUMECA FINE/Marine, расчетная сетка, модели турбулентности, опытовый бассейн, оптимизация формы корпуса

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF TUG MODEL WATER RESISTANCE BY NUMECA FINE/MARINE™ CFD CODE

Dmitry V. Nikuschenko

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of ship theory
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: Ndmityr@list.ru

Egor Yu. Cheban

the associate professor, PHD, Technical Science
the associate professor of department of ship theory
Volga state university of water transport
Nesterova, 5, Nizhniy Novgorod, 603905, Russian Federation
e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Alexey R. Vyushkin

Head of the Conceptual and Technical Design Department
Vympel Design Bureau for Ship Design
Nartova, 6, Nizhniy Novgorod, 603104, Russian Federation
e-mail: info@vympel.ru

Dmitry S. Mikhailov

Head of Sector
Vympel Design Bureau for Ship Design
Nartova, 6, Nizhniy Novgorod, 603104, Russian Federation
e-mail: info@vympel.ru

Abstract

Advancements in computer technology in computational fluid dynamics (CFD) area now makes feasible to solve different ship hydrodynamic problems. As a result in a CFD approach, simulations with ship models can be performed as accurate as compared to towing tests.

A numerical study of the effects of shape hull on the water resistance for tug is given. The main purpose of this study was prediction of hydrodynamic characteristics for the Vympel shipdesign bureau's tug vessel. The NUMECA/FineMarine™ CFD code which is based on the RANS method was used. Different turbulence models were observed and their effects for the water resistance were investigated. The k- ω SST turbulence model was chosen for this study, because it allowed better results in the short time.

The comparative analysis of numerical results highlights a good agreement for the towing tests. Analysis of the flow fields around tug hull is given.

In the same time the changes between one degrees of freedom and three degrees of freedom cases can be important from the water resistance point of view. Changing of a trim angle and draft must be taken into account for greater accuracy.

Key words: CFD, towing test, NUMECA FINE/Marine, meshing, turbulence models, towing test tank, ship hull optimizing, tug vessel, water resistance

Введение

Гидродинамический эксперимент при проектировании судов позволяет решать широкий круг вопросов, связанных с взаимодействием тел с различными средами, а также учитывать изменения параметров среды и параметров движения тела. Однако из-за невозможности проведения экспериментов для натуральных объектов, исследования проводятся на геометрически подобных моделях в опытовых бассейнах.

Поскольку испытания всех возможных вариантов проектируемых судов, включая различные обводы, представляются достаточно трудоемкой задачей, то единственным практически применимым способом оценки этих характеристик, является их расчет на базе аппроксимации результатов испытаний рационально спроектированной серии моделей судна.

ОАО КБ «Вымпел» велся поиск программного продукта, который сможет частично или целиком заменить испытания модели судна в опытовом бассейне. Основными критериями поиска были три фактора – это точность расчета, время расчета и мощности вычислительной техники.

В 2015-2016 гг. на базе ОАО КБ «Вымпел» были проведены работы по тестированию программного комплекса (ПК) NUMECA/FineMarine™. Рассматривалось движение судна с учетом поверхности раздела вода/воздух и волнообразования. Целью работы было получение кривой буксировочного сопротивления для буксирного судна с постоянной осадкой и дифферентом при максимальной скорости 1,6 м/с методами вычислительной гидродинамики и сравнение с результатами буксировочных испытаний.

1. Постановка задачи численного моделирования

Использование коммерческих ПК для определения и прогнозирования гидродинамических характеристик (ГДХ) судов широко используется в ходе их проектирования. Это связано как с высоким качеством определения ГДХ с одной стороны, так и с удобным пользовательским интерфейсом и документированностью программного обеспечения. В настоящем исследовании использовался программный комплекс NUMECA/FineMarine™, основанный на подходе RANS, и

предназначенный для решения специализированных задач корабельной гидродинамики, включая определение сопротивления движению судна, расчет маневренных качеств, моделирование кавитации и работы движителей [1,2].

Исследования буксировочного сопротивления судов в условиях буксировочных и ходовых испытаний, выполненные в NUMECA/FineMarine™ для различных типов судов и объектов, свидетельствуют о достаточном соответствии расчетных и экспериментальных результатов [3-10].

Объектом исследования являлась модель буксира в масштабе 1:23 со следующими параметрами: длина между перпендикулярами – 2.304 м, осадка – 0.139 м. Изменение скорости – восемь точек от 0.55 до 1.6 м/с. Так как массовые и инерционные характеристики в результате расчета не учитывались, предполагалось, что модель не имеет возможности перемещаться в вертикальном направлении и иметь ходовой дифферент, т.е. имеет одну степень свободы.

В силу геометрической симметрии задачи моделирование производилось только для половины корпуса судна. Расчетная область строилась путем создания прямоугольного домена вокруг модели, размеры которого выбирались в соответствии с [1,2] в зависимости от характерной длины L_{pp} :

Длина в нос	$1.5 \times L_{pp}$
Ширина	$1.5 \times L_{pp}$
Длина в корму	$3 \times L_{pp}$
Глубина	$1.5 \times L_{pp}$
Высота	$0.5 \times L_{pp}$

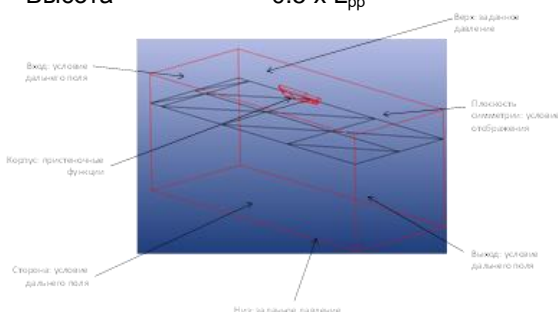


Рис. 1. Расположение граничных условий на гранях расчетной области

Для численного моделирования решающее значение имеют параметры расчетной сетки. Использовались сетки со следующими характеристиками:

- размер начальной сетки 1280 ячеек;
- сгущение сетки к поверхности корпуса - 7 циклов разбиения приграничных ячеек, для вертикального киля – 8, для палубы – 3, иной адаптации не потребовалось;
- для вязкого подслоя было выбрано ожидаемое значение безразмерной координаты сетки $y^+ = 1$, вязкий подслой строился только на поверхности корпуса, коэффициент растяжения принимался равным 1.2, высота первой ячейки - $1.79 \cdot 10^{-3}$ м;
- время построения полной сетки – 31 минута.

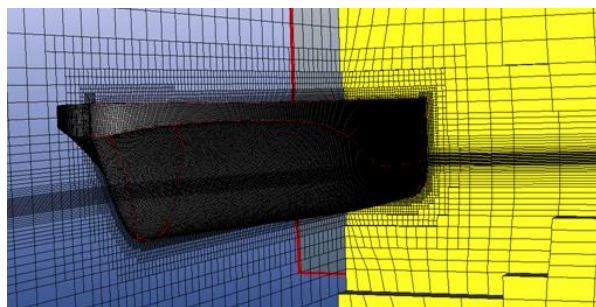


Рис. 2. Пример сетки на поверхности и около модели судна.

Для анализа сеточной независимости было построено три сетки размерностью 1.7 млн. ячеек («малой плотности»), 2.8 млн. ячеек («средней плотности») и 3.9 млн. ячеек («большой плотности»). Результаты исследования показали, что разница между величинами сопротивления, определенным с помощью этих сеток при скорости 1.6 м/с не превышает 0.35%. Для дальнейшего исследования сопротивления буксира была выбрана сетка средней плотности, которая обеспечивает необходимую точность расчета при достаточно небольших затратах машинного времени.

Было выполнено исследование влияния модели турбулентности на величину сопротивления, для чего на сетке средней плотности был выполнен расчет сопротивления на скорости 1.6 м/с с помощью двух моделей турбулентности – SST $k-\omega$ (линейная модель с двумя уравнениями [1,2]) и EASM (нелинейная модель с уравнениями переноса для k и ω [1,2]) (табл. 1). Поскольку существенной разницы в результатах нет, то для ускорения расчета использовалась SST $k-\omega$ - модель.

Использовалась схема дискретизации по времени - 2 порядка назад. Для повышения точности расчета использовалось измельчение сетки в области свободной поверхности. Физические свойства воды и воздуха выбирались из базы данных при 24,5° и 20° соответственно.

Таблица 1
Результаты проверки сеточной независимости

	Модель	R_{Σ}, H	Разница в сопротивлении, %	Смоченная поверхность, m^2
1	SST	19.53	0	0.798
2	EASM	19.23	1.526	0.795

2. Анализ результатов численного моделирования

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 3-7 для скорости 1,6 м/с.

Волновая поверхность, описываемая функцией VOF, показана на рис. 3. На рисунках видно характерное возвышение уровня свободной поверхности в носовой части и система корабельных волн, свойственная судам с небольшим соотношением L/B .

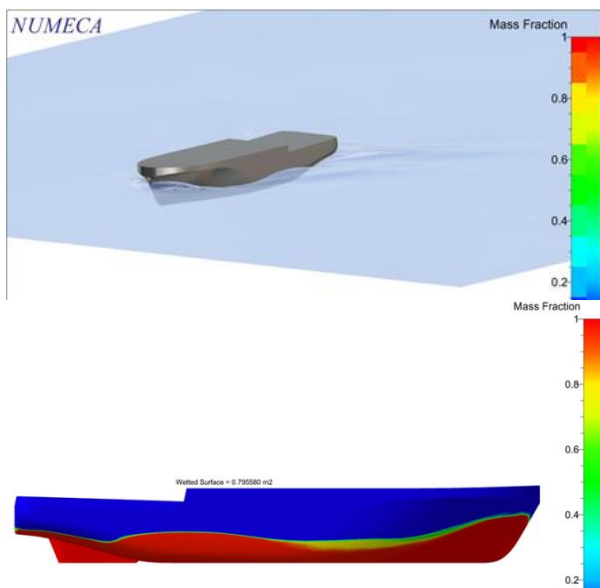
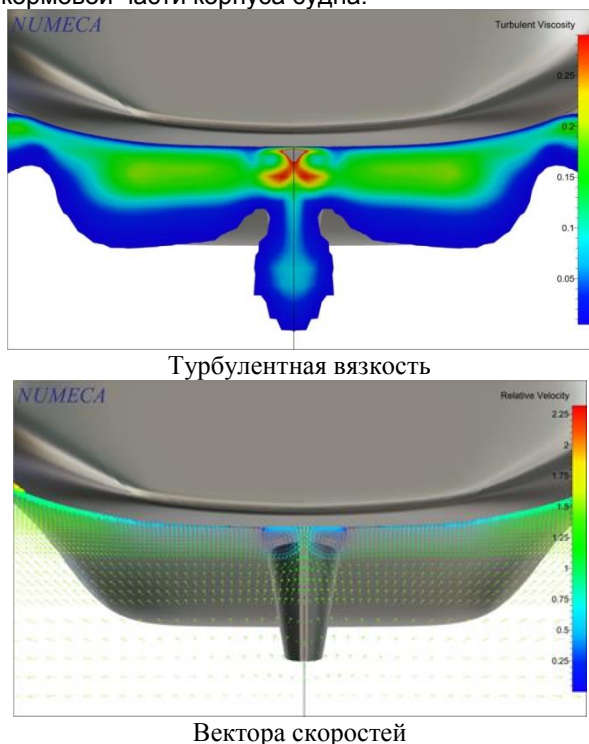


Рис. 3. Форма свободной поверхности VOF и смоченная поверхность при скорости 1,6 м/с

На рис. 4 показано распределение турбулентной энергии и вектора скорости в кормовой части корпуса судна.

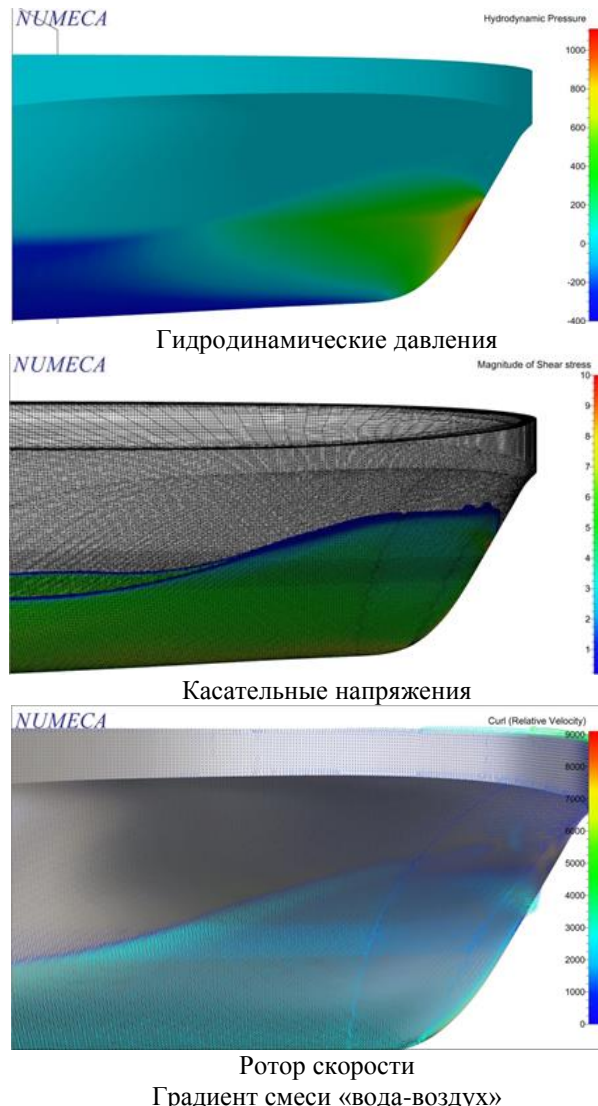


Турбулентная вязкость

Вектора скоростей

Рис. 4. Система корабельных волн при скорости 1,6 м/с

Визуализация потока в носовой части судна показана на рис. 5. Полученные распределения давления и турбулентной энергии, а также вектора скорости, позволяют сделать выводы о характере обтекания как корпуса в целом, так и отдельных его частей, и соответственно в случае необходимости выполнить оптимизацию формы корпуса с точки зрения снижения сопротивления.



Гидродинамические давления

Касательные напряжения

Ротор скорости

Градиент смеси «вода-воздух»

Рис. 5. Характеристики потока в носовой оконечности при скорости 1,6 м/с

Сравнение полного сопротивления буксира показано на рис. 6 в виде двух кривых – результатов испытаний в опытовом бассейне ОАО КБ «Вымпел» и численного моделирования с помощью NUMECA/FineMarine™.

Как видно из рисунка, результаты численного моделирования достаточно хорошо совпадают с результатами буксировочных испытаний. Некоторые расхождения в результатах могут быть связаны с тем, что сравнение выполнялось с результатами, полученными с помощью гравитационной буксировочной системы, когда судно имеет возможность изменять осадку и дифферент.

Для повышения точности необходимо провести моделирование для трех степеней свободы и дополнительно задать массовое водоизмещение, положение центра масс и компоненты матрицы инерции. NUMECA/FineMarine™ позволяет моделировать буксировочные испытания, однако для этого требуются дополнительные данные о гравитационной системе.

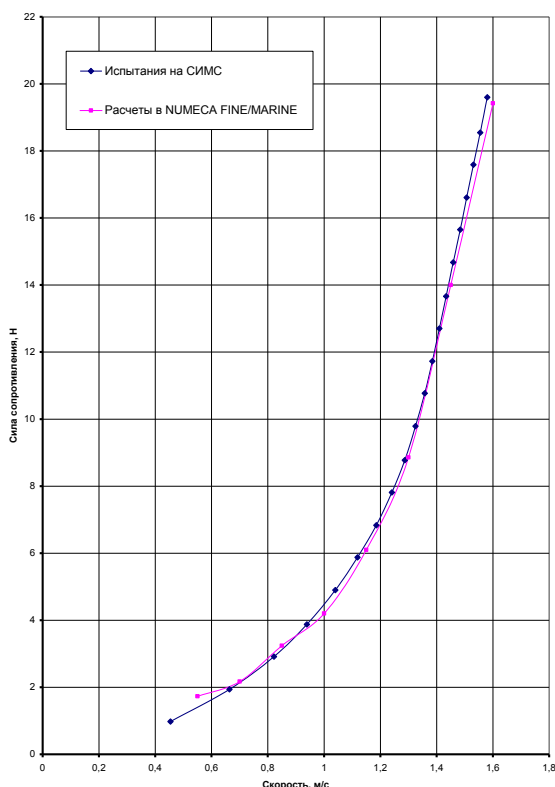


Рис. 6. Сравнение результатов численного моделирования с результатами буксировочных испытаний

Точность расчета может быть повышена за счет использования EASM модели турбулентности, что, однако, потребует большего расчетного времени.

Кроме того, возможно произвести исследования сопротивления и параметров качки на регулярном волнении, для чего также нужны инерционные характеристики модели.

Заключение

В результате моделирования движения модели буксира с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™ можно сделать следующие выводы:

- была получена кривая сопротивления модели, которая хорошо совпадает с результатами эксперимента. Время получения одной точки составляет 14 часов непрерывной работы ПК с 4-х ядерным процессором, i7-3770K;
- время построения расчетных сеток, использованных в настоящем исследовании, в зависимости от используемых настроек составило от 15 до 31 минуты на 4-х ядерном персональном компьютере;
- с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™ получены распределения давления, турбулентной энергии, касательных напряжений по корпусу буксира, которые могут быть использованы для оптимизации формы корпуса.

Литература

1. Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
2. User Manual FINE™/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussée de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
3. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, COMPIT-2012, 2012.
4. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, 4th High Performance Yacht Design Conference, 2012.
5. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Refinement Applied to RANS Ship Flow Computation, 28th Symposium on Naval Hydrodynamics 2010.
6. Leroyer A., Queutey P., Guilmineau E., Deng Gan Bo, Visonneau M. New algorithms to speed up RANSE computation in hydrodynamics, 2009.
7. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.

References

1. Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
2. User Manual FINE™/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussée de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
3. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, COMPIT-2012, 2012.
4. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, 4th High Performance Yacht Design Conference, 2012.
5. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Refinement Applied to RANS Ship Flow Computation, 28th Symposium on Naval Hydrodynamics 2010.
6. Leroyer A., Queutey P., Guilmineau E., Deng Gan Bo, Visonneau M. New algorithms to speed up RANSE computation in hydrodynamics, 2009.
7. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.