

## Математическое моделирование обтекания возвращаемого аппарата

В период активизации развития ракетно-космической отрасли особое значение приобретает применение пилотируемых возвращаемых аппаратов (ВА) однократного или многократного использования. В связи с этим возникает необходимость разработки современных устройств, удовлетворяющим новым требованиям эксплуатации. В ОАО "РКК "Энергия" имени С. П. Королева" ведутся работы по разработке космического корабля нового поколения. Корабль придет на смену "Союзам", которые уже не один десяток лет исправно выводят в космос экипажи орбитальных космических станций. Отличительной чертой нового корабля является увеличенная грузоподъемность (с целью выведения большего количества космонавтов на орбиту), повышенная комфортность, точность приземления и условная многократность (повторное применение корабля в пределах назначенного ресурса).

Данные требования привели к необходимости изменения схемы посадки и отказу от полностью парашютного приземления, характерной особенностью которого является высокая зависимость от ветровой обстановки на участке снижения, что приводит к большим отклонениям от заранее намеченной точки посадки. Взамен предлагается концепция комбинированного приземления с тремя основными этапами: вход в атмосферу и торможение с помощью теплового экрана ВА с его последующим отстрелом; выпуск парашютов ВА и последующее снижение с торможением; отделение парашютов и окончательное торможение и мягкая посадка при помощи твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ).

Высокая степень новизны проекта требует проведения большого объема исследовательских работ, что в современных экономических условиях не является возможным. В связи с этим авторы проекта обратили свой взор на современные средства математического моделирования, которые уже много лет применяются в практике РКК "Энергия". Например, для решения задач модернизации существующей космической техники, а также при расследовании нештатных ситуаций при ее эксплуатации применяется отечественный программный комплекс вычислительной гидродинамики FlowVision, разработанный компанией "ТЕСИС".

Впервые в отечественной практике космической промышленности математическое моделирование применяется для поиска ответов на основные вопросы, которые в дальнейшем подтверждаются или уточняются с помощью экспериментальных стендовых испытаний. Большой раздел исследований посвящен аэродинамике

и газовой динамике как ВА, так и его системы торможения на базе РДТТ, а также взаимодействию реактивных струй с грунтом.

В данной работе исследуются аэродинамические характеристики аппарата на режиме спуска с высоты 1000 м на дозвуковых скоростях с учетом работы посадочной двигательной установки и на малой высоте с учетом взаимодействия струй двигателя с поверхностью Земли. Целью проведения данных работ является определение влияния струй посадочной двигательной установки (ПДУ) на аэродинамические характеристики одного из вариантов возвращаемого аппарата на режимах торможения (спуск с высоты 1000 м до 50 м) и посадки (расстояние между возвращаемым аппаратом и поверхностью составляет от 5 м до 1 м).

Возвращаемый аппарат представляет собой усеченный конус со сферическим экраном – лобовым теплозащитным экраном. Габаритные размеры аппарата  $D \times D \times 0,9D$ . На сферическом экране расположены 16 сопел. Относительный диаметр выходного сечения сопла  $d/D$ , где  $d$  – диаметр выходного сечения сопла,  $D$  – диаметр миделя ВА, составляет 0,0205. Угол наклона оси сопел относительно оси симметрии конуса зависит от конкретного режима торможения и посадки. Схема аппарата представлена на рис. 1.

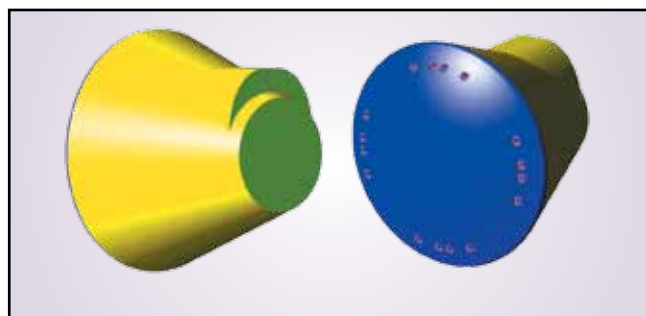


Рис. 1. Возвращаемый аппарат

При моделировании обтекания возвращаемого аппарата исследуются три высоты: 1000, 500 и 50 м. На этих высотах скорость аппарата задана и равна 0,3М, 0,2М и 0,1М соответственно. Так как высоты существенно различаются, для каждой высоты принимаются свои опорные значения температуры и давления, соответствующие давлению невозмущенного воздуха на заданной высоте (данные берутся из справочников). Подобное задание опорных величин позволяет работать непосредственно с избыточным давлением, требуемым в расчете.

Задача определения аэродинамических характеристик возвращаемого аппарата решается в обратной постановке, когда ВА неподвижен в расчетной области. При решении задачи перебираются 36 вариантов – 22 для режима торможения и 14 для участка посадки. Для участка торможения решаются задачи обтекания аппарата с двумя углами атаки  $0^\circ$  и  $10^\circ$  без учета струй на различных высотах, с учетом влияния струй, с учетом разнотяговости сопел и с использованием вместо рабочего тела сопел холодного воздуха. Для участка посадки рассчитываются варианты для положения возвращаемого аппарата на расстояниях 5 м и 1 м от поверхности с различными углами тангажа ( $0^\circ$  и  $10^\circ$ ), с разнотяговостью и различной формой посадочной поверхности.

При решении задачи используется неравномерная расчетная сетка в области и равномерная сетка вокруг аппарата. Из-за большой разницы между характерным размером аппарата  $D$  и характерным размером сопла (0,0205D) в расчетной сетке используется адаптация до 5 уровня внутри сопел посадочной установки. Также используется адаптация в предполагаемом следе от струй и вблизи аппарата. Всего расчетная сетка составляет 1 100 000 – 1 500 000 ячеек (в зависимости от расчетного режима). Расчетная сетка представлена на рис. 2.

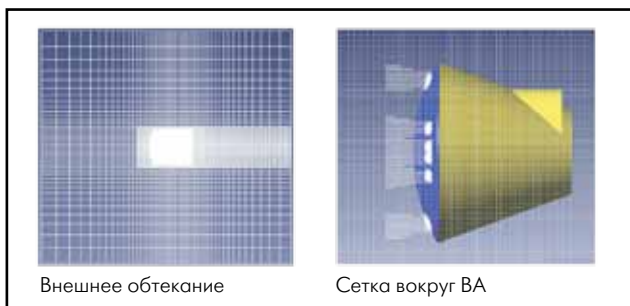


Рис. 2. Расчетная сетка для режима торможения

Расчет задачи определения аэродинамических характеристик на участке торможения проходит в два этапа. Сначала моделируется обтекание аппарата набегающим потоком с заданной скоростью, а затем при установлении течения включается подача газа из сопел. Особенность расчета состоит в том, что течение в спутном следе носит нестационарный характер с образованием крупномасштабной вихревой структуры (рис. 3). График изменения среднего давления на возвращаемом аппарате от времени также носит периодический характер.

Для задачи расчета внешнего обтекания аппарата без учета сопел период колебаний составляет от 0,1 до 1 с, а для истечения продуктов сгорания или воздуха из

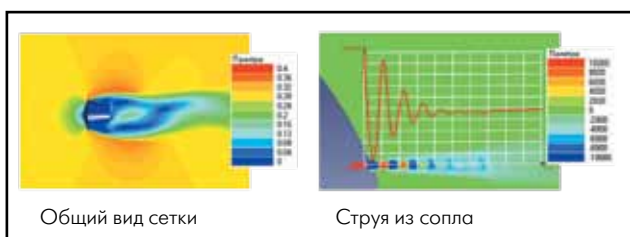


Рис. 3. Особенности решения задачи торможения

сопел период колебаний имеет порядок  $1 \cdot 10^{-3}$  с. Скорость истечения из сопел имеет порядок 3М, а размер ячеек мал, вследствие чего явный шаг интегрирования составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  с. Несмотря на то, что расчетная схема позволяет считать сверхзвуковые задачи с CFL = 10 (Courant-Friedrichs-Lewy condition, число Куранта), для решения такой задачи требуется произвести большое количество итераций, прежде чем задача выйдет на установившийся режим. Таким образом, для моделирования режима торможения требуется около 1 месяца расчетного времени на каждый расчетный случай. Для моделирования режима посадки из-за отсутствия внешнего обтекания время расчета составляет около 2-3 недель. Расчеты проводились на рабочих станциях компании "ТЕСИС" (процессоры Core Quad и Intel Core i7 920), на кластерах РКК "Энергия", кластере ТТИ ЮФУ (Таганрог) и кластере МГУ "Ломоносов" (Москва) в режиме 4-8 ядер/вариант или 32-128 ядер/вариант.

При включении ПДУ коэффициент аэродинамической продольной силы ВА, определяемый распределением давления по наружной поверхности корпуса (за исключением поверхности сопел), падает по сравнению с вариантом обтекания без струй. Эжектирующее влияние струй обуславливает понижение давления прежде всего на лобовом теплозащитном экране. При изменении скорости набегающего потока изменяется характер взаимодействия струй с набегающим потоком (рис. 4).

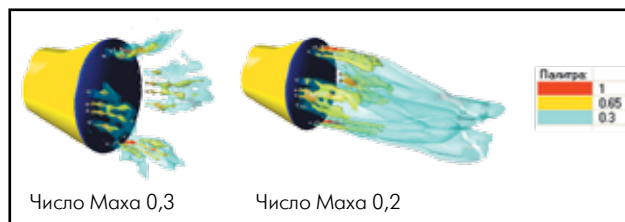


Рис. 4. Изменение структуры течения около ВА при взаимодействии струй ПДУ с набегающим потоком при уменьшении числа Маха

При этом коэффициент продольной силы для высоты 1000 м (число Маха набегающего потока равно 0,3) составляет 0,39, что в два раза меньше коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  для аппарата с выключенной двигательной установкой. Для высоты 500 м (скорость полета 0,2 М) коэффициент продольной силы ВА с включенной ДУ составляет минус 0,75 (рис. 5). Отрицательный коэффициент  $C_x$  реализуется в результате смыкания струй на некотором расстоянии от поверхности аппарата и образованием области пониженно-

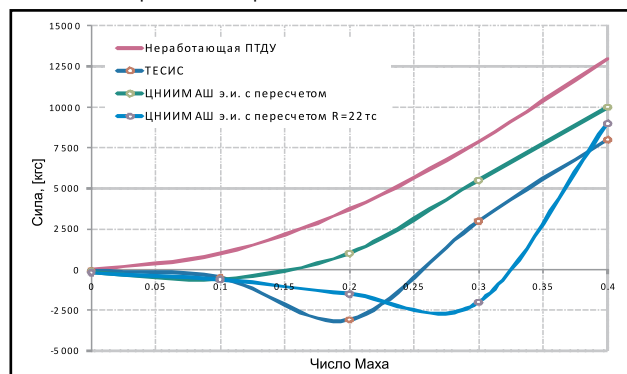


Рис. 5. Изменение силы сопротивления в зависимости от скорости ВА

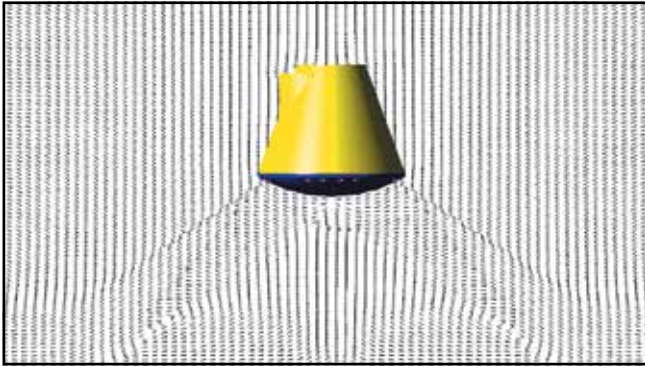


Рис. 6. Структура течения при посадке ВА с углом между осями сопел 50°

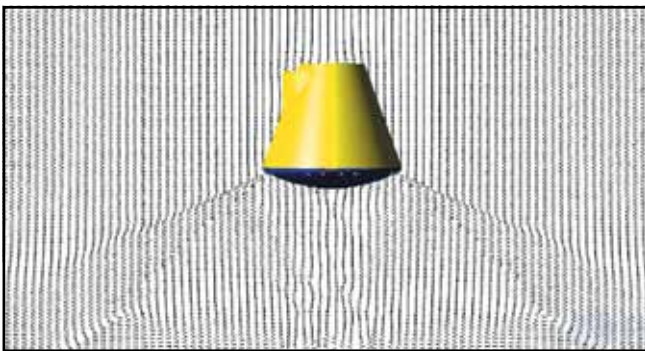


Рис. 7. Структура течения при посадке ВА с углом между осями сопел 60°

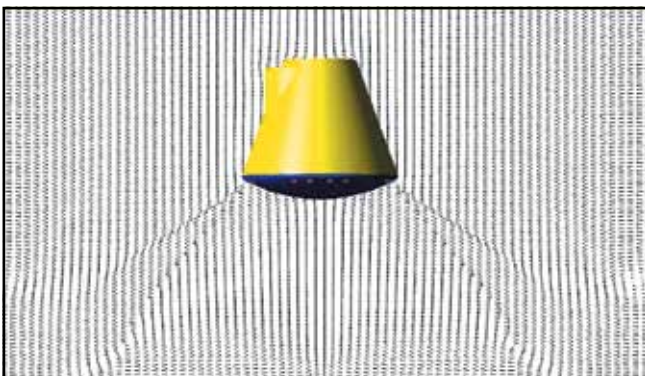


Рис. 8. Структура течения при посадке ВА с углом между осями сопел 50° с модельной ПТДУ

го, по сравнению с атмосферным, давления перед лобовым экраном.

Главной целью изучения режима посадки являются три аспекта. Во-первых, это нагрузка на неподготовленную посадочную площадку для оценки эрозии грунта при воздействии струй ВА. Во-вторых, определение возмущающих газодинамических сил и моментов для исследования динамики поведения ВА на посадочном режиме. В-третьих, выявление возвратных токов в сторону лобового экрана для оценки вероятности его загрязнения.

В рамках исследования сравниваются аппараты с углом между осями сопел 50° и 60°. При истечении из ВА с углом наклона сопел ПТДУ 50° в плоскости симметрии ВА образуется течение от земли к лобовому теплозащитному экрану (рис. 6). При приземлении ВА с углом наклона сопел ПТДУ 60° такого выраженного возвратного течения нет (рис. 7). При этом максимальные нагрузки на грунт не превышают 1000 Па изб. в обоих случаях при расстоянии от нижней точки ВА до грунта 5 м.

Особым вопросом при расчете задач подобного

класса стоит верификация гидродинамических расчетов и пересчет экспериментальных данных на натурные условия. Особо следует отметить, что при использовании модельной ПТДУ, для которой угол наклона сопел составляет 50°, картина течения отличается от натурной. В данном примере перед лобовым экраном ВА не возникает обратных токов, которые могут вызвать загрязнение его поверхности, с расположенной на ней датчиками (рис. 8).

Для сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными по воздействиям на посадочную поверхность проведены расчеты для модели, испытанной в ИТПМ СО РАН (рис. 9). Размеры модели ВА отличаются от размеров натурального изделия в 15 раз.

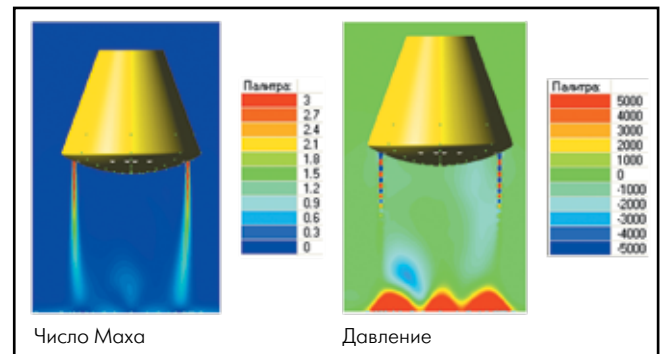


Рис. 9. Истечение из модели ВА

В результате сравнения были получены графики изменения давления по поверхности аппарата и поверхности земли (рис. 10 и 11).

Из графиков видно, что несмотря на неполное совпадение, данные FlowVision и опытные данные повторяют общую картину течения как на поверхности ВА, так и на посадочной поверхности.

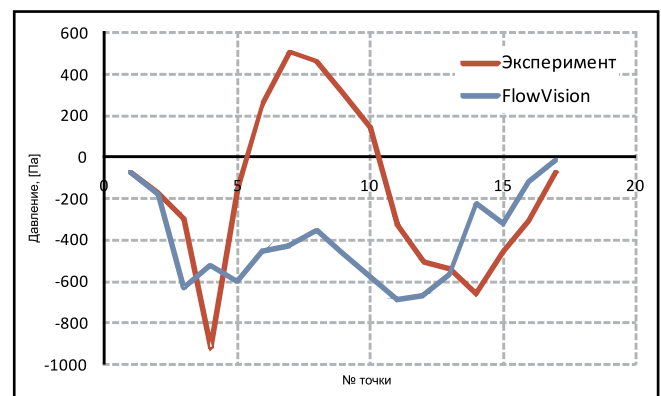


Рис. 10. Распределение давления по поверхности ВА

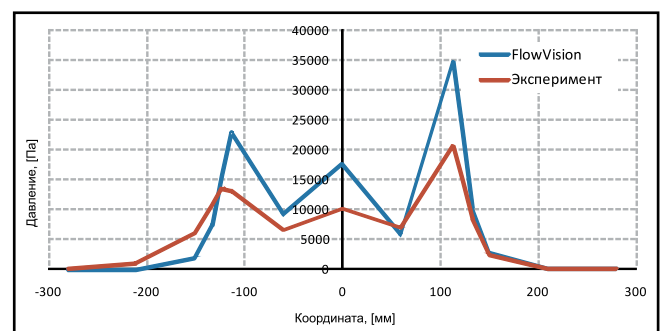


Рис. 11. Распределение давление по посадочной поверхности

Подводя итоги, отметим, что при работе ПТДУ коэффицент продольной силы ВА уменьшается, что обусловлено эжектирующим влиянием струй и уменьшением давления на лобовую сферическую поверхность ВА. С уменьшением числа Маха набегающего потока влияние струй возрастает, в результате чего продольная сила ВА меняет знак.

При пересчете с модельных испытаний на натурные условия необходимо обратить внимание на изменение структуры течения на посадочном режиме около модели ВА с имитацией струй с истечением холодного воздуха по сравнению с картиной течения около ВА с горячими струями двигательной установки.

Следует отметить, что результаты расчетов неплохо согласуются с результатами модельных экспериментальных исследований при условии корректной постановки математической и экспериментальной задачи.

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

В настоящее время продолжают расчеты по остальным расчетным случаям посадки ВА на грунтовое основание. В общей сложности суммарное машинное время уже достигло 400 суток за последние два года. Возможность задействовать современные высокопроизводительные суперкомпьютеры, которые введены в строй в разных частях России, является большим подспорьем при разработке новой перспективной космической техники.

**А. А. Дядькин, В. П. Сухоруков,  
ОАО "РКК "Энергия" имени С. П. Королева",  
М. К. Михайлова, А. Е. Щеляев,  
компания "ТЕСИС"**

## НОВОСТИ

### Autodesk Cloud расширяет возможности работы с проектными данными

Компания Autodesk представляет Autodesk Cloud – набор web-служб и продуктов, которые повышают мобильность, обеспечивают новые возможности просмотра данных и обмена ими, а также открывают доступ к большим вычислительным мощностям. Все это позволяет повысить качество проектирования, визуализации, инженерных расчетов и анализа. Кроме того, участникам программы "Подписка Autodesk" предоставляется эксклюзивный доступ к высокопроизводительным услугам на основе технологии "облачных" вычислений, таким как рендеринг, оптимизация проектов и расширенные возможности совместной работы.

Компания Autodesk стала пионером в области разработки приложений на основе "облачных" технологий, выпустив более десяти лет назад web-службу Buzzsaw. Сейчас под общим названием Autodesk Cloud пользователям доступны свыше десятка подобных приложений, таких как Autodesk Cloud Documents, AutoCAD WS и Autodesk Design Review.

Они позволяют хранить данные в "облаке", обмениваться ими и получать доступ к ним из любой точки земного шара, даже не имея доступа ни к одной САПР Autodesk. AutoCAD WS и мобильное приложение Autodesk Design Review можно найти на сайте iOS App Store.

Дополнительные службы на основе "облачных" вычислений, доступные только по "Подписке Autodesk", предоставляют дизайнерам, инженерам и специалистам по компьютерной графике новые передовые возможности, такие как высокопроизводительная 3D-визуализация, совместная работа с данными, комплексные инженерные расчеты и анализ. Отпадает необходимость обращаться за этим в специализированные вычислительные центры, услуги которых обходятся чересчур дорого. На каждую лицензию с "Подпиской Autodesk" выделяется по 3 Гб для хранения данных, что позволяет в любой момент времени иметь надежный доступ к проектной документации вне зависимости от того, где находится пользователь.

Помимо новых услуг Autodesk Cloud, подписчикам Autodesk по-прежнему

предоставляются новейшие версии программного обеспечения, техническая поддержка по Интернету и гибкие условия лицензирования – все, что необходимо клиентам для достижения преимуществ перед конкурентами. Доступ к новым услугам на основе "облачных" технологий осуществляется непосредственно из приложений Autodesk или через Центр Подписки.

### MES OptiVision на Сегежском ЦБК

В августе на ОАО "Сегежский ЦБК" была запущена в промышленную эксплуатацию первая очередь системы класса MES – OptiVision компании Honeywell. Программно-аппаратный комплекс системы управления производством OptiVision специально предназначен для нужд предприятий целлюлозно-бумажной промышленности и предусматривает полный комплекс средств обработки заказов, отслеживания производства, формирования маршрутов, оптимизации производства и транспортировки, консолидации данных о качестве выпускаемой продукции и выдачи разнообразных производственных отчетов.

OptiVision интегрирована с существующей на предприятии ERP-системой 1С и системой АСУ ТП MetsoDNA, а также системой управления упаковкой и транспортировкой рулонов производства фирмы Saimatec. Благодаря этой интеграции все системы получают необходимую для их нормальной работы информацию в автоматическом режиме. 1С получает данные о движении продукции и полуфабрикатов по каждому этапу выпуска бумаги. На основании данных, поступающих из 1С, и данных о фактическом выпуске продукции система OptiVision позволяет осуществлять планирование в строгом соответствии с поступившими заказами и учетом реалий производства. Данные о качестве произведенной бумаги и данные о работе бумагоделательной машины передаются из MetsoDNA. Система учитывает каждое изменение ассортимента и качества продукции, обеспечивая полную прослеживаемость выпуска и управляя направлением движения готовой продукции.

Под контролем OptiVision производится автоматическое взвешивание, упаковывание, управление транспортировкой рулонов, печать маркировки на торце рулона, печать этикеток.