

Расчетные исследования аэродинамических характеристик и относительного движения возвращаемого аппарата и крышки люка парашютного контейнера в процессе их разделения

К.В. Кузнецов¹, И.В. Москалев¹, А.А. Аксенов¹, А.А. Дядькин², Т.В. Симакова²
¹ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия ²РКК «Энергия» им. С.П. Королева, г. Королев, Россия

В период бурного развития вычислительной техники и программных комплексов численного моделирования, возникает уникальная возможность широкого применения данных средств для разработки современных технических устройств, в частности пилотируемых возвращаемых аппаратов однократного или многоразового использования, удовлетворяющих повышенным требованиям проектирования и эксплуатации.

В данной работе исследуются аэродинамические характеристики и траектории относительного движения возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля и крышки люка парашютного контейнера (КЛПК) в процессе их разделения при различных высотах (6000 и 8000 м) и скоростях полета (0,6М и 0,8М), а также различных пространственных углах атаки и аэродинамических углах крена аппарата при помощи программного комплекса (ПК) вычислительной гидродинамики [FlowVision](#). Целью проведения данной работы является определение аэродинамических сил и моментов, действующих на ВА и КЛПК в процессе разделения, а также выявление наиболее опасных положений ВА с точки зрения его возможного столкновения с КЛПК после разделения.

Возвращаемый аппарат представляет собой усеченный конус со сферическим дном. Габаритные размеры аппарата $D \cdot D \cdot 0.9D$. Крышка люка парашютного контейнера имеет габаритные размеры $L \cdot 0.75L$. Общий вид аппарата с посадочным местом под крышку, а также самой КЛПК в ПК FlowVision представлены на рис. 1.



Рис. 1 - Общий вид ВА (слева) и КЛПК (справа)

Задачи моделирования отделения КЛПК от ВА делятся на 2 основные группы: 1) высота полета 6000 м, число маха 0,6М; 2) высота полета 8000 м, число Маха 0,8М. Так как высоты и скорости существенно различаются, для каждой группы принимаются свои опорные значения температуры и давления, соответствующие давлению невозмущенного воздуха на заданной высоте в соответствии с Международной стандартной атмосферой (МСА). Подобное задание опорных величин позволяет работать непосредственно с избыточным давлением, требуемым в расчете.

Задача определения аэродинамических характеристик возвращаемого аппарата и КЛПК решается в обратной постановке, когда ВА неподвижен в расчетной области. При решении задачи перебираются 30 вариантов - 12 для первой группы, 12 для второй группы, а также по 3 варианта для каждой из групп с учетом силы, действующей на фал вытяжного парашюта.

Расчетная область представляет собой куб со стороной $20 \cdot D$, в центре которого помещены ВА и КЛПК. Для выбора расчетной сетки было проведено исследование сходимости с обтеканием неподвижной КЛПК, находящейся на некотором расстоянии от ВА. В результате данного исследования выяснилось, что наилучшие результаты при решении задач с подвижными телами дает сетка, равномерно разрешенная вокруг поверхности на достаточно большое количество слоев ячеек, а также что начальный участок траектории движения КЛПК вблизи ВА требует адаптации сетки достаточно высокого уровня. Графики сходимости по компонентам полной силы X и Y на КЛПК приведены на рис. 2. Компонента Z принимает околонулевые значения и не показана на данной диаграмме.

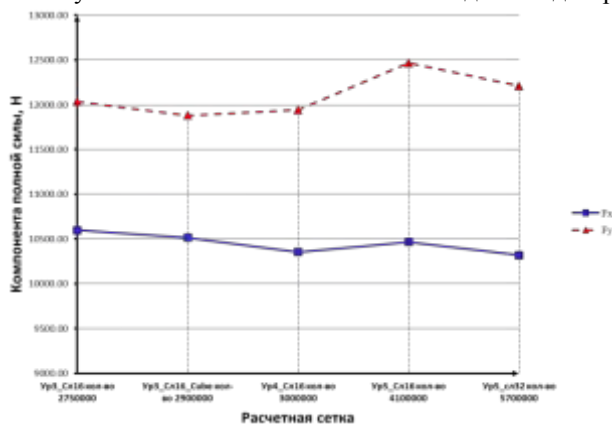


Рис. 2 - Средние значения компонент полной силы в зависимости от расчетной сетки

При решении задачи используется неравномерная расчетная сетка в области и равномерная сетка вокруг аппарата. Из-за разницы между характерным размером аппарата D и характерным размером КЛПК L , а также для разрешения сеткой буртика КЛПК, в расчетной сетке используется адаптация до 3-го уровня вокруг ВА и по поверхности КЛПК. Также используется адаптация до 4-го уровня вблизи ВА на начальном участке движения КЛПК, как наиболее важном.

Общее количество ячеек расчетной сетки, представленной на рис. 3 и рис. 4, составляет 3 100 000 ячеек.

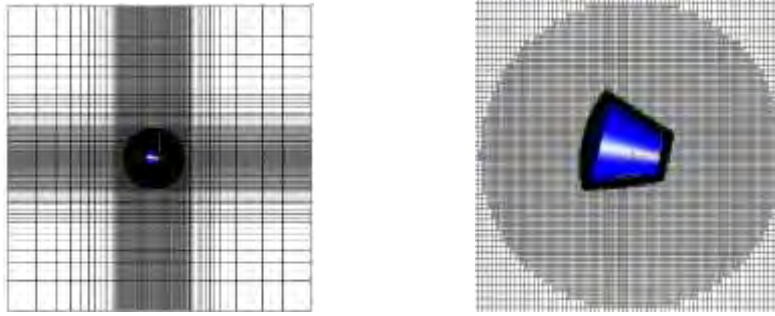


Рис. 3 - Общий вид расчетной сетки (слева) и адаптация вокруг ВА (справа)

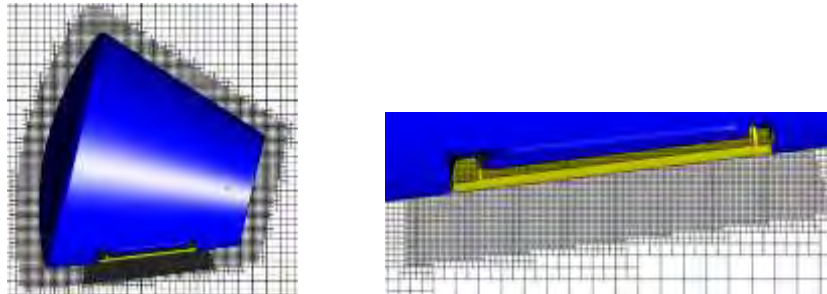
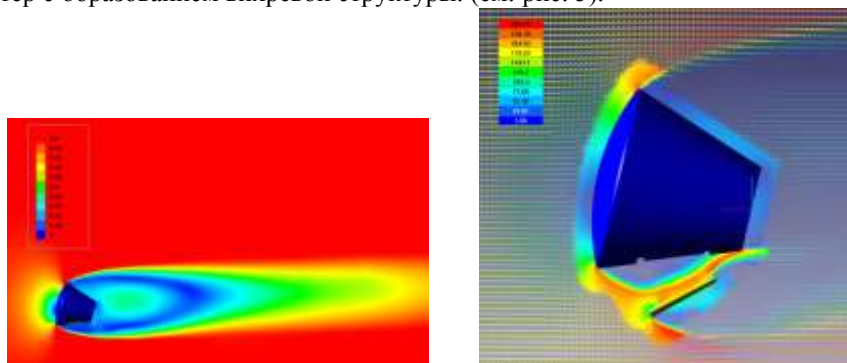


Рис. 4 - Укрупненный вид расчетной сетки вокруг ВА (слева) и адаптация вблизи КЛПК (справа)

Расчет задачи определения аэродинамических характеристик ВА и КЛПК при их отделении проходит в два этапа. Сначала моделируется обтекание аппарата с неподвижной КЛПК набегающим потоком с заданной скоростью при заданном положении объектов, а затем при установлении течения КЛПК приводится в движение. Особенность расчета состоит в том, что течение в спутном следе ВА, а также между ВА и КЛПК в процессе ее отделения носит нестационарный характер с образованием вихревой структуры. (см. рис. 5).



Скалярное поле чисел Маха

Векторное поле скоростей

Рис. 5 - Особенности решения задачи разделения

Так как размер явного шага интегрирования по времени при заданных скоростях набегающего потока и выбранном размере ячеек расчетной сетки составляет порядка $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$ с, то для расчета движения КЛПК требуется достаточно длительное время. Поэтому, для выбора оптимального с точки зрения времени счета и точности результатов шага интегрирования по времени было проведено исследование сходимости в двух вариантах: при неподвижной КЛПК, находящейся на некотором расстоянии от ВА, а также при движущейся крышке (см. рис. 6, рис. 7).

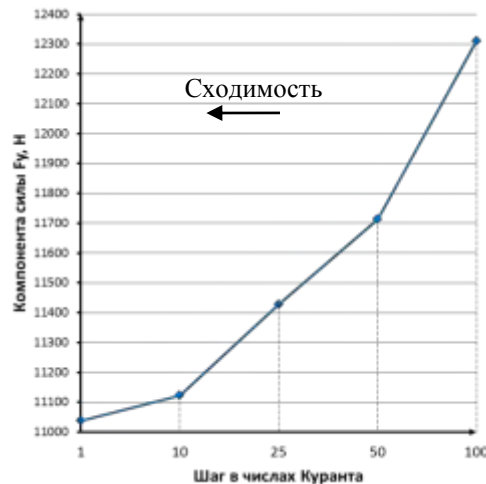


Рис. 6 - Среднее значение компоненты полной силы F_y в зависимости от величины шага по времени при неподвижной КЛПК

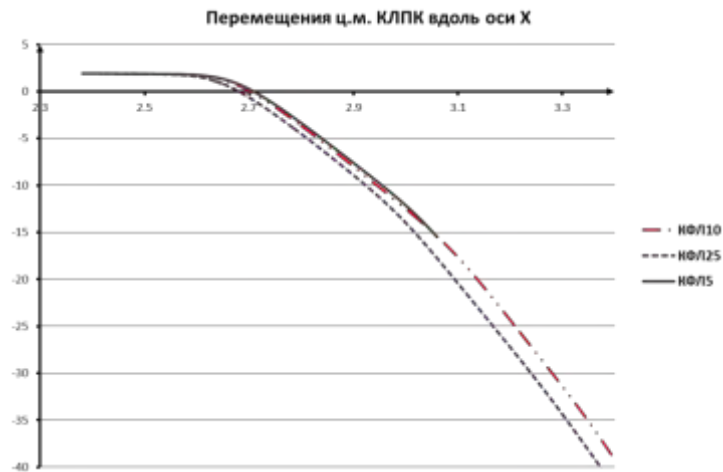


Рис. 7 - Перемещение вдоль оси X центра масс КЛПК при разной величине шага интегрирования

Расчеты показали, что оптимальным с точки зрения соотношения точность/время счета является шаг интегрирования, равный $10 \cdot \Delta t$ (или CFL=10). Стоит отметить, что все вышесказанное относится к так называемому конвективному шагу интегрирования по времени, определяемому исходя из величины скорости потока и минимального размера ячейки. Поверхностный шаг интегрирования по времени, определяемый скоростью движения границы подвижного тела, остается больше конвективного на протяжении всего расчета, так как максимальная скорость КЛПК к моменту вылета из расчетной области составляет 90 м/с, в то время как скорость невозмущенного потока в области составляет 193 м/с.

Начальное движение КЛПК, вызванное действием пиротолкателей, задается при помощи силы, приложенной к центру масс крышки в начальный момент ее отделения, и убывающей согласно линейному закону в зависимости от расстояния.

Расчеты проводились на рабочих станциях компании ТЕСИС (процессоры Core Quad и Intel Core I7 920) и на кластерах РКК Энергия и МГУ в режиме 16 ядер/вариант. Длительность одного расчета отделения КЛПК (без учета предварительной продувки) составляет в среднем около 24 часов.

В ходе проведения расчетов получены аэродинамические силы и моменты, а также соответствующие коэффициенты сил и моментов для ВА и КЛПК. На рис. 8 представлены результаты по аэродинамической продольной силе X_1 КЛПК для первых трех расчетных случаев, отличающихся друг от друга различными пространственными углами атаки ВА.

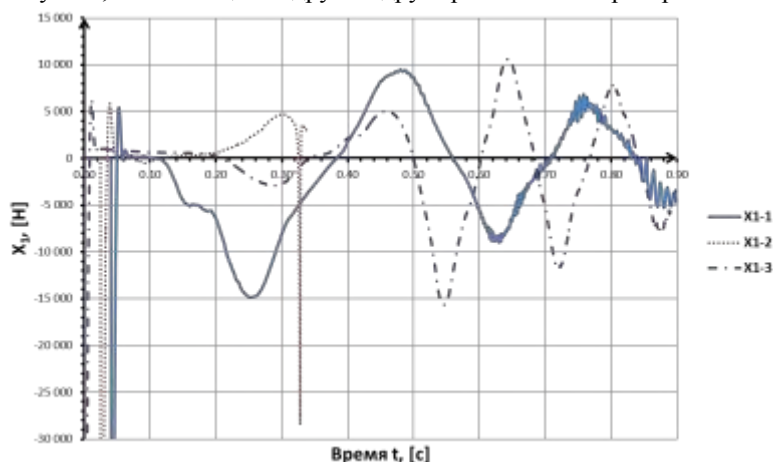


Рис. 8 - Аэродинамическая продольная сила КЛПК

Расчеты показали, что существует опасность столкновения КЛПК в процессе ее отделения от ВА при пространственном угле атаки ВА 43° (расчетный случай №2). Положения КЛПК в процессе движения для первых трех расчетных случаев показаны на рис. 9. Стрелкой показано направление вектора скорости набегающего потока.

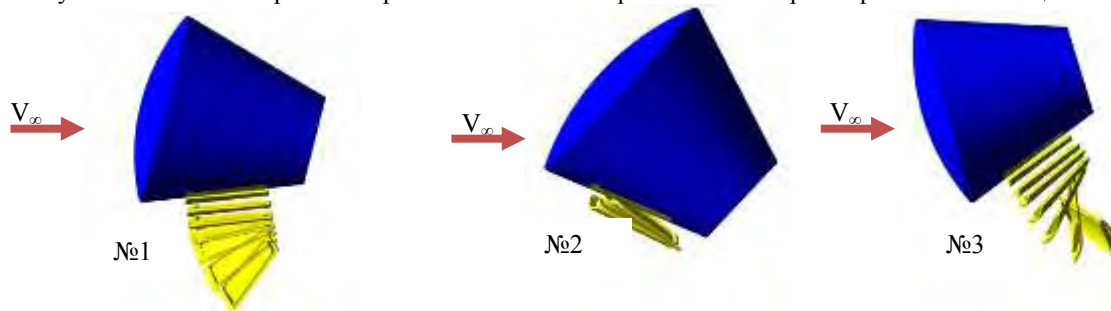


Рис. 9 - Положения КЛПК в разные моменты времени

Зависимость линейной скорости центра масс КЛПК от времени изображена на рис. 10. Данный характер ее изменения обусловлен вращением КЛПК вокруг центра масс. Максимальная скорость, которую достигает КЛПК в момент достижения границ расчетной области, составляет в среднем 80-90 м/с.

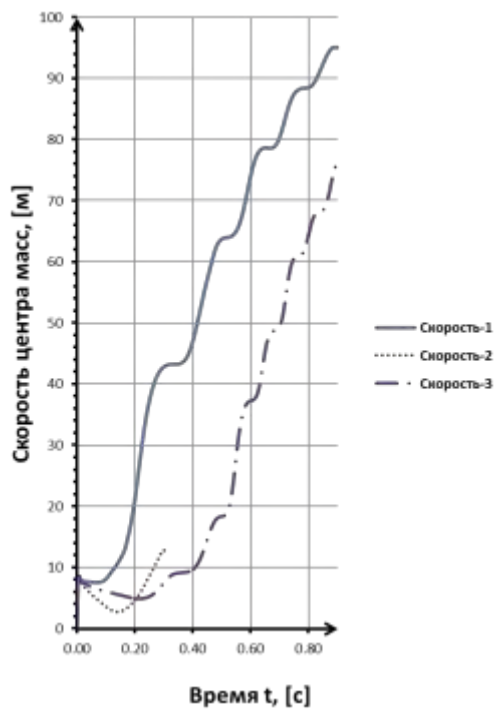


Рис. 10. Зависимость скорости центра масс КЛПК от времени для первых трех расчетных случаев

На графиках аэродинамических продольных сил наблюдаются заметные осцилляции значений на конечном этапе траектории КЛПК. Это обусловлено тем, что при моделировании использовалась неравномерная расчетная сетка, размер ячеек которой увеличивался к границам области.

В заключении следует отметить, что данный спектр задач весьма сложен и трудоемок в расчетах, а результаты расчетов требуют верификации.