

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУДОВ МЕТОДАМИ CFD

*А.Г. Егорова, аспирант СПбГМТУ,
А.А. Зубова, аспирант СПбГУВК,
Д.В. Никущенко, канд. техн. наук, доцент СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 495 0207*

Прогнозирование параметров управляемого движения относится к наиболее сложным задачам корабельной гидродинамики. Это объясняется прежде всего сложным трехмерным характером вязких течений, возникающих при криволинейном движении судов, корпус которых имеет в общем случае сложную пространственную геометрию и развитую систему выступающих частей. Существенно также то, что маневрирование может выполняться в условиях разнообразных внешних воздействий (например, течений, морского волнения, и пр.) или границ акватории (например, дна акватории, стенок канала, и др.). Все сказанное приводит к значительному изменению сил и моментов, действующих на корпус судна и его элементы по сравнению с их значениями, определенными без учета этих факторов.

Маневрирование судна в непосредственной близости от неподвижных/движущихся объектов, таких как морские сооружения различного назначения или других судов, требует наличия опыта и квалификации судоводителя с целью предупреждения столкновения. Опасность столкновения значительно возрастает, когда судно совершает маневр в плохих погодных условиях. Влияние окружающей среды, такое как волнение, ветровое воздействие, подводные течения, проявляется в виде дополнительных динамических нагрузок, которыми невозможно пренебречь при анализе мореходных и маневренных качеств судна.

При движении судов в непосредственной близости друг от друга происходит заметное ухудшение маневренности судна в связи с дополнительными гидродинамическими силами и моментами, возникающими на корпусе при взаимодействии. Взаимодействие судов как таковое возникает в момент, когда появляется взаимодействие полей давления, создаваемых корпусом при движении в жидкости [1]. В начальный момент времени судно находится в уравновешенном положении, сохраняя свое состояние как минимум за счет гидростатического давления, к которому в начальный момент движения добавляется динамическое. Динамическое давление возникает за счет образования расходящейся и поперечной систем волн, создаваемых судном на поверхности жидкости.

Давление окружающей жидкости действует на подводную часть судна и при изменении в течение времени оно будет оказывать влияние на равновесное положение судна. Судно может начать замедляться или ускоряться, погружаться или всплывать, или же получить дифферент на нос или корму. На сегодняшний день в ходе экспериментальных и численных исследований задачи взаимодействия судов было выявлено, что

гидродинамические силы и моменты, возникающие на корпусе судна, зависят наиболее значительно от размеров, скорости судов, формы корпуса, геометрических параметров области и наличия дополнительных объектов, таких как стенки канала и т.д.

Комплексный характер проблемы взаимодействия судов требует создания качественной и эффективной методологии прогнозирования поведения судна для выработки некоторых рекомендаций по управлению судном с целью предотвращения возникновения негативных эффектов или столкновения.

На сегодняшний день возможности вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) достаточно широко используются инженерами и учеными для различных типов исследований и задач проектирования. Для практического решения проблемы взаимодействия эффективным может быть предварительное численное моделирование поведения судна в сложных условиях, например, при встречном расхождении и обгоне. Также полученные данные могут быть использованы для настройки систем управления и обучающих симуляторов для судоводителей.

В данной работе представлены лишь некоторые результаты проведенных авторами численных исследований гидродинамических сил и моментов, возникающих на корпусе судна при взаимодействии. Методы вычислительной гидродинамики (CFD) находятся на стадии активного развития и связаны с исследованием математической модели физической проблемы, что накладывает ряд ограничений в сравнении с возможными экспериментальными исследованиями. Даже задача моделирования обтекания «голого» корпуса в процессе маневрирования является сложной для решения. Задача определения гидродинамических сил взаимодействия между судами – это комплексная задача моделирования существенно нестационарных процессов при желательном учете выступающих частей и особенностей формы корпуса. Однозначное решение исследуемой проблемы отсутствует. Применение трехмерных

численных методов CFD с использованием алгоритмов определения полевых характеристик по-прежнему является преимущественно исследовательской задачей. Экспериментальные исследования – очень дорогостоящая и сложная процедура, в связи с чем основной интерес направлен на возможности численных экспериментов. Разработка достаточно простой методологии решения и выработка основных рекомендаций – основная цель исследования.

Результаты были получены с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD), реализованных в наиболее широко применяемых расчетных комплексах ANSYS FLUENT® (на стадии валидации решения), NUMECA FINETM / MARINE и STAR-CCM+. Движение вязкой несжимаемой жидкости в поле массовых сил описывается уравнениями Навье–Стокса, для замыкания системы используется уравнение неразрывности

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right) &= \\ &= -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v} + \bar{f}; \quad (1) \\ \nabla \cdot \bar{v} &= 0. \end{aligned}$$

Для моделирования турбулентности применяются подходы, кратко изложенные ниже.

В ANSYS FLUENT® была выбрана двухпараметрическая k-ε модель турбулентности, содержащая уравнениями переноса для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε [2]. Стандартная двухслойная k-ε модель для многофазных течений была использована в решении STAR-CCM+. Данный подход позволяет решать уравнения переноса для каждой фазы среды (жидкость/газ) при использовании специализированного подхода для разрешения пристеночной области и общего потока [3].

NUMECA FINETM / MARINE реализует SST модель турбулентности. Основными отличительными особенностями данного подхода является определение коэффициентов модели в различных частях расчетной области и ограничение допустимых значений

для турбулентной вязкости потока. В пристеночной области данный подход реализует модель Вилкокса (Wilcox) в общем потоке и непосредственно в переходной – стандартную $k-\epsilon$ модель в $k-\omega$ постановке [4].

Для проведения исследования было использовано тело Вигли как аналог корпуса реального судна. Данный объект был выбран с целью упрощения численной процедуры и ограничения числа влияющих параметров, таких как форма кормовой и носовой оконечностей реального корпуса судна. Подобное допущение приемлемо при учете соответствия площадей смоченной поверхности судна и его аналога, так как согласно полученному в ходе исследований опыту данный параметр оказывает значительное влияние на значения действующих сил и моментов.

Общее уравнение, описывающее поверхность тела Вигли имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{2}B \left\{ 1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{z}{T} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где B, L, T – наибольшая ширина, длина и осадка судна соответственно.

Основные параметры тела

Длина, м.....	1,905
Ширина, м.....	0,238
Осадка, м.....	0,095
Коэффициент общей полноты.....	0,4191
Коэффициент площади смоченной поверхности.....	7,01

Точность результатов расчета была проверена путем сравнения с экспериментальными данными работы Нобуаки Сакамото, Роберта Вэнс Уилсона и Фредерика Стерна [5].

Согласно экспериментальным данным других авторов и анализу практических примеров, из общего числа влияющих параметров для численного исследования были выбраны скорость и продольное расстояние между исследуемыми объектами.

Движение жидкости рассматривалось в относительной системе координат, движение тел относительно друг друга отсутствовало. Положение в пространстве соответствовало случаю обгона и встречного расхождения судов, т.е. наиболее опасной ситуации с точки зрения значений возникающей боковой силы и вращающего момента. В качестве относительных величин были выбраны основные размеры объекта исследования: длина L и максимальная ширина B . Взаимное расположение тел приведено на рис. 1, а–в.

Согласно экспериментальным данным, полученным Миллвардом и Беваном (1986), максимальное значение коэффициента общего сопротивления соответствует числу Фруда $Fr = 0,51$ для случая движения в безграничной жид-

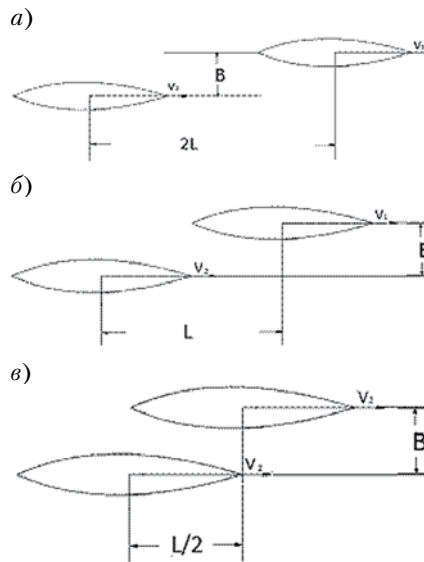


Рис. 1. Взаимное расположение тел: а – продольное расстояние $D = 2L$, поперечное расстояние $H = B$; б – $D = L, H = B$; в – $D = L/2, H = B$

кости. В связи с этим данное значение числа Фруда было выбрано для расчета как наиболее оптимальное.

Полученные результаты (табл. 1) демонстрируют допустимую разницу между результатами численного моделирования и экспериментальными данными. В ходе эксперимента модель не имела степеней свободы, поэтому численное моделирование было проведено также в статической постановке.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования, $Fr = 0,51$

Характеристика	Эксперимент	ANSYS FLUENT®	NUMECA FINETM/Marine	STAR-CCM+
C_x	0,076	0,075	0,06	0,081

С целью исключения влияния отношения размеров тел, а также для снижения эффекта волнообразования на значении коэффициента общего сопротивления моделирование проводилось для тел одинаковой длины и при малых значениях чисел Фруда. По результатам более ранних исследований задачи взаимодействия судна и твердой стенки [6], которую можно рассматривать как крайний случай взаимодействия судов при значительной разнице длин корпусов, влияние скорости проявляется менее значительно, чем с расстоянием между судами. В связи с этим исследования были начаты для одного значения скорости, но разными относительными положениями тел. Подробное исследование влияние скорости движения и свободное движение тел находятся на стадии разработки.

Ниже приведены некоторые результаты численного эксперимента при $Fr = 0,15$ (табл. 2 и рис. 2).

Результаты численного эксперимента подтверждают значительность влия-

Таблица 2
Коэффициент боковой силы и момента для $Fr = 0,15$ при разных значениях продольного расстояния

Продольное расстояние, м	NUMECA FINETM/Marine		STAR-CCM+	
	C_y	C_{mz}	C_y	C_{mz}
$L/2$	0,0205	0,0867	0,0411	0,1217
L	-0,0004	0,0137	-0,0004	0,0110
$2L$	-0,0980	-0,0840	-0,1140	-0,0890

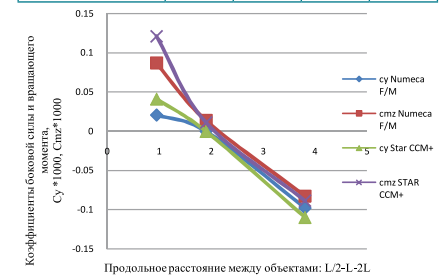


Рис. 2. Сравнение полученных результатов ANSYS FLUENT, NUMECA FINETM/MARINE и STAR-CCM+

ния расстояния между объектами на коэффициент боковой силы и момента. Действие вращающего момента одновременно с возникающими боковыми силами на корпусе могут привести к отклонению судна от начального направления движения.

Таким образом, риск столкновения кормовой части движущегося судна при прохождении в непосредственной близости от другого судна возрастает по мере сокращения дистанции между ними. После первоначального расталкивания кормы и носа судов возникает обратный эффект, провоцирующий сближение и потерю управляемости. Знак коэффициентов сил и момента указывает на направление их действия, следовательно, и направление изменения траектории движения объектов.

ВЫВОДЫ

Эффект присасывания, порождаемый маневрирующим судном, одновременно проявляется как на самом судне, так и его партнере. Данный эффект обусловлен изменением гидродинамических сил и моментов, возникающих в жидкости и действующих на корпуса судов.

Минимальное число узлов расчетной области должно быть значительно выше, чем при моделирование для одного судна, так как задача не симметрична по характеру действия сил. Степень подробности сетки в носовой и кормовой оконечностях корпуса должны быть значительно выше для проведения качественного анализа.

Характер потока вблизи корпуса судна значительно осложняет задачу численного моделирования в связи с проблемой использования решений для пристеночной функции и сохра-

нения физичности решения, что зачастую приводит к ухудшению сходимости расчета.

На сегодня доступны в основном результаты исследований, проведенных для стационарного обтекания, что дает лишь общую картину и глобальный характер действующих сил и моментов. В связи с ограниченным количеством имеющихся экспериментальных исследований проверка и валидация численных результатов затруднительны – узок спектр исследованных тел и влияющих параметров.

Дискретизация расчетной области – сложная задача для моделирования свободного движения тела в основном

в связи с необходимостью создания более подробной сетки и ограничения допустимых деформаций (следовательно движения тела).

Технология деформируемых расчетных сеток, пригодных для моделирования изменяющегося положения тела, по-прежнему находится на стадии тестирования. Результаты исследований нестационарного поведения тел будут представлены в следующих работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Skejic Renato, Faltinsen Odd M.* A Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of Two Interacting Ships.– Center of Ships and Ocean Structures, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2007.

2. ANSYS. Fluent 6.3 (техническая документация).
3. NUMECA FINETM/Marine V 2.2 техническая документация
4. STAR-CCM+5.06 (техническая документация).
5. *Nobuaki Sakamoto, Wilson R.V. and Stern Frederick.* Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations for High-Speed Wigley Hull in Deep and Shallow Water.– Iowa Institute of Hydraulic Research – Hydrosience and Engineering, The University of Iowa, Iowa, USA; Currently – UT SimCenter at Chattanooga, The University of Tennessee at Chattanooga, Tennessee, USA, 2007.
6. *Chetvertakov A.M., Lebedeva and M.P. Nikushchenko D.V.* Numerical Investigation Of Bank Influence on a Ship Motion.– Kongsberg Maritime.– 2nd Internat. Confer. on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water.– Ship to Ship Interaction, 2011. ■