

УДК 623.8.001.2

В.Н.Емельянов¹, И.Е.Капранов¹, И.Н.Скрябин¹, В.П.Чалкин²

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены современные вычислительные подходы, реализованные в инженерных пакетах для расчета конфигурации свободной поверхности и динамики плавучего объекта, погруженного в тяжелую жидкость. Приведены результаты моделирования динамики буя, обладающего положительной плавучестью при погружении и всплытии. Рассмотрена задача поведения корабля малого водоизмещения при наличии волнения.

Плавающие на поверхности тяжелой жидкости объекты представляют особый случай для вычислительного моделирования. Дело в том, что традиционные классические методы решения таких задач основаны на систематическом использовании ряда упрощений. Волновые процессы описываются обычно в рамках модели идеальной жидкости, предполагается потенциальность течения, что позволяет использовать для получения конечных характеристик интегральные методы [1, 2]. Для описания нестационарных движений в жидкости тела, увлекающего в движение окружающую среду, весьма продуктивным является вводимое для этих задач понятие присоединенной массы. Применение таких подходов, учитывающих особенности задачи, основано на существенном упрощении постановки, которое состоит как в упрощении системы уравнений, так и в особой формулировке граничных условий.

В случае использования пакетов общего назначения отпадает необходимость вводить ряд традиционных ограничений, которые применялись при постановке задач плавающего тела, при этом появляется возможность учесть и проанализировать некоторые новые, интересные для приложений факторы. Таким образом, можно ожидать, что применение пакетов для задач этого класса даст возможность получить новые, ранее недоступные результаты.

Решение задач динамики плавающих объектов простейшей геометрической формы. Для отработки моделирования динамики плавающего тела была подготовлена и решена задача погружения некоторого объекта, наподобие буя, в тяжелую жидкость.

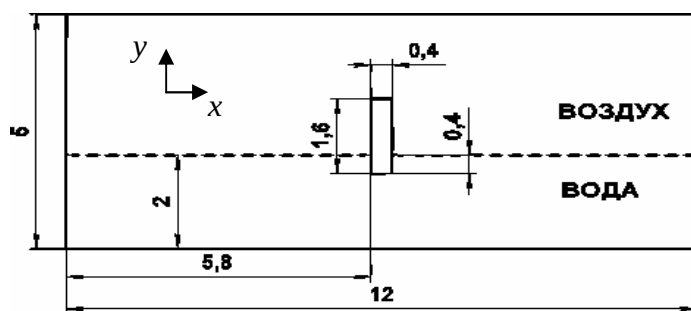


Рис. 1. Геометрические характеристики задачи
(размеры в метрах)

Предполагалось наличие у этого объекта положительной плавучести. Задача исследовалась в плоской постановке, в связи с этим тело имеет три степени свободы: две поступательные и одну вращательную. При подготовке к моделированию был проведен расчет инерционных характеристик данного объекта, а именно массы и осевого момента инерции. Геометрия задачи приведена на рис. 1.

¹ Балтийский государственный технический университет «Военмех» им.Д.Ф.Устинова (Санкт-Петербург)

² Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр РАН

© Емельянов В.Н., Капранов И.Е., Скрябин И.Н., Чалкин В.П., 2009

Для проведения расчетов средствами сеточного генератора Gambit была подготовлена расчетная сетка, которая строилась на основе треугольных ячеек. Данный тип элементов позволяет использовать разнообразные технологии перестроения и модификации сеточной структуры, что является важным элементом при моделировании задач динамики тела. На рис. 2 приведен общий вид расчетной сетки, её размерность составила 14 260 элементов.

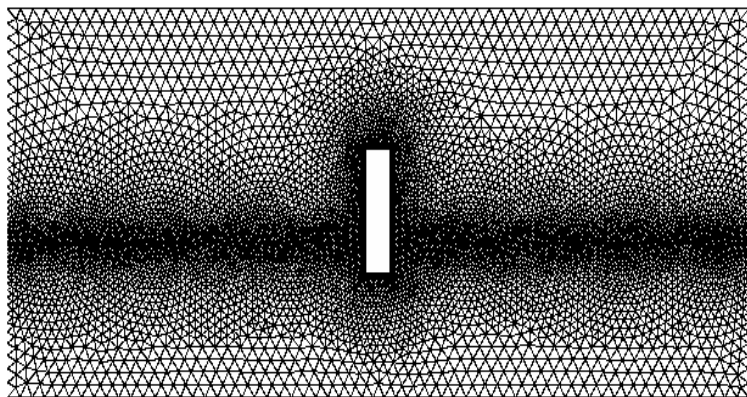


Рис. 2. Общий вид расчетной сетки

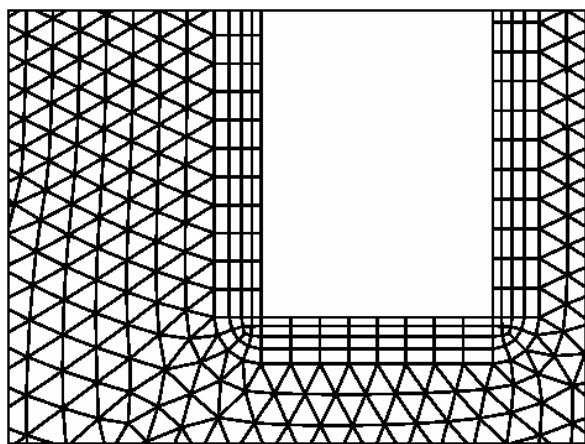


Рис. 3. Фрагмент сеточной структуры в области границы буя

Вдоль границы плавающего буя был построен пограничный слой прямоугольных ячеек, который жестко связан с телом и не деформируется. Использование такого приема (когда применяется гибридная сетка, состоящая из различных типов элементов) позволяет сочетать преимущества по точности прямоугольных сеток и возможности перестроения и модификации в области треугольной сетки. На рис. 3 приводится фрагмент сеточной структуры в области границы буя.

При построении сетки использовалась функция размера (size function) [3], с помощью которой создавалась зона уплотнения сеточной структуры вокруг границы буя и в области, где располагается свободная поверхность. В качестве источников элементов при использовании функции размера задавались граница буя и линия, совпадающая с начальным положением свободной поверхности.

Моделирование осуществлялось на основе нестационарного плоского несжимаемого течения, описываемого уравнениями Навье-Стокса, рассчитывалось ламинарное течение. В расчете задавался постоянный шаг по времени равный 0,001 с. Рассчитывался интервал физического времени в 15 с.

Задача решалась в двухфазной постановке. Применялась модель многофазности Volume Of Fluid (VOF), специализированная для решения задач со свободной поверхностью. В качестве первой фазы был взят воздух, в качестве второй - вода.

Использовался подход последовательного (Segregated) решения. В рамках этого подхода применялась схема неитерационного смещения по времени (non-iterative time advancement), которая хорошо зарекомендовала себя для решения задач подобного класса, что позволяет значительно сократить время расчета и обеспечить его стабильность.

Расчет градиентов параметров осуществлялся с использованием теоремы Грина-Гаусса на основе значений в расчетных узлах. Такой выбор метода расчета градиентов обусловлен тем, что дает большую точность по сравнению с методом расчета на основе значений в расчетных ячейках, особенно при наличии треугольных элементов.

При моделировании был использован алгоритм коррекции давления PISO, который рекомендуется применять в нестационарных задачах и в случаях, когда задается большой шаг по времени. При настройке решателя для коэффициентов релаксации устанавливались значения равные 0,1. Для интерполяции давления использовалась схема Body Force Weighted, которая может эффективно работать при моделировании многофазных задач с помощью модели Volume Of Fluid. Её преимуществом перед схемой PRESTO является то, что она устойчива при использовании схемы неитерационного смещения по времени. Для интерполяции переменных в конвективных слагаемых уравнений импульсов применялась противопоточная схема второго порядка. При решении уравнения объемной доли фазы для интерполяции переменных в конвективных членах в рамках явного подхода использовалась схема HRIC, которая является низкодиссипативной и обеспечивает высокую точность при расчете конфигурации свободной поверхности. При таких настройках обеспечивается большая устойчивость расчетного процесса по сравнению с применением схемы Geo-Reconstruct.

Левая и правая границы расчетной области определялись как открытые границы выходного типа, на них задавался уровень свободной поверхности равный 2 м. В данной задаче использовались открытые граничные условия для того, чтобы создаваемые буем при погружении волны могли уйти из расчетной области, не отражаясь и не внося возмущений. Верхняя и нижняя границы расчетной области задавались как непроницаемые стенки.

В ходе подготовки задачи к расчету с помощью пользовательской функции задавались инерционные характеристики плавающего объекта. Для плоского случая пользователю требуется задавать массу и один осевой момент инерции. Масса определялась с учетом того, что плотность материала буя меньше плотности воды в 2 раза, ее значение составило 320 кг. Момент инерции рассчитывался на основе геометрических характеристик буя и его массы, величина этой характеристики составила $72 \text{ кг} \times \text{м}^2$. При настройке решающего модуля задавались начальные данные для центра масс объекта, координаты его положения, угол и значения линейной и угловой скорости. Начальные координаты центра масс определялись следующим образом: координата x – 6 м, координата y – 2,4 м. Остальные характеристики задавались равными нулю.

В результате моделирования получены положения границ расчетной области, а также конфигурация свободной поверхности в каждый момент времени (рис. 4).

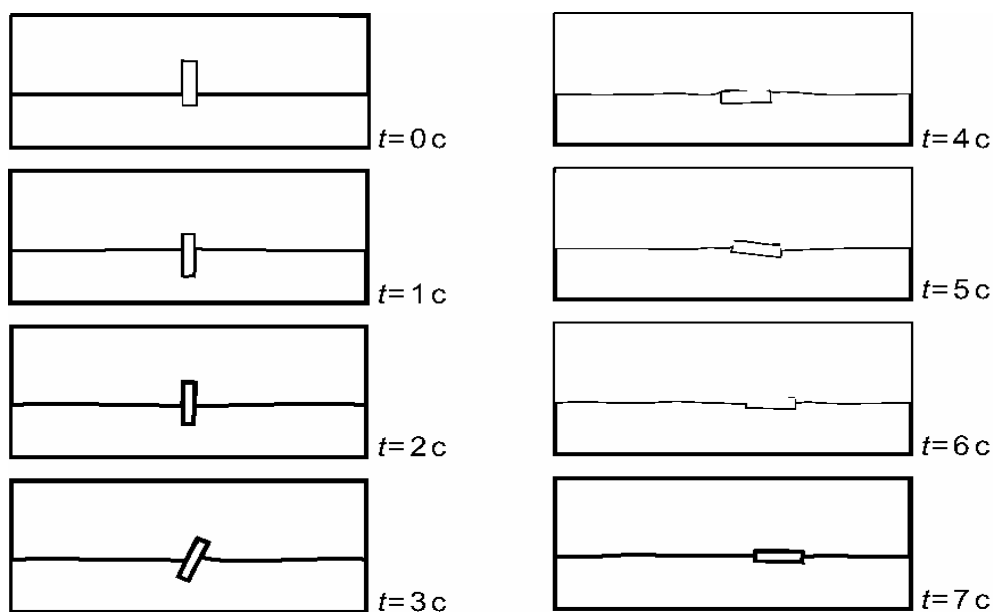


Рис. 4. Конфигурация свободной поверхности и границ расчетной области

Данные результаты позволяют проанализировать динамику погружения, всплытия плавучего буйа, а также оценить возмущения, создаваемые буюм на свободной поверхности. Для исследуемой задачи характерное время перехода буйа в горизонтальное положение равно 4 с. Приблизительно через 7-8 с после начала погружения силы, действующие на буй, взаимно компенсируются и центр масс буйа незначительно отклоняется от положения устойчивого равновесия, что связано с присутствием возмущений на свободной поверхности.

В ходе моделирования процесса погружения буйа в воду осуществлялась запись основных кинематических характеристик: положения центра масс по оси x , по оси y , а также угловое отклонение объекта. Ниже приводятся распределения во времени этих параметров. На рис. 5 представлен график, отражающий изменение во времени x - координаты центра масс плавающего объекта.

Монотонный характер изменения этого параметра говорит о плавном смещении буйа в положительном направлении оси x . График изменения во времени координаты y центра масс представлен на рис. 6. Данное распределение отражает процесс перехода буйа из неустойчивого состояния к устойчивому, когда достигается баланс между выталкивающей силой и силой тяжести.

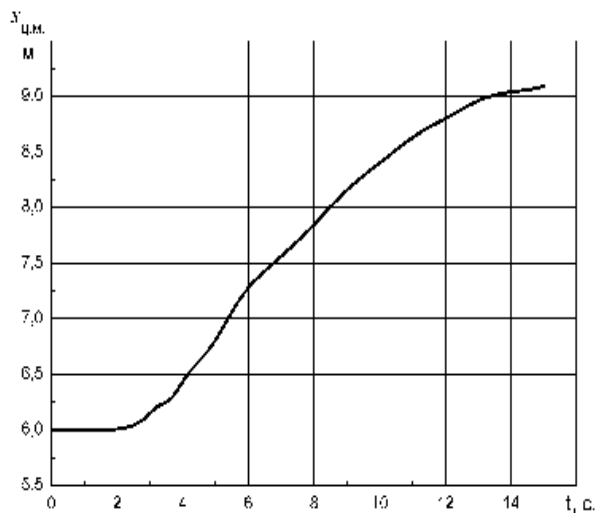


Рис. 5. Положение центра масс, координата x

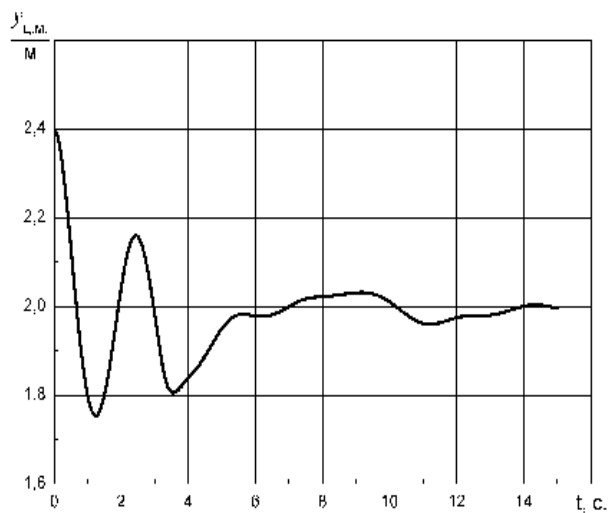


Рис. 6. Положение центра масс, координата y

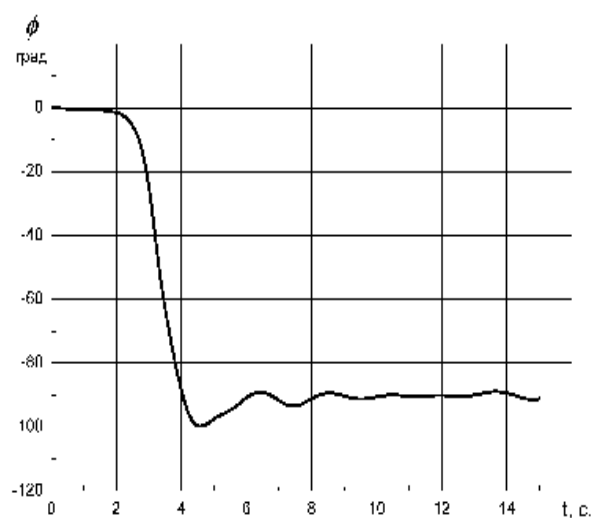


Рис. 7. Угловое отклонение объекта, град

На рис. 7 представлен график изменения величины углового отклонения плавающего объекта с течением времени. Видно, что при переходе к устойчивому состоянию буй поворачивается на -90° (что соответствует повороту по часовой стрелке) и занимает горизонтальное положение.

Для данной задачи интересным является тот факт, что в идеальном случае вероятности "заваливания" буйа при всплытии вправо и влево равны, т.е. при моделировании можно было бы ожидать отсутствие поворота буйа и его постоянное пребывание в вертикальном положении. Однако наличие таких факторов, как неоднородность сеточной структуры, определенное направление

обхода узлов при работе вычислительного алгоритма, отсутствие идеальной симметрии в начальном распределении фаз, приводит к тому, что вероятности поворота вправо и влево незначительно отличаются. В данном случае совокупность вышеперечисленных факторов привела к тому, что буй стал поворачиваться вправо.

Исследование динамики корабля малого водоизмещения при наличии волнения. Для моделирования динамики корабля в трехмерной постановке на начальном этапе возникла необходимость получить объемную геометрическую модель изучаемого объекта. Решение этой задачи осуществлялось одним из самых эффективных и удобных программных средств, CAD-системой среднего уровня SolidWorks. На рис. 8 представлена полученная модель корабля.

Средства пакета SolidWorks позволяют использовать каркас кромок или эскиз (пользуясь терминологией самого пакета) для формирования объемных тел путем линейного перемещения этого каркаса или же его вращения вокруг выбранной оси [3].

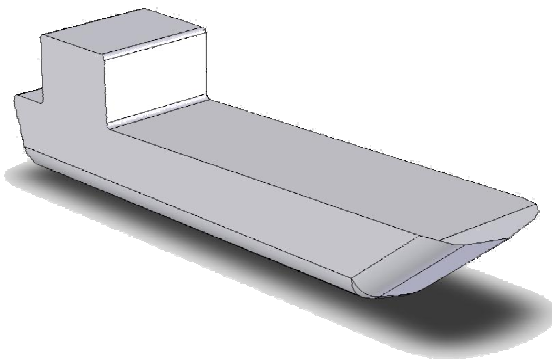


Рис. 8. Трехмерная модель корабля малого водоизмещения, построенная на основе плоской геометрической модели

В данном случае использовался инструмент линейного перемещения имеющегося профиля корабля. В результате была получена объемная модель, которая далее дорабатывалась средствами дополнительной обработки трехмерных объектов. Инструментом скругления, применяемым для создания закругленной грани вдоль одной или нескольких кромок, были сглажены те

элементы модели, которые должны соприкасаться с водой, а именно: борта корабля, дно, корма и носовая часть. Для формирования киля и выдающейся носовой части применялись инструменты срезания трехмерного объема линейно перемещаемым каркасом, состоящим из нужной конфигурации кромок. Таким образом, предварительно строился каркас или эскиз, который, перемещаясь по заданному направлению, подрезал имеющийся объем и формировал нужные элементы конфигурации. В результате этой последовательности действий была получена приближенная трехмерная модель корабля малого водоизмещения. На рис. 9 приведены основные геометрические характеристики построенной модели.

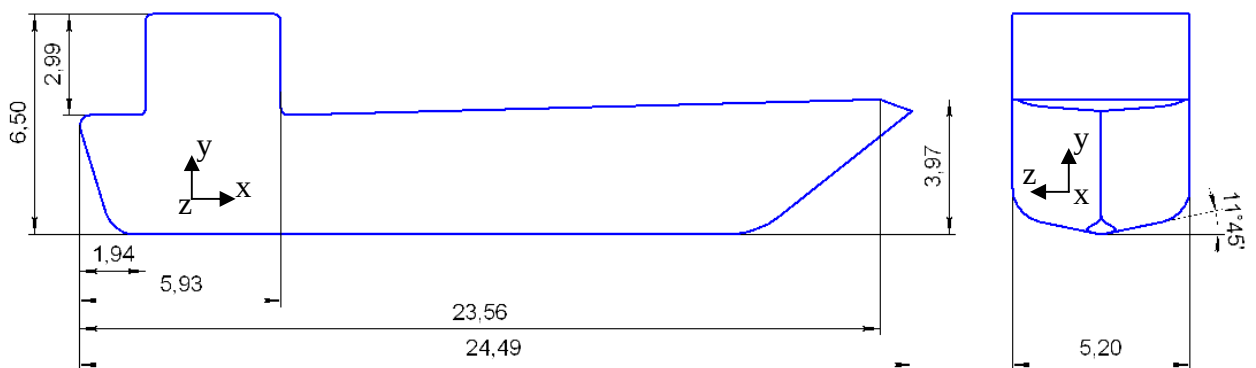


Рис. 9. Геометрические характеристики трехмерной модели корабля (размеры в метрах)

Для решения задачи динамики тела, имеющего в общем случае 6 степеней свободы, необходимо в качестве исходных данных представить его инерционные характеристики - массу и моменты инерции. Другим важным элементом подготовки к расчету является определение и задание положения центра масс корабля таким образом, чтобы обеспечивалась его устойчивость и отсутствие дифферента и крена в случае невозмущенной свободной поверхности.

Масса исследуемой модели корабля вычислялась на основе соотношения, выражающего равенство силы тяжести, действующей на корабль, и выталкивающей силы, действующей со стороны жидкости на корабль. Данное соотношение в итоге можно свести к равенству массы объекта и массы объема жидкости, которую вытесняет объект:

$$m_{\text{объекта}} = m_{\text{вытесненной жидкости}}$$

Для определения массы вытесняемой жидкости использовались инструменты пакета SolidWorks с целью анализа массовых характеристик твердотельной модели. В данном случае бралась построенная модель корабля и разделялась на часть, которая погружается в воду, и часть, которая остается над водой. Линия разделения этих двух частей, она же ватерлиния, определялась исходя из заданной осадки корабля равной 1,5 м. На рис. 10 приводится часть модели корабля, которая находится под водой при неподвижном уравновешенном положении корабля. Массовые характеристики этого фрагмента были исследованы с помощью инструментов пакета SolidWorks.

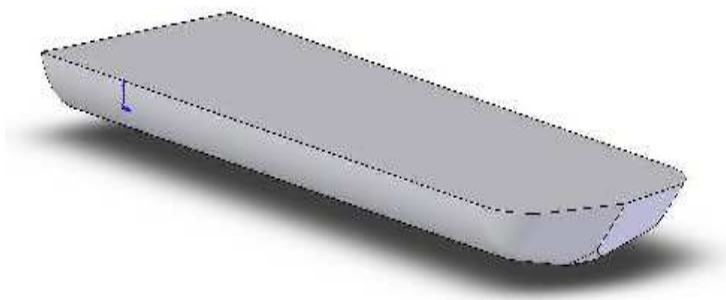


Рис. 10. Часть твердотельной модели корабля, погруженная в воду, когда корабль находится в неподвижном уравновешенном положении

Чтобы получить значение массы выбранного твердотельного объекта, CAD-системе необходимо передать значение средней плотности, которой обладает объект. Таким образом, была задана плотность 988.0 кг/м³, соответствующая плотности воды. В результате в панели «массовые характеристики» пакета SolidWorks были получены необходимые данные: масса - 120539.4 кг; объем - 122.0 м³; площадь поверхности - 252.2 м².

После определения массы объекта остается определить значения моментов инерции, чтобы полностью задать инерционные характеристики корабля. Однако моменты инерции должны определяться относительно точки, совпадающей с центром масс корабля; именно эти значения моментов инерции следует передавать модулю решения задачи динамики тела 6DOF Solver в пакете FLUENT, т.е. первоначально возникает необходимость выявления координат центра масс корабля. Здесь надо сделать некоторые пояснения относительно того, что понимается под центром масс в пакете FLUENT. Поскольку в общем случае геометрическое тело, динамика которого рассматривается при использовании модуля 6DOF Solver, может иметь достаточно сложную форму и неоднородное распределение плотности, в пакете FLUENT имеется возможность принудительного задания значения центра масс. Это значение и будет соответствовать характеру распределения плотности изучаемого объекта. В нашем случае фактическое распределение плотности должно быть таким, чтобы обеспечивалась продольная и поперечная устойчивость корабля, т.е. отсутствие дифферента и крена в ситуации, когда свободная поверхность не возмущена вследствие каких-либо факторов. Требуемое распределение плотности реализуется в случае совпадения центра масс и точки, относительно которой скомпен-

сированы компоненты главного момента, действующего на объект, т.е. центра давления. Таким образом, задача определения требуемого положения центра масс сводится к задаче определения центра давления.

В пакете FLUENT среди средств обработки результатов расчета имеются специальные инструменты для вывода всех силовых факторов, действующих на выбранные подвижные и неподвижные границы. В дополнение к этому существует возможность вывода коэффициентов сил и моментов, а также координат центра давления.

Для того чтобы использовать вышеуказанные инструменты, необходимо осуществить расчет и получить сошедшийся результат в случае, если постановка задачи стационарная. Если же постановка нестационарная, необходимо добиться выхода значений силовых факторов на некоторые постоянные, не изменяющиеся во времени величины. Таким образом, был выполнен расчет, цель которого заключалась в определении силового воздействия среды на корабль, в которую он погружен, динамика тела при этом не рассчитывалась, т.е. модуль 6DOF Solver не использовался. В ходе расчета осуществлялась запись основных динамических характеристик. На рис. 11 представлены графики изменения во времени компоненты y главного вектора сил и компоненты z главного момента.

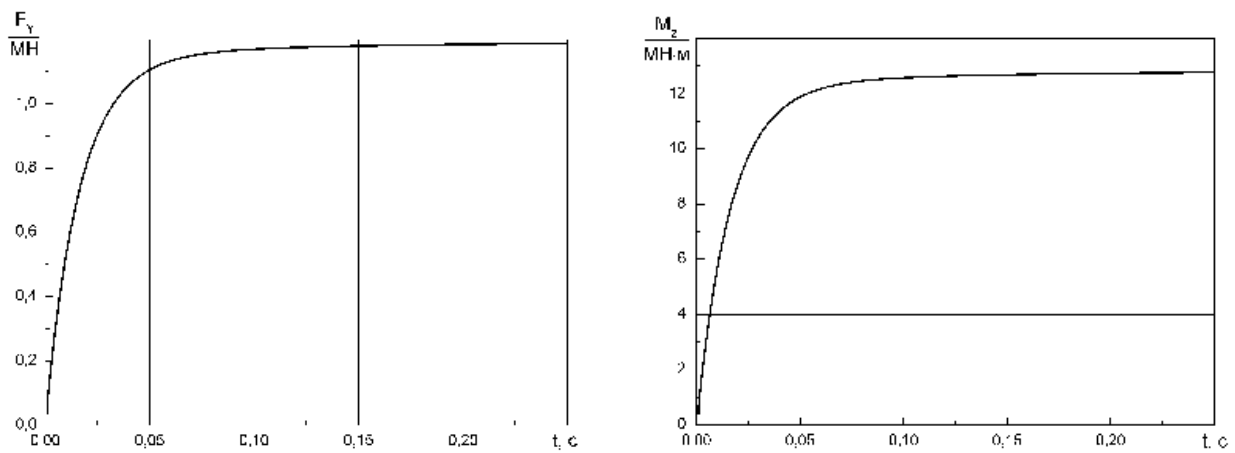


Рис. 11. Изменение во времени значения компоненты y главного вектора сил (слева) и компоненты z главного момента (справа)

Из полученных результатов видно, что после 0,2 с динамические характеристики выходят на постоянные значения. Таким образом, после этого момента времени можно выполнить расчет центра давления, при этом необходимо зафиксировать одну из трех координат, задав её постоянное значение.

В нашем случае расположение глобальной системы координат таково, что ось x совпадает с продольным направлением модели корабля, а ось y совпадает с направлением вектора силы тяжести. Соответственно, для определения координаты x центра давления была зафиксирована координата y значением 1.15 м. Данное значение было выбрано достаточно произвольно по тем лишь соображениям, что центр давления должен быть ниже ватерлинии.

В результате были получены значения для всех координат центра давления:

x , м	y , м	z , м
10.74	1.15	0

Получив значения координат центра давления, стало возможным корректное задание центра масс объекта, а также проведение расчета моментов инерции относительно точки с данными координатами. Определить искомые значения удалось благодаря использованию пакета SolidWorks, в котором осуществлялось построение трехмерной модели корабля. Предварительно была создана вспомогательная система координат с центром в точке, совпадающей с центром давления. Оси этой системы координат задавались сонаправлен-

ными с осями глобальной системы координат. Завершающим элементом подготовки к расчету моментов инерции являлось задание средней плотности объекта, инерционные характеристики которого исследуются. Значение средней плотности определялось по известной массе и объему полной твердотельной модели корабля. Информация об объеме модели доступна в панели «массовые характеристики» пакета SolidWorks. Расчет средней плотности выполнялся следующим образом:

$$\rho_{\text{средн.}} = \frac{m_{\text{объекта}}}{V_{\text{объекта}}} = 273.4 \text{ кг/м}^3.$$

После задания корректного значения плотности материала модели, а также выбора вспомогательной системы координат в качестве активной системы координат был произведен расчет моментов инерции. Полученные значения всех инерционных характеристик передавались в пакет FLUENT посредством специализированной пользовательской функции. Ниже приводятся значения всех моментов инерции, $\text{кг} \times \text{м}^2$:

$$\begin{array}{lll} I_{xx} = 708740 & I_{yx} = -249839 & I_{zx} = 0 \\ I_{xy} = -249839 & I_{yy} = 5307148 & I_{zy} = 0 \\ I_{xz} = 0 & I_{yz} = 0 & I_{zz} = 5506096 \end{array}$$

При решении задачи в трехмерной постановке приходится сталкиваться с рядом особенностей, которые отсутствуют в плоском случае. В трехмерном случае необходимо применять пространственные элементы, на основе которых строится сеточная структура. Поскольку для данной задачи имеет место изменение положения границ (плавающий объект перемещается на свободной поверхности), необходимо создавать сетку, состоящую из тетраэдрических элементов (tetrahedral elements). Необходимость этого вызвана требованием алгоритма модификации сетки, который локально перестраивает сеточную структуру для адаптации к движущейся границе. В плоском случае по аналогичным причинам сетку необходимо было строить на основе треугольных ячеек (tri elements). На рис. 12 представлены поперечный слой элементов сеточной структуры (слева) и сеточная структура на поверхности модели корабля (справа).

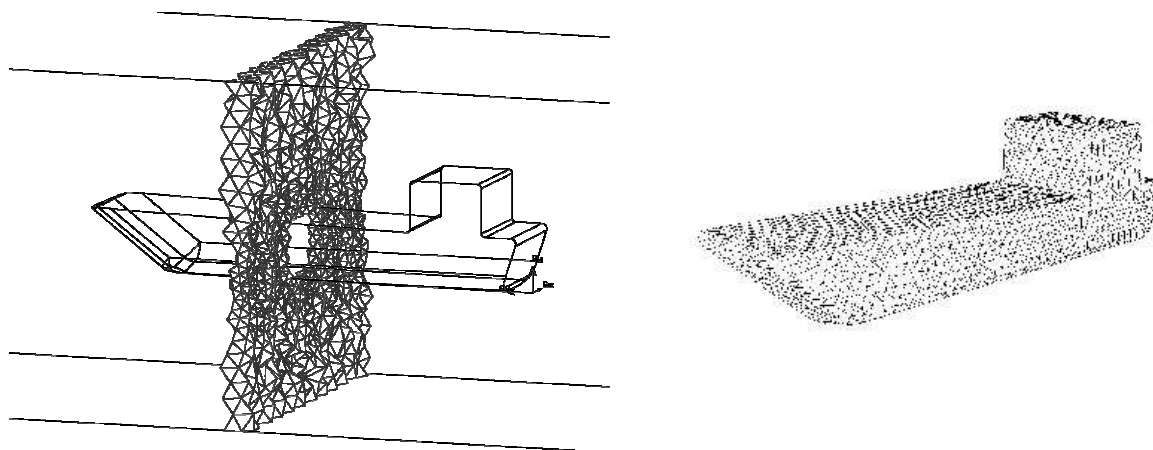


Рис. 12. Поперечный слой элементов (слева),
сеточная структура на поверхности модели корабля (справа)

При изучении динамики плавающего объекта встает задача анализа его поведения при наличии волнения свободной поверхности, то есть гравитационных волн, приходящих к объекту и взаимодействующих с ним. Для моделирования волнения на свободной поверхности была написана специальная функция, контролирующая поток массы на входной границе. Расчет поведения при наличии волнения начинался с момента установления корабля на свободной поверхности путем добавления функции волногенерации. Взаимодействие пользовательской функции и решающего модуля осуществлялось путем передачи в

функцию текущего значения времени, после этого функция рассчитывала и возвращала результат. Если результат являлся неотрицательным, то поток должен был втекать в расчетную область с заданным расходом. При положительном результате направление потока изменялось на противоположное, и он должен был покинуть расчетную область. Период смены знака функции задавался равным 2 с. Величина расхода на входной границе устанавливалась равной для воды 20000 кг/с, для воздуха 0 кг/с.

Для снижения расчетного времени при решении задачи проводилось распараллеливание расчета. Данная процедура предполагает разделение всей расчетной области на зоны, в каждой из которых задачу решает отдельный расчетный процесс. Параллельные расчетные процессы могут запускаться как на многопроцессорной вычислительной станции для любого из процессоров, так и в рамках вычислительной сети для любого количества узлов, принадлежащих данной сети. Необходимо отметить, что решающий модуль пакета FLUENT позволяет выполнить распараллеливание с включенной опцией динамического перестроения сетки, при этом на каждом шаге по времени разбиение на зоны повторяется, так как меняется сама структура вычислительной сетки. На рис. 13 приведена расчетная область с границами, разделяющими зоны при распараллеливании.

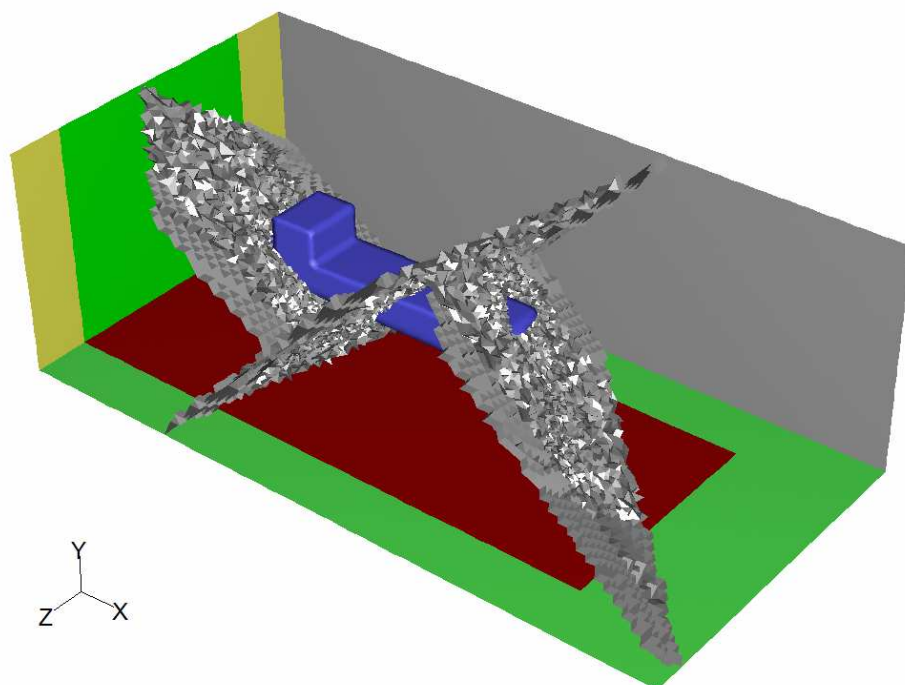


Рис. 13. Разделение расчетной области на зоны при распараллеливании расчета

Для получения лучшей производительности необходимо использовать

UNIX-подобную операционную систему. Большая часть систем для параллельных расчетов в настоящее время работает под управлением операционной системы Linux. Эта система предоставляет расширенные возможности по администрированию сетей, мощные средства мониторинга, позволяет добиться наилучшей масштабируемости, т.е. коэффициента сниже-

ния времени расчета в случае использования некоторого количества параллельных процессов по сравнению с расчетным временем без распараллеливания.

Таким образом, методы параллелизации позволяют в большинстве случаев обойти проблемы, связанные с ограничением объема оперативной памяти и недостаточной процессорной мощностью.

В процессе расчета в каждый момент времени проводилась запись всех основных характеристик исследуемого объекта. Это три координаты центра масс объекта, а также три угла, определяющие ориентацию абсолютно твердого тела в пространстве. На рис. 14 приведены графики изменения этих характеристик во времени. Изменение координаты x центра масс корабля свидетельствует о том, что корабль смещается в направлении распространения волнения на свободной поверхности. Колебательный характер изменения коор-

динаты y говорит о воздействии набегающих на корабль волн, при этом амплитуда подъема-спуска объекта составляет приблизительно 1 м. Как видно из рисунка изменение угла поворота корабля относительно оси x носит ступенчатый характер. Это связано с тем, что данная характеристика отклоняется от равновесного значения незначительно, а точность записи углов при проведении расчета составляет 2 знака после запятой.

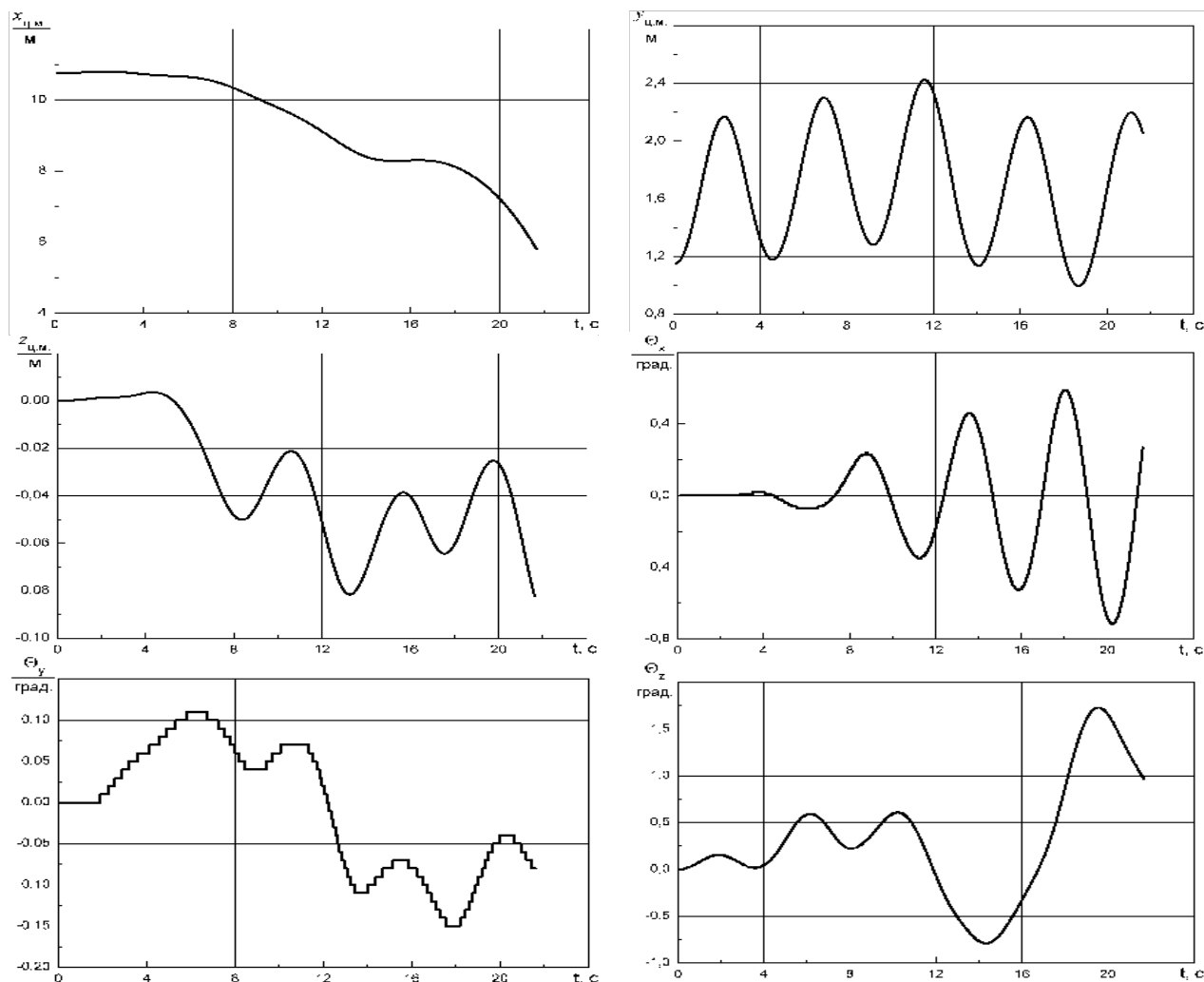


Рис. 14. Изменение во времени кинематических характеристик плавающего объекта

Для наглядного визуального представления процесса движения объекта и жидкости в разные моменты времени в расчетной области комбинировалось построение внешних границ расчетной области, границ объекта, а также границы раздела двух фаз, т.е. свободной поверхности. Свободная поверхность строилась как изоповерхность значения объемной доли одной из фаз. Значение объемной доли бралось равным 0,5. Точность данного приближения для определения свободной поверхности зависит от степени подробности сеточной структуры в области раздела фаз и от используемой схемы интерполяции для расчета конвективного слагаемого в уравнении объемной доли фазы.

На рис. 15 приведены данные визуализации в различные моменты времени. Для большей наглядности графический вывод свободной поверхности осуществлялся с коэффициентом прозрачности 0,3. Приводимые результаты соответствуют характерным моментам времени, в которые плавающий объект занимает определенное положение в расчетной области. В моменты времени $t = 6,93$ с и $t = 11,56$ с корабль находится в положениях наибольшего подъема. Это видно и на рис. 14 из распределения во времени координаты

у центра масс. При $t = 9,24$ с корабль опускается в нижнее положение, соответствующее текущей фазе колебания. Три другие момента времени, приведенные на рис. 15: $t=5,80$ с, $t = 17,52$ с и $t = 21,60$ с, соответствуют различным промежуточным положениям исследуемого объекта.

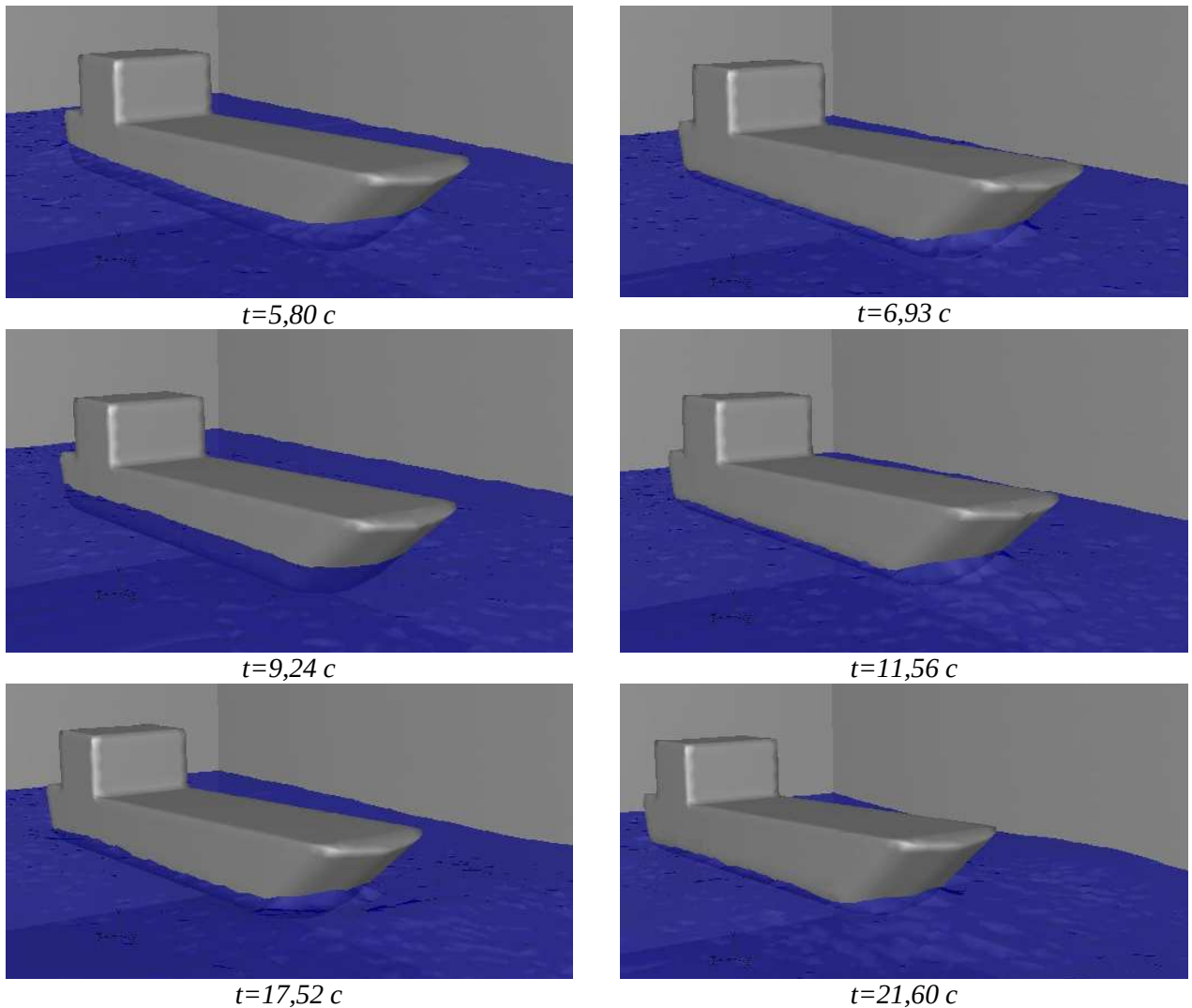


Рис. 15. Положение объекта и конфигурация свободной поверхности в различные моменты времени

Основным результатом данной работы можно считать полученную методику решения связанных задач, где совместно рассматриваются гидродинамика и динамика твердого тела. При этом использовались возможности универсального программного комплекса FLUENT, который позволяет выполнять данное сопряжение без привлечения других комплексов соответствующей расчетной специализации. Для получения решения задач, подобных рассмотренным в данной работе, в среде пакета требовалось выполнить тонкую настройку решающего модуля. Это было осуществлено на основе имевшегося опыта решения тестовых задач с проработкой различных комбинаций модельных опций.

При разработке методики решения задач динамики плавучего тела сначала рассматривалась задача в плоской постановке для объекта простейшей геометрической формы. Основными упрощениями в этом случае можно считать использование плоских элементов сеточной структуры, а также расчет только трех степеней свободы для исследуемого те-

ла. Далее на основе проработанных аспектов постановки и решения несложных задач проводилось моделирование динамики тела сложной пространственной конфигурации, корабля малого водоизмещения. Перед решением этой задачи выполнялись подготовительные этапы по определению координат центра масс объекта из условия равновесия. Полученные результаты демонстрируют большие возможности для решения широкого круга связанных задач, где рассматривается взаимодействие потока жидкости и абсолютно твердого тела с шестью степенями свободы.

Литература

1. *Ньюмен Дж.* Морская гидродинамика. Л.: Судостроение, 1985. 368 с.
2. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. М.: ФМ, 1961. 824 с.
3. GAMBIT 2.2 User's Guide. 2005.
4. FLUENT 6.3 User's Guide. 2006.
5. *Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б.* Solidworks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

Статья поступила в редакцию 08.09.2008 г.