

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУДНА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FlowVision

А.А. Аксенов¹⁾, А. В. Печенюк²⁾, Б. Н. Станков²⁾,
В.В. Шмелев¹⁾ В.Г.Пасечник³⁾

¹⁾ ТЕСИС(Москва), ²⁾Digital Marine Technology (Одесса), ³⁾ЗПКБ (Зеленодольск)

Введение

Традиционно обоснование внешних обводов судна достигается большим объемом теоретических расчетов и экспериментальных исследований на моделях в бассейнах, гидроканалах и на открытой воде. Исследование гидродинамики судна на экспериментальных моделях достаточно длительный и дорогостоящий процесс и имеющий ряд ограничений, связанных с подобием модели и натурального объекта.

Бурный прогресс вычислительной техники и численных методов расчета сделал доступным для использования в судостроении программ численного моделирования движения судна с учетом турбулентности обтекания, волнообразования и взаимодействия с гребным винтом, дном. Российский программный комплекс FlowVision предназначен для решения подобных задач и позволяет решать практические задачи гидродинамики судна – получение буксировочных характеристик корпуса, гидродинамических характеристик движителя, отработка взаимодействия корпуса и движительного комплекса. При этом, как показал опыт практического использования программного комплекса FlowVision, задачи гидродинамики судна могут быть решены во всем освоенном 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 работе приводится опыт применения программного комплекса FlowVision в двух организациях, целью которых является проектирование транспортных судов и быстроходных судов военного назначения - Digital Marine Technology (DMT, Одесса, Украина) и ЗПКБ (Зеленодольск, Россия) соответственно.

Программный комплекс FlowVision

Программный комплекс FlowVision начал разрабатываться в начале 90-х годов коллективом авторов Российской академии наук как универсальная система для моделирования движения жидкости и газа в различных промышленных приложениях. Программный комплекс FlowVision основан на методе конечных объемов, являющимся промышленным стандартом в вычислительной гидродинамике. FlowVision имеет возможность расчета как сжимаемых так и несжимаемых течений жидкости и газа, имеет пять моделей турбулентности, включая низкорейнольдсовы модели.

Основное отличие FlowVision от аналогов – это автоматическая генерация расчетной сетки. Обычно в программных комплексах вычислительной гидродинамики или прочностного анализа в работе пользователя, связанной с подготовкой моделирования, до 90 процентов занимает построение расчетной сетки. В FlowVision эта проблема снята за счет использования метода генерации расчетной сетки из первоначальной декартовой сетки с использованием метода подсеточного разрешения геометрии. Суть этого метода заключается в булевом вычитании из прямоугольной расчетной сетки объема, заданного замкнутой поверхностью расчетной областью. При этом ячейки расчетной сетки, через которые проходит криволинейная поверхность расчетной области превращаются в сложные криволинейные ячейки, внутри которых происходит аппроксимация уравнений повышенным порядком точности. Уточнение решения в областях с высокими градиентами решения или геометрическими особенностями достигается с помощью локальной динамической адаптации расчетной сетки, при этом любая ячейка расчетной области может быть разбита (адаптирована) на более мелкие ячейки.

Одними из преимуществ FlowVision, позволяющих эффективно использовать его в задачах гидродинамики судов – это наличие возможности расчета подвижных тел и свободной поверхности жидкости. Для расчета свободной поверхности жидкости FlowVision использует

модифицированный метод объема жидкости в ячейке (VOF), который гораздо точнее оригинального метода VOF и позволяет рассчитывать движение воды около судов с высокой степенью точности.

Транспортные суда

Численное моделирование обтекания корпусов транспортных морских судов с помощью комплексов гидродинамического анализа в настоящее время начинает приобретать в задачах проектирования судна практическое значение. Получение полной картины потока, обтекающего корпус, на ранних стадиях его проектирования позволяет качественно решать задачи оптимизации формы корпуса и конфигурации выступающих частей; изучения условий работы движителей, рулевых и подруливающих устройств; нахождения характеристик ходовой посадки быстроходных судов; определения мощности энергетической установки судна.

Тестовые расчеты обтекания корпусов судов различного типа, выполненные специалистами компании DMT в программном комплексе FlowVision, показали результаты, сопоставимые с экспериментальными результатами, полученными в лучших гидродинамических лабораториях мира. К примеру, результаты расчетов и эксперимента по крупнотоннажному скоростному контейнерному судну, представлены на рис. 1. Выполнение численных исследований и подробное изучение их результатов оказалось возможным благодаря опубликованной в сети Интернет информации о выполненных в Корейском Исследовательском Институте Корабля и Океанотехники (Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering) буксировочных испытаниях модели контейнерного судна.

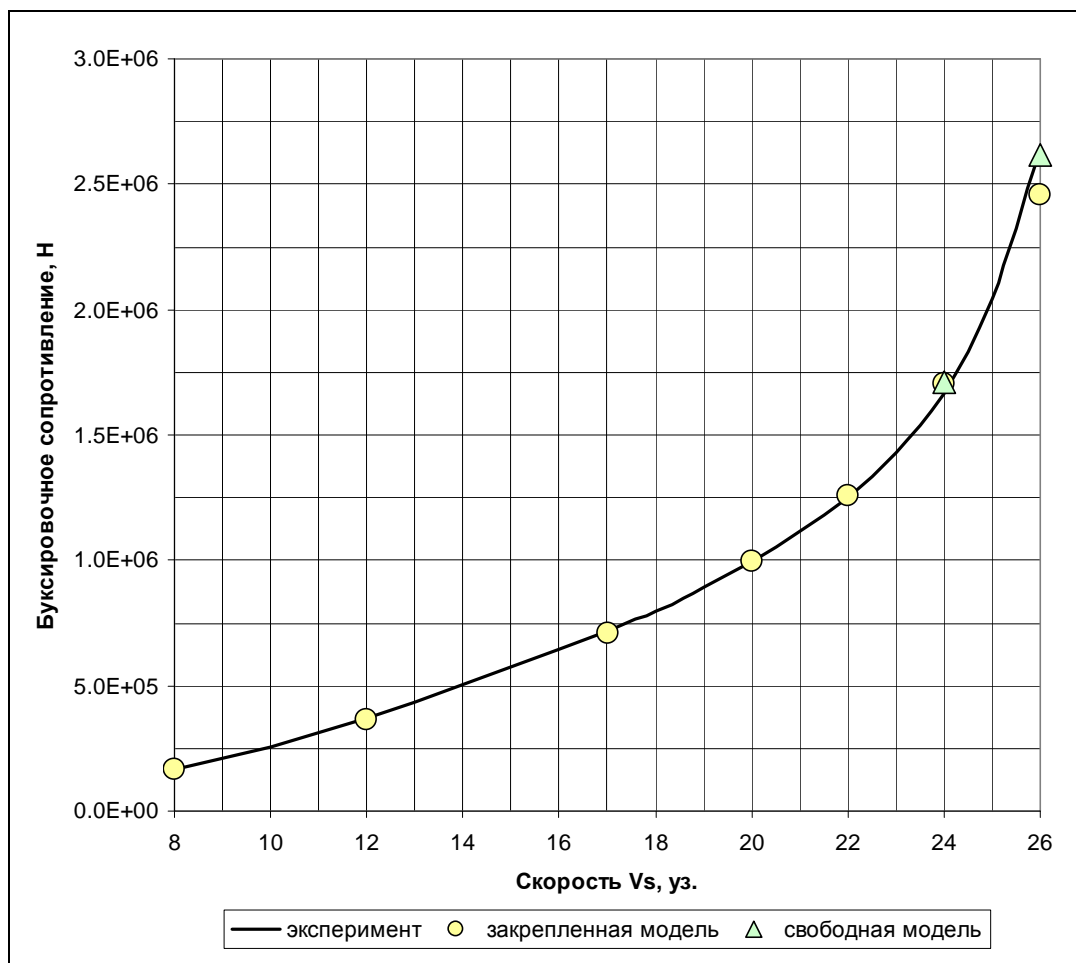


Рис. 1. Результаты расчетов FlowVision и эксперимента по контейнеровозу KCS

Данные, полученные при изучении волновой системы судна в ходе модельного эксперимента и численных расчетов, представлены на рис. 2 и 3 в графической форме, избранной корейскими специалистами при оформлении экспериментальных результатов.

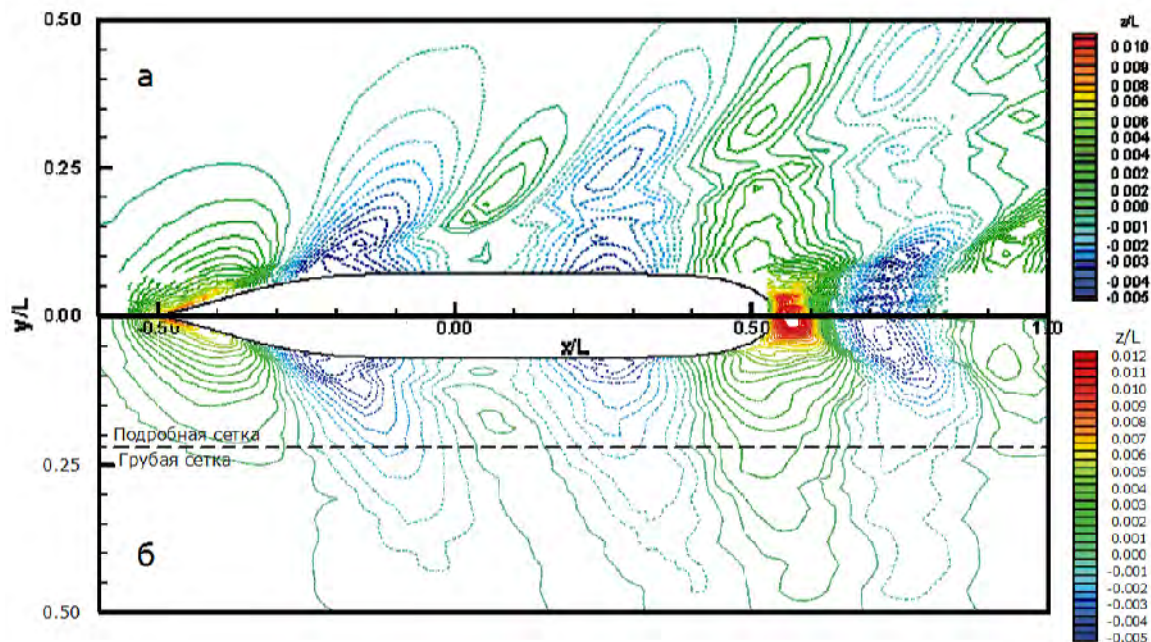


Рис. 2. Линии равных уровней свободной поверхности по данным:
 а – эксперимента при $Fr = 0.26$, $Re = 1.4e^7$; б – численного расчета при $Fr = 0.26$, $Re = 2.8e^9$.

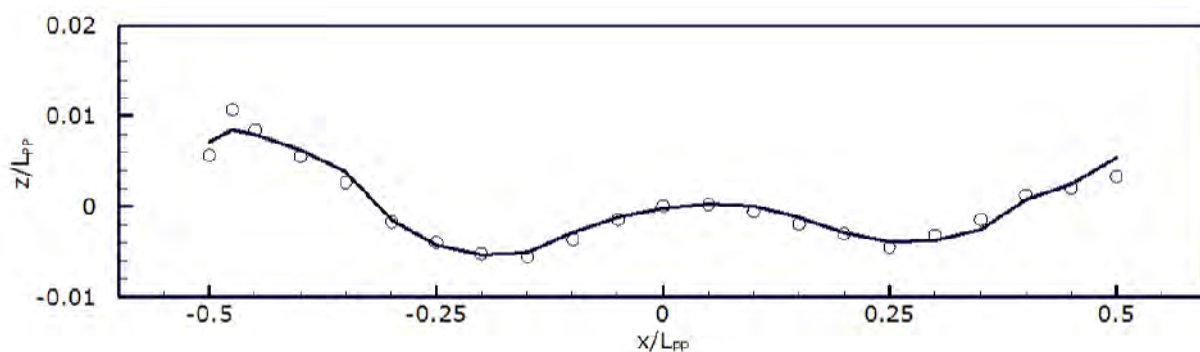
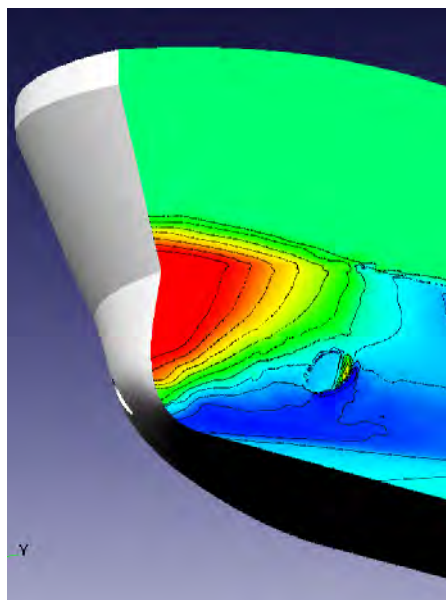


Рис. 3. Волновой профиль
 ○ – эксперимент при $Fr = 0.26$, $Re = 1.4e^7$;
 — – численный расчет при $Fr = 0.26$, $Re = 2.8e^9$.

Примером использования программного комплекса FlowVision в практических целях является обработка обводов судна смешанного плавания. Возможность с помощью FlowVision получать не только величину сопротивления, но и картины распределения физических величин в потоке и по поверхности корпуса (см. рис. 4) способствует более быстрому поиску эффективных путей улучшения гидродинамических качеств, что влияет, также, на качество и быстроту выполнения работ.

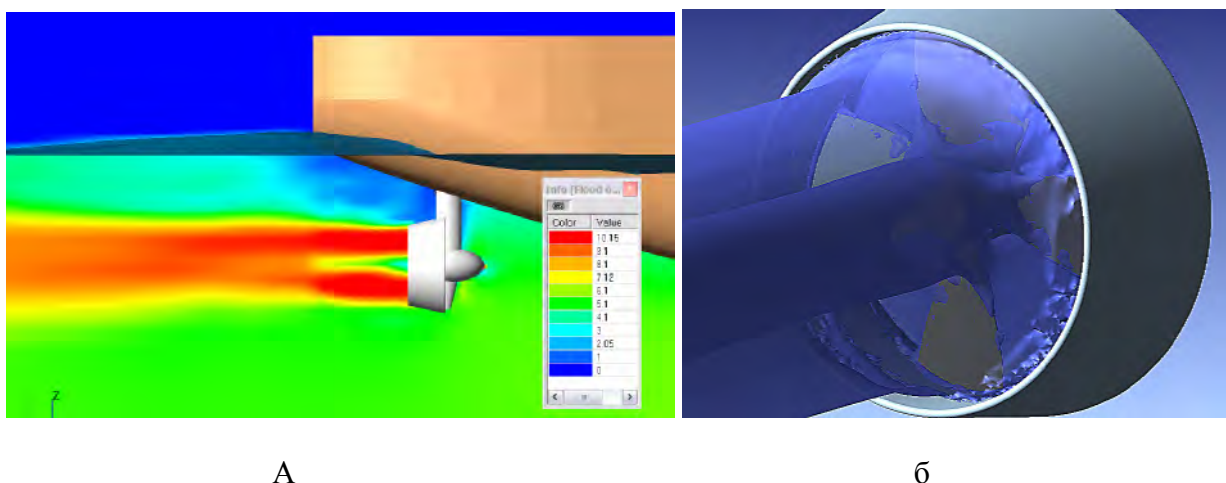


а б

Рис. 4. Носовая оконечность судна:
а – модель теоретической поверхности (T-Flex CAD); б – распределение динамического давления (FlowVision).

Моделирование судовых движителей

Для прогнозирования ходовых качеств судов помимо точного определения буксировочного сопротивления, необходимо также получить коэффициенты взаимодействия движителей и корпуса судна, спроектировать движители и получить их гидродинамические характеристики. Учет составляющих взаимодействия численными методами может быть осуществлен с помощью FlowVision путем совместного расчета обтекания корпуса потоком, обусловленным его буксировкой, и потоком, обусловленным работой движителя, который создается с помощью упрощенной (см. рис. 5, а) или точной (рис. 5, б) модели последнего. Такая методика очень близка к самоходным испытаниям «в жесткой запряжке». Применение методики предоставляет подробную информацию о физических особенностях взаимодействия элементов пропульсивной системы, которая очень полезна для их оптимизации.



а б

Рис. 5. Моделирование взаимодействия судовых движителей с корпусом судна численными методами:

а – упрощенная модель ГВ в насадке; б – точная модель

Проектирование движителей, в частности судовых гребных винтов, также может быть осуществлено с помощью методов, аналогичных тем, которые применяются для проектирования корпусов. Хорошая точность результатов определения гидродинамических характеристик подтверждается выполненными тестовыми расчетами. Примером может

служить расчет гребного винта серии М4-75, испытания которого были в свое время выполнены и тщательно выверены в кавитационных трубах ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. Изолинии давления по поверхности гребного винта, полученные по результатам расчета при относительной поступи 0.6, представлены на рис. 6. Сопоставление результатов расчетов FlowVision и эксперимента представлено на рис. 7, где построены безразмерные кривые действия гребного винта.

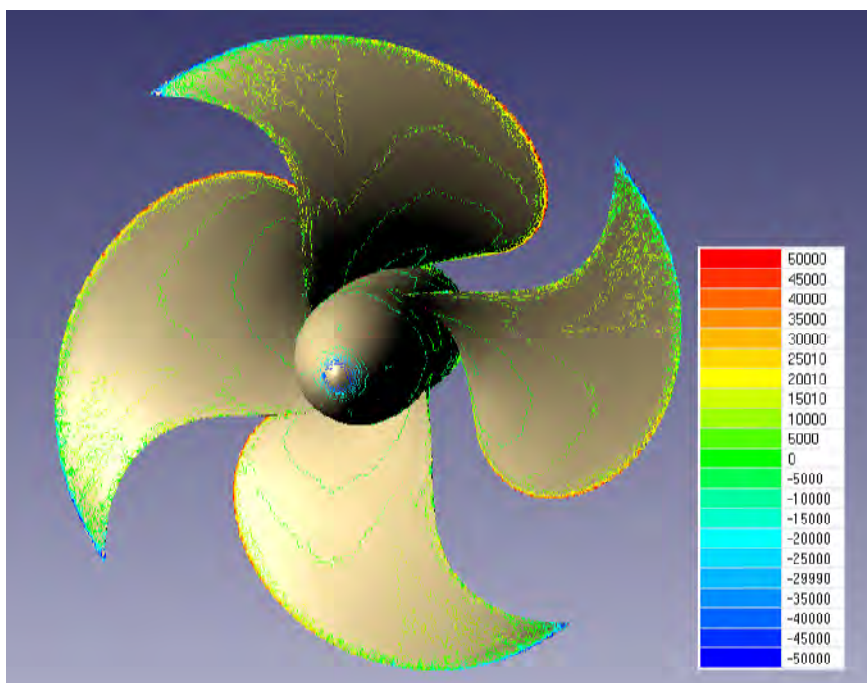


Рис. 6. Изолинии давления по его поверхности гребного винта М4-75 при относительной поступи 0.6 (FlowVision)

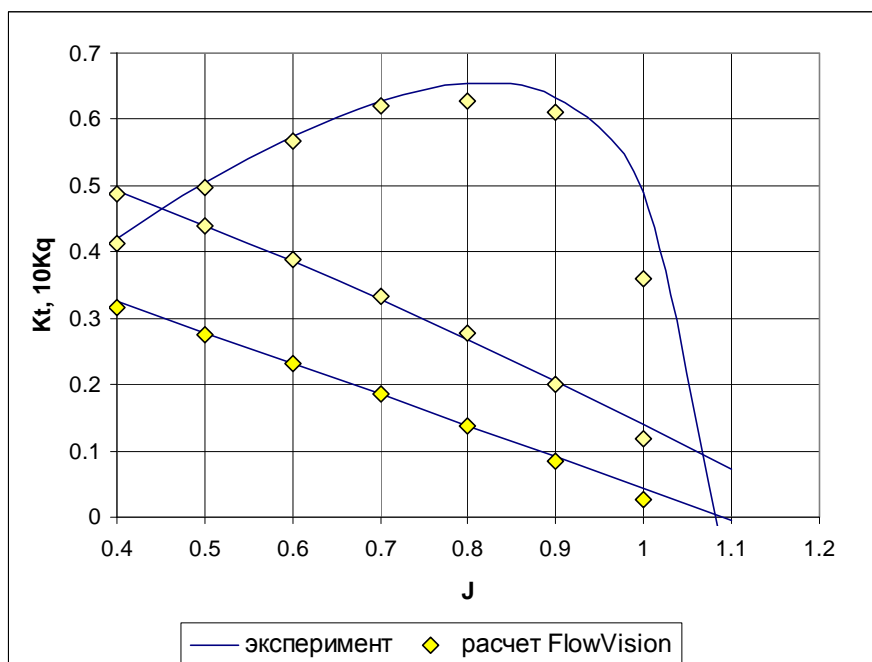


Рис. 7. Сопоставление кривых действия гребного винта М4-75, полученных путем расчета и эксперимента

Быстроходные суда военного назначения

Расчет сопротивления движению с последующим определением потребной мощности двигателей является одной из важнейших задач при проектировании быстроходного судна.

Традиционный метод определения гидродинамических характеристик – модельные испытания с последующим пересчетом по методу Фруда – длительный и дорогостоящий процесс, не приводящий в ряде случаев к достоверной оценке силы сопротивления из-за инструментальной и методической погрешностей. К последней можно отнести известную проблему недостаточной турбулизации течения около корпуса модели. Известно, что характер обтекания корпуса модели в переходном режиме и режиме глиссирования способствует сохранению ламинарного режима течения в пограничном слое, в том числе, из-за отрицательного градиента давления вдоль днища.

Численное моделирование обтекания натурального корпуса быстроходного судна с последующим расчетом гидродинамических характеристик, включая сопротивление движению, не имеет указанных выше методических погрешностей. Метод, что в данном аспекте важно, позволяет проводить моделирование обтекания корпуса судна при натуральных числах Рейнольдса и во всем диапазоне скоростей (чисел Фруда) его движения. Более того, дополненный возможностью расчета динамики движения самого судна, как твердого тела, в том числе, под действием сил гидродинамической природы, метод позволяет определить изменение положения судна относительно поверхности воды при различных скоростях движения.

В результате моделирования обтекания натурального корпуса судна инженер получает информацию о моделируемом процессе в исчерпывающем объеме, позволяющий на каждом режиме движения:

- определить волновую систему создаваемую быстроходным судна, что очень важно, например, при проектировании катамаранов, тримаранов и других многокорпусных судов (см.рис.8),
- получить распределение давления, например, по омываемой части корпуса (см.рис.9), что необходимо для правильного определения напряженно-деформированное состояние конструкции корпуса,
- визуализировать с помощью, например, линий тока течение в непосредственной близости от корпуса (см.рис.10) и тем самым провести анализ характера течения любом районе корпуса,
- определить не только силу сопротивления и балансировочные траекторные параметры по всплытию и углу тангажа (см.рис.11,12,13) на разных скоростях движения, но и при необходимости динамику движения судна при, например, различных управляющих воздействиях (см.рис.15).

При этом, следует отметить, что программный комплекс FlowVision позволяет решать перечисленные выше задачи, включая динамику возмущенного движения судна, в пространственной постановке, т.е. с учетом всех степеней свободы. Важно, также, что анализ гидродинамических характеристик программный комплекс FlowVision позволяет вести в понятных судостроителю терминах. Так, в результате расчета сила сопротивления движению быстроходного судна, представляется в виде 2-х 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 поверхности корпуса судна и границу раздела вода-воздух (см.рис.9, черная линия), которые существенно дополняют возможности анализа обтекания корпуса быстроходного судна и его гидродинамических характеристик.

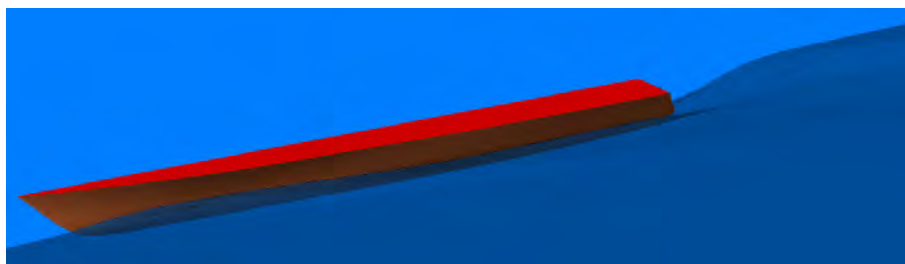


Рис.8 Система волнообразования около корпуса судна

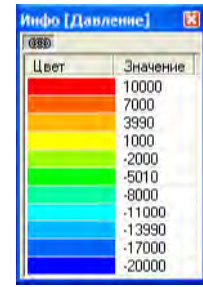
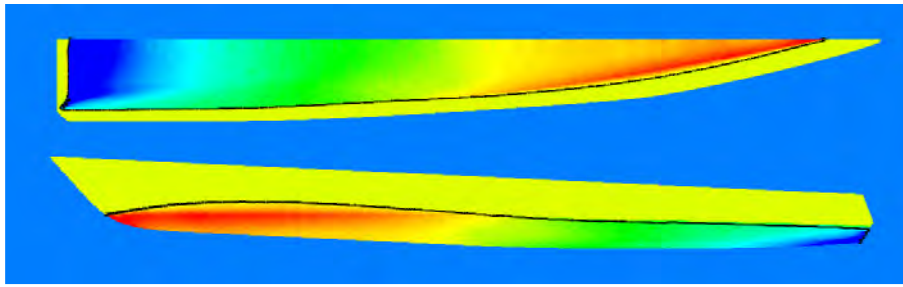


Рис.9 Распределение давления по днищу корпуса судна

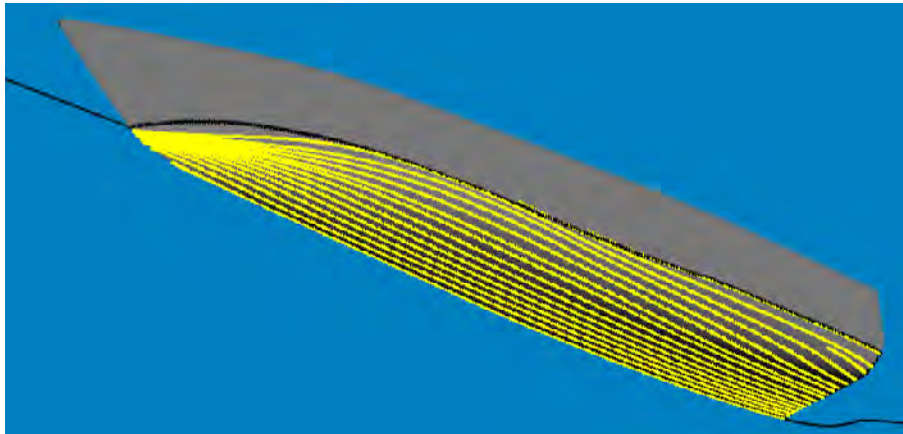


Рис.10 Линии тока воды вблизи корпуса

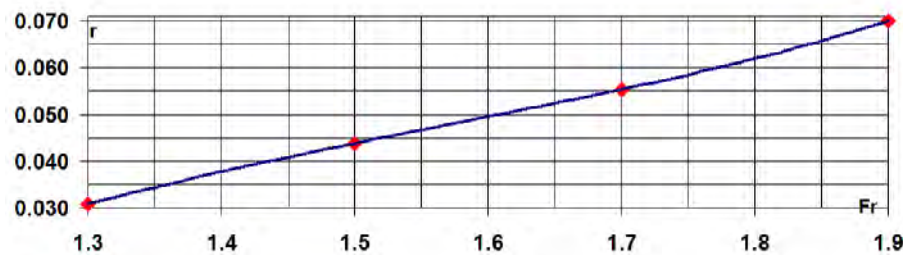


Рис.11. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления судна от числа Фруда

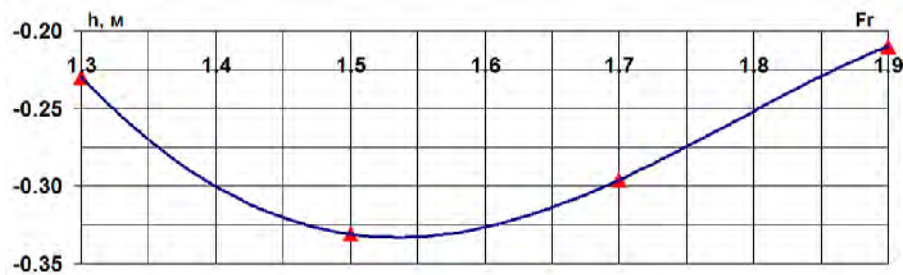


Рис.12. Зависимость всплытия центра масс судна от числа Фруда

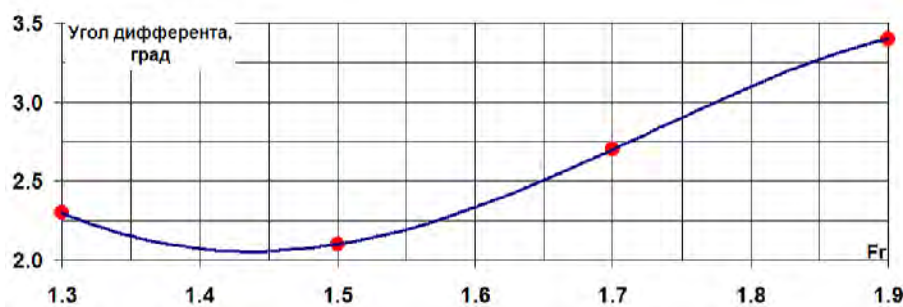


Рис.13. Зависимость угла дифферента судна от числа Фруда

Заключение

Приведенные в статье материалы практического использования FlowVision в двух компаниях – DMT и ЗПКБ показывают возможность решения широкого круга проектных задач гидродинамики судов различного назначения с использованием современных методов численного моделирования течения, реализованных в программном комплексе FlowVision. В компании DMT FlowVision используется как основное средство для моделирования буксировочных характеристик судна, характеристик гребного винта и взаимодействие винта и корпуса. В Зеленодольском ПКБ – для моделирования гидродинамики быстроходных судов, включая, расчет угла дифферента и всплытия судна при больших скоростях его движения. Применение средств вычислительной гидродинамики позволяет существенно сократить временные и материальные затраты на проектирование обводов корпуса судна, выбор характеристик движителя.