

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОДВИЖНЫХ ТЕЛ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВО FlowVision НРС.
ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ**

МОСКАЛЕВ И.В., инженер, ООО «ТЕСИС»

Вступительная часть

Одной из сфер успешного применения [FlowVision](#) является судостроение. В первую очередь в задачах судостроения, а так же при проектировании насосов, исследования приводнения воздушных судов-амфибий, расчета наплавных архитектурных объектов и в задачах о падении тел в воду возникает необходимость расчета поведения свободной поверхности в условиях взаимодействия с подвижными телами.

Подобный класс задач успешно решается во FlowVision с минимумом временных затрат. Однако, существуют особенности при постановке таких задач в рассматриваемом программном комплексе, без учета которых возможны получение ошибочных результатов или значительные потери вычислительных ресурсов.

В данной статье рассматриваются различные этапы постановки задач со свободной поверхностью и подвижным телом, приводятся результаты моделирования, даются рекомендации, которые позволят с большей вероятностью получить приемлемые результаты, затратив минимум времени и усилий.

Расчетная область и подвижные тела

Для решения упомянутого класса задач необходимо импортировать тело эквивалентное расчетной области и геометрию подвижных тел.

FlowVision позволяет задавать закон движения подвижного тела в виде:

$$V = V_0 + Om \left(\int \frac{F}{m} dt + \int \frac{F_{hydro}}{m} dt \right) \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 + Om \left(\int J^{-1} M dt + \int J^{-1} M_{hydro} dt \right) \quad (2)$$

где V_0 – постоянная составляющая скорости,

F – произвольная внешняя сила,

m – масса твердого тела,

F_{hydro} – гидродинамическая сила,

ω_0 – постоянная составляющая угловой скорости,

M – момент произвольной внешней силы,

J – тензор моментов инерции,

M_{hydro} – момент гидродинамической силы,

Om – параметр релаксации (демпфирующий параметр).

Во FlowVision допускается пересечение геометрий подвижного тела и расчетной области. Если в двумерной задаче необходимо жестко связать два подвижных тела, связующее звено можно расположить за пределами расчетной области. В задаче исследования отбегания аэро- или гидродинамического элемента под разными углами атаки целесообразнее угол атаки задавать положением подвижного тела, чем создавать множество проектов с различной расчетной областью. Подвижные тела, выходящие за пределы расчетной области, могут быть использованы для задания функции объема расчетной области от времени.

Не допускается совпадения части фасеток подвижного тела или расчетной области: в такой ситуации возможны нефизичные явления и несходимость решения. При необходимости расположить тело вплотную к границе расчетной области (без зазора) рекомендуется предусмотреть в геометрии избыточный объем, который можно вынести наружу.

При выборе расчетной области необходимо помнить, что близко расположенные к исследуемой области граничные условия могут вносить искажения в решение. Рекомендуется в каждом направлении от подвижного тела до границы расчетной области иметь 3-4 размера подвижного тела в этом же направлении.

Математические модели

Для исследования двухфазного течения со свободной поверхностью во FlowVision предусмотрена модель переноса фазы. Эта модель может быть использована для моделирования водных судов с последующим определением коэффициентов сопротивления, заполнения форм расплавом и т.д.

В модели используется функция заполнения (VOF), принимающая значения $F=0$ (газ) и $F=1$ (жидкость). Процесс переноса фазы определяется уравнением переноса функции заполнения (F):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0 \quad (3)$$

Свойства жидкости μ , λ , D , C_p и плотность вычисляются в соответствии со следующей формулой:

$$f = F f_f \quad (4)$$

Свободная поверхность представляется набором фасеток, отсекающих расчетную область, при этом, рассчитываются только те ячейки, в которых функция $F=1$, т.е. в которых присутствует жидкость.

Во FlowVision реализовано несколько моделей турбулентности. Чаще всего на практике применяются две модели: стандартная k - ϵ модель и SST-модель. Первую модель можно рекомендовать для решения задач с малыми отрывными зонами, вторую в обратных ситуациях, с большими градиентами давления. Для задач с малым числом Re не имеет смысла включать модель турбулентности, что позволит сэкономить время и вычислительные ресурсы.

В ряде задач с несжимаемой жидкостью решение не устойчиво и не сходится из-за локальных пиков скоростей. Например в задаче с падением тяжелых тел на поверхность воды, скорость в ряде ячеек приближается к скорости звука. Для обеспечения устойчивости решения необходимо использовать «искусственную скорость звука» a , являющуюся демпфирующим параметром. Значение a рекомендуется выбирать в три раза больше местной скорости звука. В программе предусмотрено минимально допустимая величина a , превышающая в два раза местную скорость звука.

При расчете движения тел, для которых включен учет действия гидродинамических сил, в качестве параметра интегрирования по времени рекомендуется выбирать «предиктор-корректор» (окно свойств «дополнительные настройки - численный метод»), что позволит увеличить точность расчета уравнений Навье-Стокса при ускоренном движении тел в расчетной области.

Граничные условия

В задачах со свободной поверхностью на границах расчетной области для функции заполнения определены следующие граничные условия:

«Пользовательское значение» - на границе задано фиксированное значение F_w :

$$F|_w = F_w \quad (5)$$

«Симметрия» - на границе поток равен нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial n}|_w = 0 \quad (6)$$

Если в задаче необходимо учитывать дно, но при этом задается набегающий поток жидкой фазы, то в качестве соответствующего дну граничного условия рекомендуется использовать ГУ «Симметрия». Это граничное условие можно так же использовать в случае бесконечно удаленного дна и стенок, однако при этом необходимо отнести соответствующую границу расчетной области на достаточно большое расстояние от подвижного тела. Для бесконечно удаленного дна целесообразнее использовать граничное условие «вход/выход» с установленным нулевым давлением, так как, возмущения не будут отражаться от граничного условия.

Расчетная сетка

Во FlowVision используется метод конечных объемов, на данный момент наиболее прогрессивный численный метод для САЕ систем; расчетная сетка - ортогональная. Построение сетки происходит автоматически по задаваемой пользователем функции размера ячейки. Для более точной аппроксимации сложных поверхностей на прямоугольной сетке во FlowVision работает механизм подсеточного разрешения геометрии. Для разрешения высоких градиентов рассчитываемых величин и отдельных деталей геометрии можно применять инструмент адаптации – адаптивное локальное измельчение сетки.

Параметры сетки оказывают серьезное влияние на результаты расчетов во FlowVision. Для анализа влияния расчетной сетки на решение задач с подвижным телом и свободной поверхностью проводился численный эксперимент: при помощи программного комплекса FlowVision 3.0.5. моделировалось всплытие подводной лодки в набегающем потоке морской воды.

На рисунке 1 приведена схема, иллюстрирующая простейшую постановку задачи.

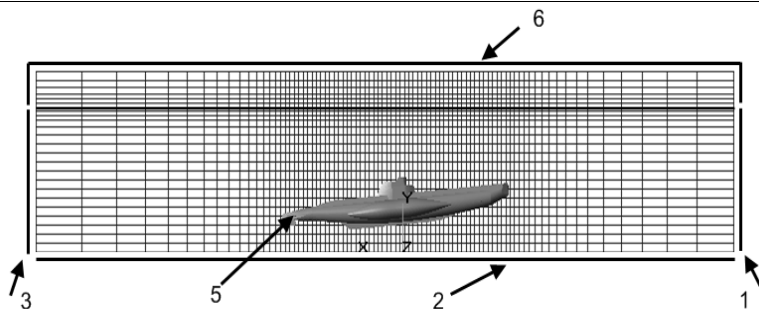


Рис.1. Расчетная схема и начальная расчетная сетка

- Математическая модель:
 - Движение: ньютоновская жидкость
 - Турбулентность: стандартная k- ε модель
 - Перенос фазы: модель VOF
- Размеры расчетной области: 400x40x80 м
- Размеры подводной лодки: 57x8x6 м
- Лодка вращается вокруг оси z (ось проходит через центр масс подвижного тела) и перемещается вдоль оси Y под действием гидростатической и гидродинамической сил.
- Высота уровня жидкости: 32
- Масса подводной лодки: 720000 кг
- Параметры среды:
 - плотность морской воды: 1028 кг/м³ ;
 - вязкость: 0,00103 м²/с
 - скорость набегающего потока: 4 м/с

Граничные условия:

1. Вход:
 - a. Массовая скорость: 4112
 - b. VOF=1
2. Дно:
 - a. Стенка
 - b. VOF - симметрия
3. Выход:
 - a. Свободный выход
 - b. VOF=1
4. Боковые стенки:
 - a. Симметрия
 - b. VOF=1
5. Лодка:
 - a. Стенка
6. Другое:
 - a. Вход/выход
 - b. VOF=0
 - c. Давление=0

При решении любых задач со свободной поверхностью важно помнить о следующих правилах задания сетки:

1. Линия гладкой свободной поверхности не должна совпадать с линией сетки.
2. Необходимо более высокое разрешение сетки в области линии свободной поверхности.
3. При решении задач с тонким слоем жидкости, для его разрешения, необходимо минимум 4 слоя ячеек.
4. Разница в размере соседних ячеек не должна превышать двух крат.
5. При решении одномерных задач необходимо задавать сетку шириной в две, а не одну ячейку.

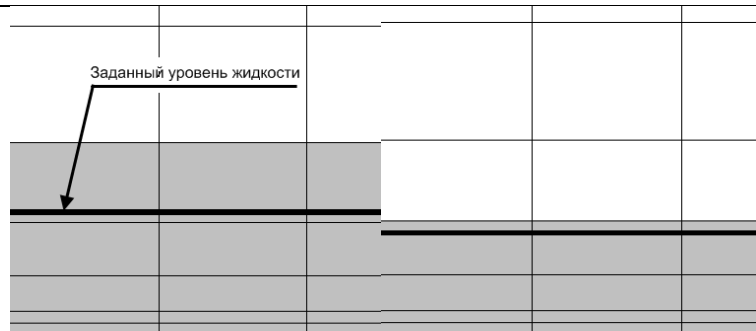


Рис. 2. Способы задания начального распределения жидкости

При несоблюдении этих правил: в первом случае могут получиться нефизичные явления на поверхности, во втором - возможны значительные потери в точности решения. Из-за особенности VOF-модели, внутри одной ячейки функция наполнения может принимать значения либо 1, либо 0. Задав начальное распределение функции VOF (рассмотрим случай, когда верхняя граница жидкости соответствует гидростатическому нулю), при крупной начальной сетке можно получить уровень жидкости значительно выше желаемого, что в ряде задач недопустимо. Необходимо расположить верхнюю линию слоя ячеек близко к линии начального распределения свободной поверхности. Даже если область у поверхности адаптируется, измельчение сетки произойдет только после начального распределения фазы. На рисунке 2 приведен пример первой итерации в задаче о слое, толщиной 0,25 мм, стекающей по поверхности стекла жидкости. При неправильном задании расчетной сетки уровень жидкости будет значительно больше, что может быть не сразу замечено, но повлияет на результаты численного эксперимента.

При решении задачи с подводной лодкой были проведены численные эксперименты со следующими параметрами сетки:

1. Только начальная грубая сетка (см. рис. 1)
2. Дополнительная адаптация начальной сетки до третьего уровня по поверхности подвижного тела
3. Динамическая (со «слитием» ячеек вне окрестности лодки) адаптация по поверхности лодки до третьего уровня
4. Динамическая адаптация по поверхности лодки до третьего уровня в три слоя и адаптацией по поверхности мелких деталей геометрии до 4 уровня в три слоя
5. Динамическая адаптация по поверхности лодки до третьего уровня в три слоя

Для сравнения полученных результатов использовался график результирующей всех сил, действующих в вертикальном направлении на поверхность подвижного тела.

Результат первого численного эксперимента представлен на рисунке 3. На временном отрезке от 3 до 6 секунд получены крупные осцилляции значения результирующей силы. В окрестности передних и задних рулевых крыльев отсутствует возмущение потока. Данные результаты являются неудовлетворительными, необходима более подробная сетка.

Для учета особенности геометрии нельзя измельчать всю сетку (сильно возрастают требования к вычислительным ресурсам), необходима локально измельченная адаптация сетки. Во втором эксперименте была включена адаптация до третьего уровня по поверхности лодки, в этом случае подвижное тело оставляет за собой след (см. рис.4), измельченную начальную расчетную сетку, что приводит хоть и к меньшему числу расчетных ячеек, чем при измельчении всей начальной сетки, но по-прежнему недостаточно эффективно экономит ресурсы.

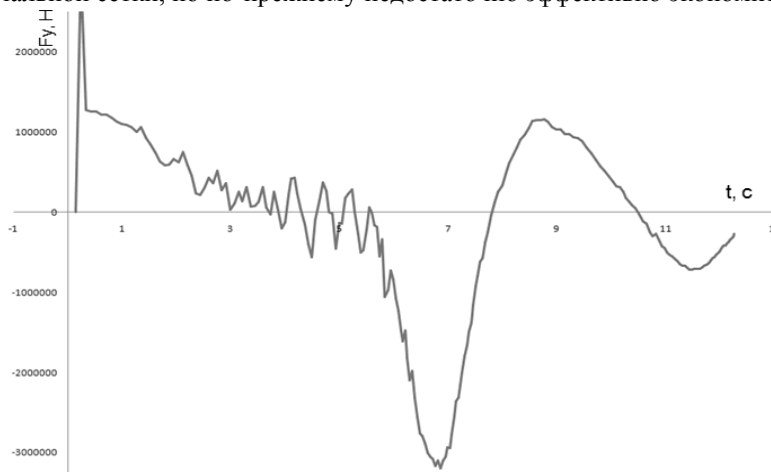


Рис.3. Вертикальная результирующая сила

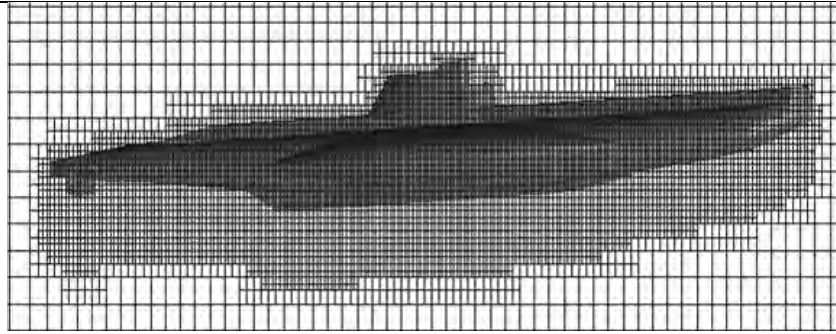


Рис.4. Статическая адаптация по поверхности лодки

Во FlowVision 3, в сравнении с более ранними версиями, появилась возможность производить «слияние» адаптированных ячеек расчетной сетки. Если адаптация происходит по поверхности подвижного тела, то вне окрестности, на которую распространяется адаптация, будет производиться «слияние» ячеек от заданного уровня, вплоть до начальной расчетной сетки. Результаты эксперимента с динамической адаптацией приведены на рисунке 5.

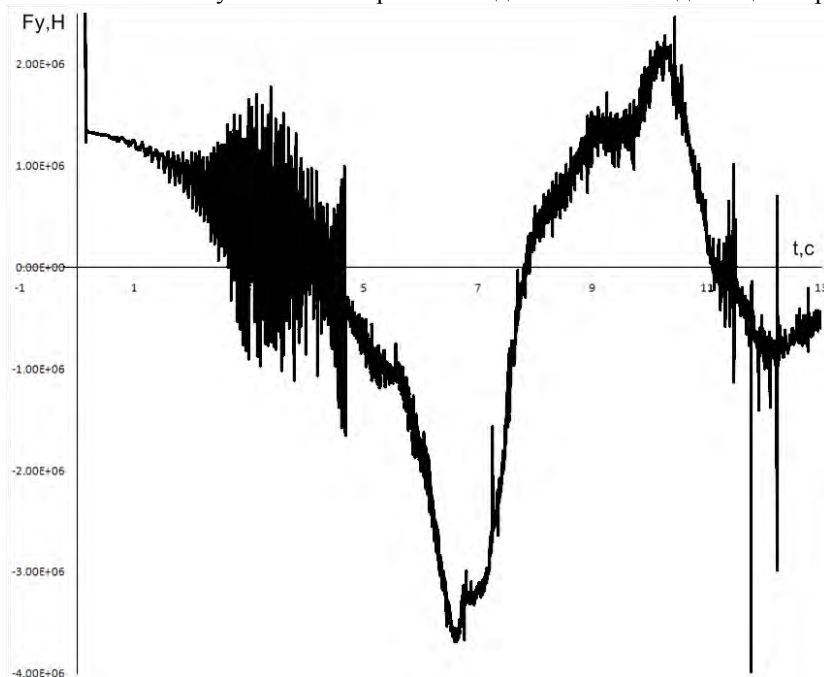


Рис. 5. Вертикальная результирующая сила

Значительные осцилляции силы связаны с рядом особенностей математической модели и численного метода.

Для получения более устойчивых результатов необходимо увеличить количество слоев адаптации (см. рис 6). Чем меньше слоев, тем возмущения, связанные с адаптацией и «слиянием» ячеек (с «движением» измельченной сетки), сильнее воздействуют на поверхность подвижного тела.

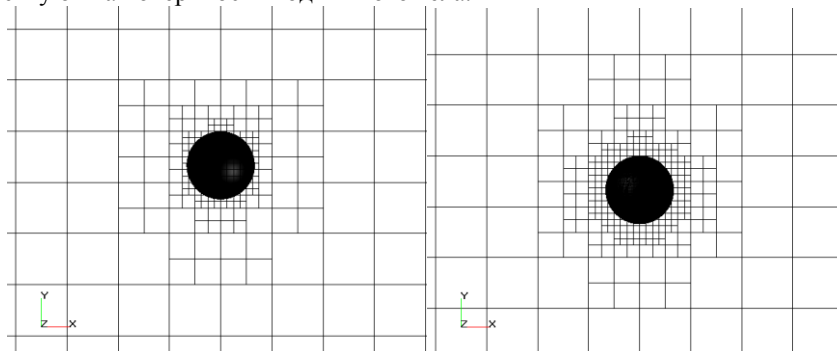


Рис. 6. Адаптация в один и три слоя.

Существует еще один фактор, вызвавший значительные осцилляции рассчитываемого параметра. При недостаточном

разрешении мелких деталей (в проводимом эксперименте ими являлись передние и задние рулевые элементы), геометрия «разрезает» крупные ячейки на три части: две расчетные и одну нерасчетную. При выходе из ячейки, если шаг по времени достаточно большой, геометрия покидает ячейку, происходит слияние параметров в ранее разделенных областях. В результате, при всплытии на крылья подводной лодки со стороны жидкости действует сильно колеблющаяся сила.

Следовательно, необходимо принять следующие меры:

- увеличить количество слоев адаптации
- увеличить уровень адаптации по поверхности мелких деталей геометрии

Результаты соответствующего численного эксперимента представлены на рисунке 7.

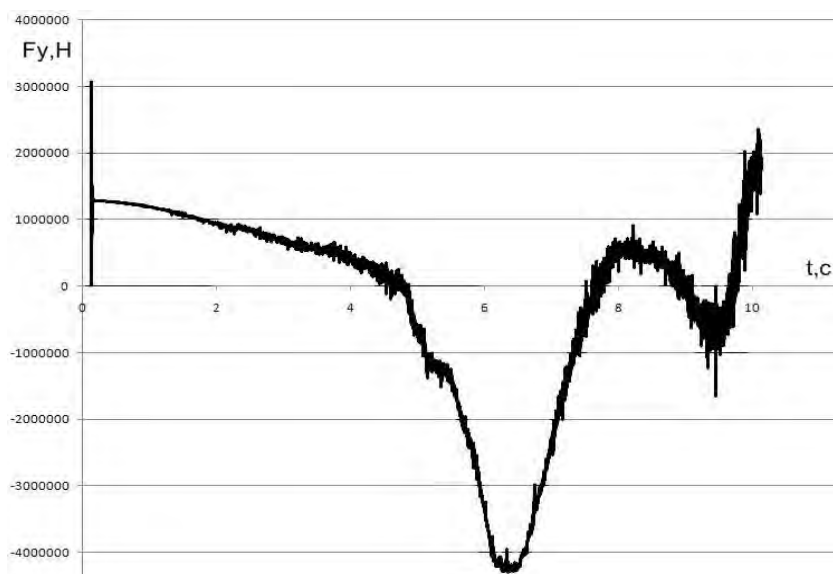


Рис. 7. Вертикальная результирующая сила

На временном отрезке от 7 до 10 секунд результирующая сила имеет неожиданный характер. Связано это с «растягиванием» (см. рис. 8) свободной поверхности при «слитии» адаптированных ячеек, в которых функция VOF имеет значение 1. При постановке задачи была выбрана слишком крупная начальная сетка выше уровня воды. Когда подвижное тело пронесло с собой в эту область жидкую фазу и начало двигаться вниз, при «слитии» адаптированной сетки в укрупненные ячейки записывалось значение функции переноса равное единице. Таким образом область присутствия свободной поверхности расширялась против законов физики.



Рис. 8. Вытягивание свободной поверхности при динамической адаптации

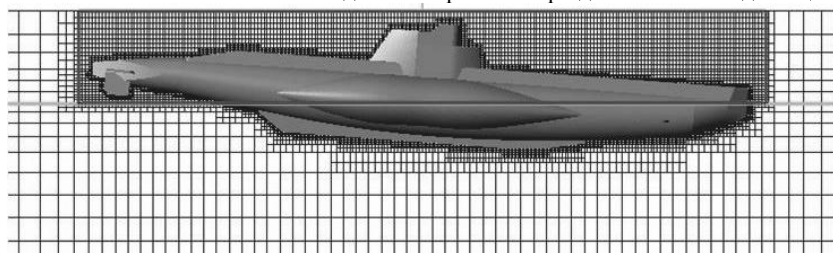


Рис. 9. Дополнительная адаптация в параллелепипеде в зоне всплытия лодки

Но осцилляции силы значительно уменьшились, можно достичь лучшей устойчивости, если увеличить число слоев. Для ответа на возникший вопрос о том, с чем именно связаны осцилляции в этой области и какая из мер принесла наибольший эффект, был проведен численный эксперимент аналогичный последнему, но без дополнительной адаптации по поверхности мелких деталей геометрии. Для исключения эффекта «растягивания» свободной поверхности была произведена дополнительная адаптация (см. рис.9) до второго уровня в области возможного появления свободной поверхности (в параллелепипеде, расположенном в области всплытия лодки).

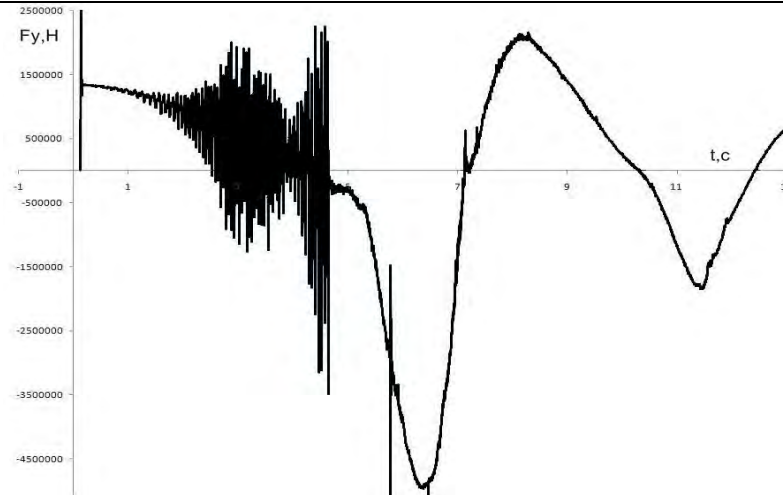


Рис. 10. Вертикальная результирующая сила

Результаты последнего численного эксперимента приведены на рисунке 10. Данный опыт показал, что на интервале времени от 1 до 5 секунд (движение лодки под водой) наибольший вклад в осцилляции вносило недостаточное разрешение мелких деталей геометрии. Уменьшение осцилляций в остальное время движения лодки по сравнению с предыдущим экспериментом объясняется отсутствием эффекта «растягивания» свободной поверхности.

Шаг по времени

В рассматриваемом типе задач рекомендуется задавать шаг по времени через число CFL (Куранта-Фридрихса-Леви). Рекомендуемое значение числа CFL – 1. Если возмущения свободной поверхности носят спокойный характер, допускаются значения CFL до 5, реже до 10.

В ряде случаев, при больших CFL, возникают нефизичные явления, которые бывает непросто обнаружить. Например, в упомянутой ранее задаче стекания тонкого слоя жидкости по наклонной плоскости (истечение происходило с граничного условия «Вход/Выход» при нулевом давлении) при числе CFL равном 10 периодически возникала неестественная волна, становившаяся отчетливо заметной только рядом с выходом из расчетной области. При этом не было признаков неустойчивости или несходимости решения.

Если шаг по времени задан числом CFL, то на первой итерации рассчитанное время будет значительно превышать нормальные величины, необходимо ограничивать предельное значение, иначе на первом шаге тело совершит скачок, спровоцировав сингулярные значения переменных.

В задачах, где подвижное тело резко меняет свою скорость (моментальная остановка, смена направления движения) необходимо во временной окрестности маневра снизить шаг по времени до CFL равного единице. В случае резкой смены направления движения (например, в задаче со стеклоочистительной щеткой, вращение которой задано постоянной угловой скоростью, а смена направления – изменением знака угловой скорости) рекомендуется сделать несколько шагов перед разворотом, зафиксировав положение тела.

Заключение

В настоящее время существует тенденция снижения требуемого уровня знаний для специалистов расчетчиков, работающих с CAE системами, используется разделение труда (создание геометрии, задание расчетной сетки, настройка модели, анализ результатов). Способствует тому и повышение надежности программных пакетов, устойчивости к некорректным действиям пользователей и упрощение интерфейсов. Программный комплекс FlowVision HPC обладает лучшими качествами и рядом know how в этом направлении развития CAE систем, что позволяет получать нормальные результаты без длительной специальной подготовки, глубоких знаний математической модели. Этот факт и приведенные рекомендации по решению задач с подвижными телами и свободной поверхностью помогут быстро приступить к практическому применению FlowVision HPC. В то же время не стоит забывать, что более глубокое понимание гидродинамики и численных методов позволяет находить неординарные решения поставленных задач, сокращая расчетное время и повышая точность получаемых результатов.

Литература

1. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В двух томах. Том 2.- М.; Изд-во «Мир», 1991. – Том.2, 552 с.
2. 50-ая научная конференция МФТИ, Сборник трудов, М., изд. МФТИ, 2007 г.