

# Применение программного комплекса FlowVision для анализа гидродинамики судна

Прогресс вычислительной техники и численных методов расчета сделал возможным для исследования и анализа гидродинамических характеристик судов применение специального программного обеспечения, позволяющего проводить численное моделирование обтекания корпуса судна с учетом турбулентности, волнообразования, влияния гребного винта, мелководья и т.д. Российский программный комплекс FlowVision позволяет решать многие практические задачи гидродинамики судна – получение картины обтекания корпуса, распределения давления, буксировочных характеристик корпуса, гидродинамических характеристик движителя, характеристик взаимодействия корпуса и движительного комплекса. При этом, как показал опыт практического использования программного комплекса FlowVision, задачи гидродинамики судна могут быть решены во всем диапазоне скоростей движения (чисел Фруда) современных судов, включая скорости глиссирования, когда в ходе решения задачи необходимо определять балансирующие параметры по всплытию и углу дифферента судна.

В настоящей статье приводится описание постановки задачи и основных функциональных возможностей программного комплекса FlowVision для анализа гидродинамики судна.

## Постановка задачи

С точки зрения вычислительной гидродинамики, задача обтекания корпуса судна, в том числе для больших чисел Фруда (глиссирование), имеет ряд особенностей, усложняющих численное моделирование (рис. 1). К ним относятся, определение границы раздела вода-воздух (свободная поверхность) с учетом волнообразования, которое зависит от скорости движения и посадки на воду корпуса судна; определение пространственного положения самого корпуса относительно воды и свободной поверхности, определяемого действием как внешних сил и моментов (гравитация, движитель), так и сил и моментов гидродинамической природы.

Важным достоинством FlowVision в подходе к решению подобных задач является возможность моделирования глиссирования корпуса судна с заданными степенями свободы. Программный комплекс FlowVision позволяет



Рис. 1. Особенности постановки задачи

определять не только силы и моменты, действующие на корпус судна, но и посадку его на воду (угол дифферента и всплытие) под действием, в том числе, гидродинамических сил и моментов.

## Расчетная модель

### Модель движения жидкости

В качестве математической модели движения жидкости при исследовании обтекания корпуса судна используется модель несжимаемой жидкости, основанная на использовании уравнений Навье-Стокса, закона сохранения массы, модели турбулентности и метода VOF для определения движения свободной поверхности (границы раздела вода-воздух). Решение данного набора уравнений в программном комплексе FlowVision реализовано в модели "Свободная поверхность".

### Модель движения корпуса судна

Математическая модель динамики движения корпуса судна как твердого тела представлена в модуле "Подвижное тело". В этом модуле задаются массово-инерционные характеристики, положение центра инерции (центр масс) и степени свободы, в частности, по всплытию и углу дифферента.

Расчет динамики движения корпуса судна во времени относительно неподвижной Эйлеровой сетки с целью определения его посадки на воду в FlowVision проводится с использованием неявного метода.

## Расчетная область и граничные условия

Под расчетной областью понимается ограниченный фрагмент акватории (рис. 2), с расположенным в нем корпусом судна.

Как правило, задача обтекания корпуса судна решается в обращенном движении. В частности, при исследовании вопросов ходкости, когда рассматривается прямолинейное движение судна без дрейфа и крена, в расчетной области располагается только половина корпуса. Геометрические размеры расчетной области (длина, ширина, глубина, занимаемая водой) выбираются исходя из удовлетворения граничным условиям, указанным на рис. 2.

Под понятием “свободный выход” понимается условие затухания возмущений, созданных корпусом судна на указанных границах. Под термином “вход” – в общем случае профиль скорости набегающего потока и распределение давления в зависимости от времени. Данный подход позволяет моделировать движение судна при волнении. Термин “симметрия” означает отсутствие нормальной составляющей скорости к данной границе, “модель судна” – границу с турбулентным пограничным слоем.

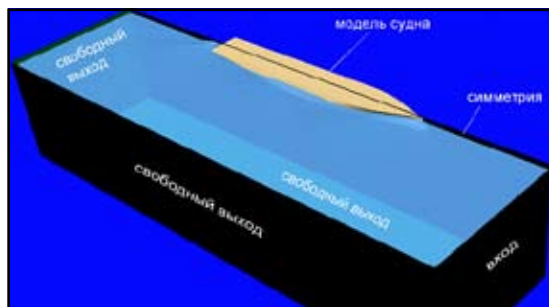


Рис. 2. Расчетная область и граничные условия

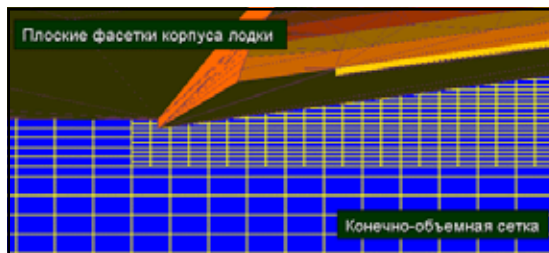


Рис. 3. Фрагмент прямоугольной расчетной сетки с локальной адаптацией и подсеточным разрешением геометрии

## Передача геометрии корпуса судна из CAD-систем в FlowVision

Программный комплекс FlowVision имеет развитые возможности по импорту геометрии корпуса судна из различных систем проектирования. К ним относятся как CAD-системы общего проектирования (SolidWorks, UG, Pro/E, CATIA, КОМПАС и т.д.), так и судостроительные, например система FORAN. Передача геометрии корпуса из CAD-системы в программный комплекс FlowVision осуществляется в виде твердотельной модели с использованием фасеточного представления поверхности в форматах .stl или .wrl. При этом качество представления поверхности корпуса судна определяется пользователем в системе проектирования на этапе экспорта геометрии.

## Численный метод

### Расчетная сетка с локальной динамической адаптацией и подсеточное разрешение геометрии

Программный комплекс FlowVision использует метод конечных объемов. Уравнения движения жидкости

в программном комплексе аппроксимируются на прямоугольной расчетной сетке с локальной динамической адаптацией и подсеточным разрешением геометрии (рис. 3).

В отличие от распространенного способа решения задач со свободной поверхностью и подвижными телами, использующими криволинейную Лагранжеву расчетную сетку, которая отслеживает перемещение тел и свободной поверхности, в программном комплексе FlowVision развит альтернативный подход – расчет на неподвижной Эйлеровой расчетной сетке. Этот подход в отличие от использования криволинейной Лагранжевой расчетной сетки позволил уйти от регенерации расчетной сетки во всей области расчета на каждом шаге интегрирования по времени, что, как известно, требует значительных вычислительных затрат и приводит к слишком высоким требованиям к вычислительной мощности компьютера.

При этом, под локальной динамической адаптацией расчетной сетки понимается уменьшение размера расчетных ячеек в заданном объеме пространства или около заданной поверхности в самом процессе расчета. Другими словами, программный комплекс FlowVision обладает уникальной возможностью перестроения расчетной сетки в ходе расчета, когда пользователю, по тем или иным причинам, необходимо более детально уточнить течение в заданном фрагменте расчетной области. Операция динамической адаптации в этом случае не требует возобновления решения с начального момента, а, как правило, выполняется в ходе дальнейшего расчета, что позволяет значительно уменьшить время, необходимое для проведения расчета.

Подсеточное разрешение – булева операция вычитания в каждый момент времени из прямоугольной расчетной сетки объема, занятого, в нашем случае, корпусом судна. При этом ячейки расчетной сетки, через которые проходит криволинейная поверхность, превращаются в ячейки сложной формы, внутри которых происходит аппроксимация уравнений повышенным порядком точности.

Отличительной особенностью построения расчетной сетки в программном комплексе FlowVision является ее автоматическая генерация для расчетной области любой сложности, что значительно сокращает время, затрачиваемое пользователем на подготовку к решению задачи. Инструментальные средства строителя расчетной сетки позволяют

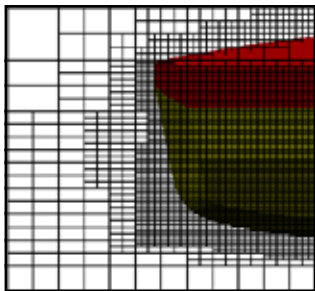


Рис. 4. Адаптация вблизи корпуса

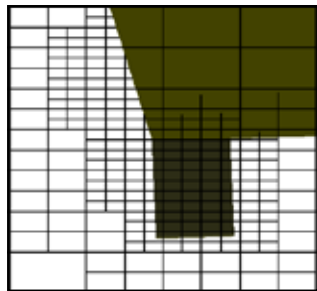


Рис. 5. Адаптация вблизи интерцептора

пользователю учитывать особенности формирования волновой системы, эффективно разрешать особенности течения в пограничном слое корпуса судна (рис. 4) и в районах расположения выступающих частей (рис. 5).

### Аппроксимация свободной поверхности

Для расчета движения свободной поверхности (граница раздела вода-воздух) с учетом волнообразования используется усовершенствованный метод VOF, который в отличие от известного "традиционного" метода VOF Хирта и Николса не требует экстраполяции решения в ячейки около свободной поверхности, что позволяет повысить точность аппроксимации для этих ячеек. Это крайне важно для задач гидродинамики судна, где точность определения гидродинамических сил и моментов однозначно связана с точностью представления волновой системы около корпуса.

Как известно, моделирование потоков со свободной поверхностью с использованием метода VOF разделяется на две задачи. Первая – это перенос самого VOF, вторая – аппроксимация уравнений движения в области около свободной поверхности. Перенос VOF в программном комплексе FlowVision рассчитывается с помощью схемы с отрицательной диффузией, которая позволяет рассчитывать VOF без "размазывания" ее фронта. Метод аппроксимации свободной поверхности заключается в ее реконструкции внутри поверхностных ячеек с использованием метода подсеточного разрешения. Как показал практический опыт применения FlowVision, используемый для определения границы раздела сред, метод подсеточного разрешения второго порядка точности позволяет с высокой точностью определять характер течения около корпуса и гидродинамические характеристики судна в широком диапазоне чисел Фруда.

### Возможности анализа гидродинамики судна

#### Реалистичное представление картины течения

В программном комплексе FlowVision реализованы широкие возможности по анализу и представлению результатов моделирования и определения гидродинамических характеристик корпуса судна. Инструментальные средства FlowVision дают возможность визуализировать

течение около корпуса во всех аспектах, связанных с его гидродинамикой. К ним относятся:

- ▶ реалистичное представление границы раздела сред (волновой системы около корпуса) как в виде поверхности в пространстве всей расчетной области (рис. 6), так и в виде волновых профилей, например бортовой ватерлинии вдоль корпуса судна или распределения давления;
- ▶ линии тока (рис. 7) и поле скоростей (рис. 8) в непосредственной близости от корпуса судна, позволяющие провести анализ характера обтекания судна, определить зоны торможения, ускорения, вихреобразования и возвратного течения жидкости;
- ▶ распределение давления в расчетной области и на смоченной поверхности корпуса (рис. 9);
- ▶ распределение погонных гидродинамических сил по корпусу;
- ▶ интегральные характеристики, в том числе силы, действующие на корпус судна;
- ▶ параметры посадки на воду корпуса судна (рис. 9).

В заключение отметим, что программный комплекс FlowVision позволяет решать рассматриваемые задачи, включая динамику возмущенного движения судна, в пространственной постановке, то есть с учетом всех степеней свободы. Важно также, что анализ гидродинамических характеристик судна программный комплекс FlowVision позволяет вести в понятных судостроителю терминах. Так, сила сопротивления движению судна представляется в виде двух составляющих: составляющей, обусловленной давлением (остаточное сопротивление), и суммарной силы с добавлением к первой составляющей вязкого трения. Дополнительно инженер в ходе расчета всегда контролирует важные для понимания результатов расчета параметры: величину смоченной

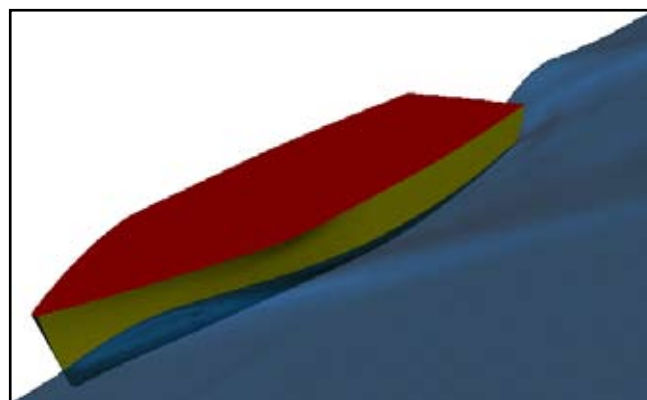
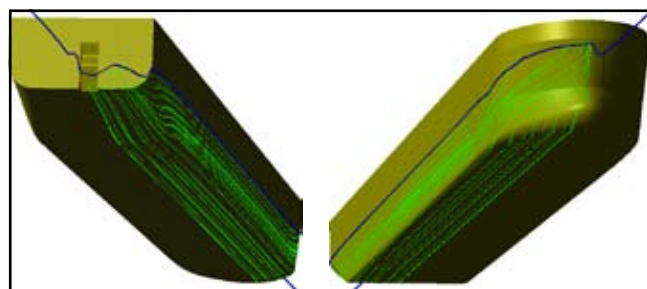


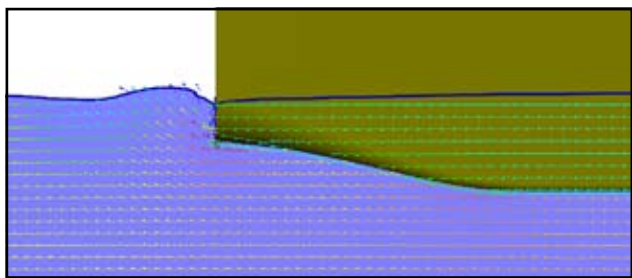
Рис. 6. Волновая система около корпуса



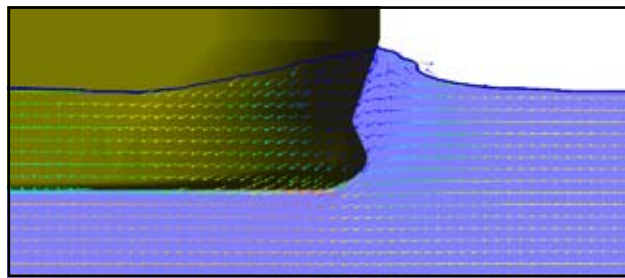
а – вид с кормы,

б – вид с носа

Рис. 7. Линии тока вблизи корпуса

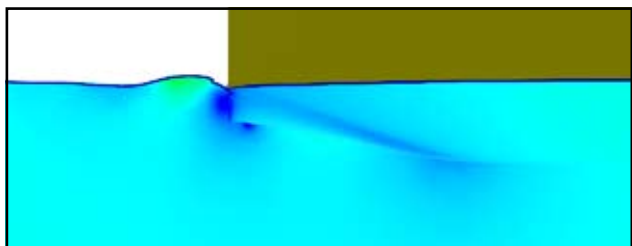


а – кормовая оконечность корпуса,

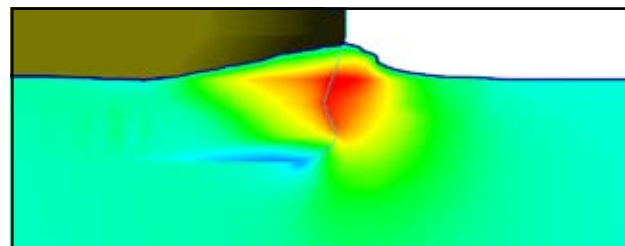


б – носовая оконечность корпуса

Рис. 8. Поле скоростей в диаметральной плоскости и вблизи корпуса



а – кормовая оконечность корпуса,



б – носовая оконечность корпуса

Рис. 9. Распределение давления в диаметральной плоскости и по оконечностям корпуса

поверхности корпуса судна и границу раздела вода-воздух, которые существенно дополняют возможности анализа обтекания корпуса судна и его гидродинамических характеристик.

Приведенные в статье материалы показывают возможность решения с помощью программного комплекса FlowVision широкого круга задач гидродинамики

судов различного назначения в диапазоне натуральных значений скоростей движения (чисел Фруда), что позволяет существенно повысить качество проектных работ и сократить временные и материальные затраты на создание обводов корпуса судна.

**А. А. Аксенов, В. В. Шмелев, компания ТЕСИС**