

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ X-43 И X-51A

М.А. Котов

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

### Аннотация

Доклад посвящен различным способам создания сложных моделей поверхностей перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. Рассмотрены возможности систем автоматизированного проектирования в моделировании трехмерных объектов. Приведены примеры построения моделей гиперзвуковых летательных аппаратов X-43, Waverider и X-51A. Приведены примеры построения расчетных сеток поверхностей трехмерных моделей.

### GEOMETRIC MODELING OF SURFACES OF HYPERSONIC AIRCRAFT X-43 AND X-51A

М.А. Kotov

*Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526*

The report focuses on various ways to create complex surface models of promising hypersonic vehicles. The possibilities of computer-aided design in the simulation of three-dimensional objects. The examples of modeling hypersonic aircraft X-43, Waverider and X-51A. Ways of creation of complex models of surfaces of hypersonic flying devices are considered. Examples of the construction of computational grids surfaces of three-dimensional models.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка летательных аппаратов, двигающихся со сверхзвуковыми и гиперзвуковыми скоростями в атмосфере планет солнечной системы, приводит к необходимости проведения сложных численных исследований, в которых важную роль играет умение создавать геометрические модели внешней поверхности аэрокосмической техники. Однако, проведение реальных физических экспериментов в этой области отличается высокой стоимостью и сопряжено со множеством технологических трудностей. Поэтому большое значение для оптимизации поверхности летального аппарата имеет многомерное численное моделирование теплофизических процессов (тепловые и радиационные потоки), которые протекают вблизи поверхности гиперзвукового летательного аппарата. В данной работе ставилась и решалась задача создания трехмерных моделей поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов (X-43, Waverider [1], X-51A). Усложняющей особенностью в построении геометрической модели таких летательных аппаратов является учет создания многосвязных областей и сопряжений между элементами поверхности для последующего построения расчетных сеток нужного качества. Создание сложной модели поверхности таким способом представляет собой достаточно медленный и трудоемкий процесс.

## 2. СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе геометрического моделирования важно устранение ошибок и неточностей. Это, как правило, достигается это путем создания и редактирования отдельных деталей и определения характера их взаимосвязи в собранном виде. Широкое распространение получил способ создания трехмерных геометрических моделей с помощью так называемого «прозрачного

ящика». Поместив модель внутрь прозрачного ящика и спроецировав ее на три ортогональные плоскости получают три двухмерные проекции, которые описывают форму трехмерной модели (рис.1).

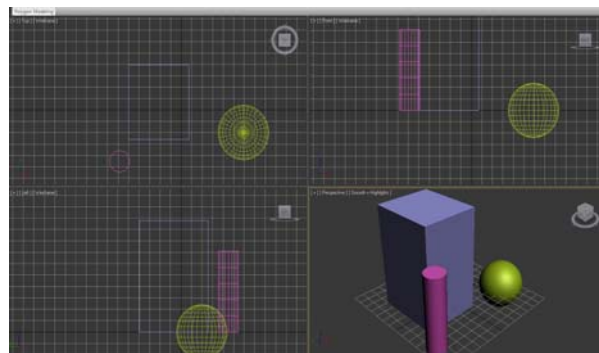


Рис. 1. Прimitives модели в 3ds max

Этот процесс обратим: нарисуем проекции воображаемой модели на трех ортогональных плоскостях. С помощью двумерного редактирования полученных проекций составляется их общее решение, которое сформирует нужную модель. Подобный алгоритм используется многими программами трехмерного моделирования (например, AutoCAD, 3ds max).

Основной недостаток описанного подхода к моделированию заключается в том, что полученная таким образом модель с большим трудом поддается редактированию. При готовом общем решении можно только создать новые, или сделать все заново. Создание сложной модели с помощью таких действий занимает много времени, поскольку после каждого двухмерного изменения приходится отслеживать трехмерный вид и учитывать проблемы сопряжения конструкции и размеров деталей (в том числе, возможные несостыковки

элементов). Кроме того, каждая новая итерация создания модели добавляется к операциям, сделанным ранее, увеличивая, тем самым, размер документа модели.

Существует другой подход в трехмерном моделировании, который повторяет реальный технологический процесс изготовления детали: подбираются соответствующие инструменты и последовательность их применения. На передний план выходит не форма модели, а замысел проекта, т.е. последовательность выполняемых действий. Этот подход к моделированию использует САПР SolidWorks

### 3. САПР SOLIDWORKS

SolidWorks — это система автоматизированного проектирования, которая предназначена для моделирования деталей и сборок в трехмерном пространстве с возможностью проведения различных видов экспресс-анализа, а также оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД (Единая система конструкторской документации). Система использует графический интерфейс Microsoft Windows.

Процесс построения модели основывается на создании элементарных геометрических примитивов и выполнении различных операций между ними. Модель набирается из стандартных элементов и может быть отредактирована путем либо добавления/удаления этих элементов, либо изменения характерных параметров элементов. В процессе моделирования создается не деталь, а алгоритм (последовательность операций) ее создания. Таким образом, задаются размеры и геометрические взаимосвязи между элементами, которые определяют форму конкретной детали.

Двунаправленные ассоциативные взаимосвязи между деталями, сборками и их чертежами в SolidWorks гарантируют соответствие модели и чертежа, т.е. все изменения, сделанные в детали, автоматически передаются связанную с ней сборку и чертеж. Библиотека материалов SolidWorks позволяет определять материал детали для массовых характеристик, спецификаций и последующих расчетов и анализов в приложениях COSMOSXpress или COSMOSWorks, которые входят в состав системы.

В SolidWorks имеются средства конвертации и сохранения в форматах, которые доступны для открытия и изменения в других программах моделирования (3ds max, AutoCAD и т.д.).

#### 3.1. Процесс построения трехмерной модели

Процесс моделирования начинается с выбора плоскости и создания эскиза или поперечного сечения. Затем эскиз при помощи определенного конструктивного элемента приобретает трехмерный вид (рис.2). Для создания элемента необходимо, чтобы контуры эскиза были замкнуты.

При создании трехмерного тела эскизы могут быть вытянуты, повернуты, рассечены сложным образом, смещены по контуру. Так, например, для создания формы, изображенной на рис.3, следует определить несколько плоскостей, на поверхности которых строятся эскизы приблизительного вида поперечных сечений аппарата. При задании новых плоскостей необходимо указать их взаимосвязи с уже имеющимися элементами модели.

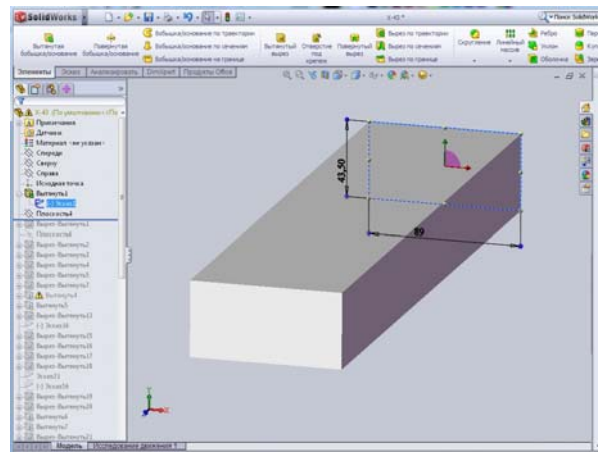


Рис. 2. Вытянутый элемент

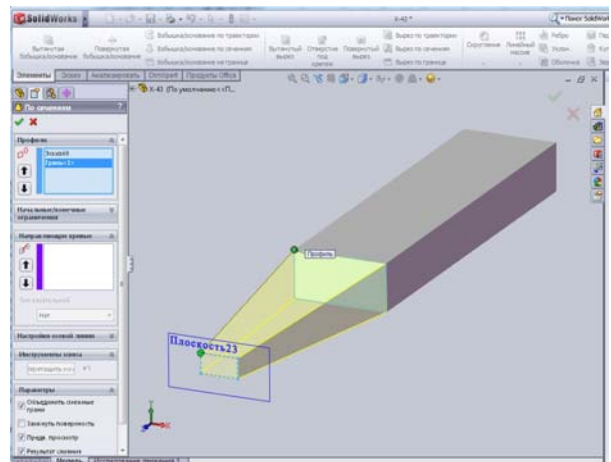


Рис. 3. Вытянутый по сечениям элемент

Для успешного сопряжения вытянутых по сечению элементов необходимо, чтобы определяющие эскизы имели схожие контуры и одинаковое количество граней. После этого создается трехмерная форма путем «вытягивания» сечения вдоль соответствующего направления.

Для создания новых граней, сглаживания/срезания имеющихся, удаления лишней геометрии модели применяется элемент «вытянутый вырез» (рис.4). Его определение похоже на элементы вытягивания: выбирается плоскость, на которой рисуется эскиз и задаются параметры выреза.

С помощью описанных способов можно создать предварительную геометрическую модель гиперзвукового летательного аппарата, которая показана на рис.5.

Как видно из рис.5, форма модели содержит большое количество острых кромок и углов. При обтекании сверхзвуковым потоком газа эти элементы служат источниками возвратно-вихревых зон, вследствие чего образуется дополнительное ударно-волновое сопротивление. Также при создании расчетных сеток на такой поверхности могут возникать конфликты сопряжения (при грубых углах или пустых провалах между элементами модели сетка может не строиться)

Для устранения этой проблемы элементы формы созданной модели (рис.5) необходимо сгладить. Для этого используется элемент «Скругление» (рис. 6). В параметрах интерфейса элемента указываются способ скругления, линии или грани, а также радиус скругления.

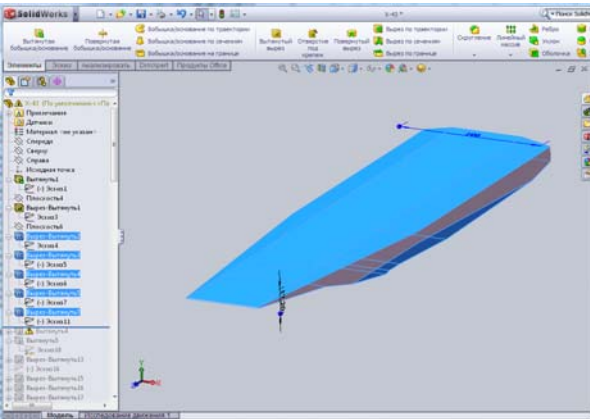
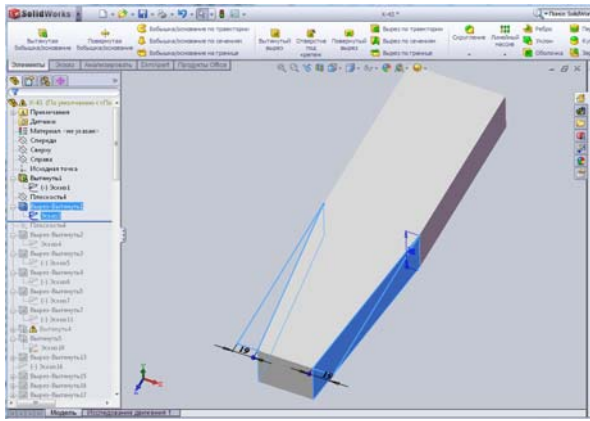


Рис. 4. Вытянутый вырез

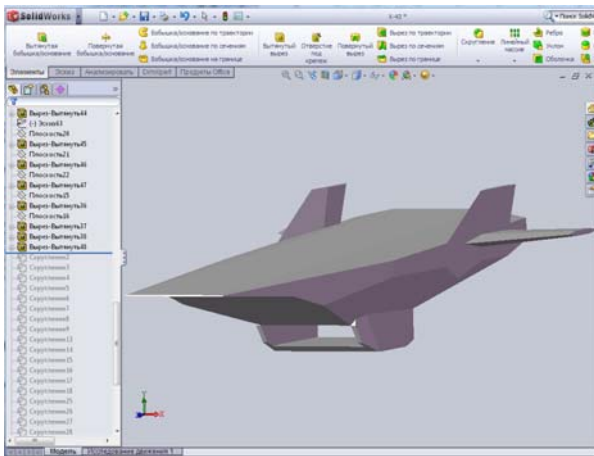


Рис. 5. Предварительный вариант модели

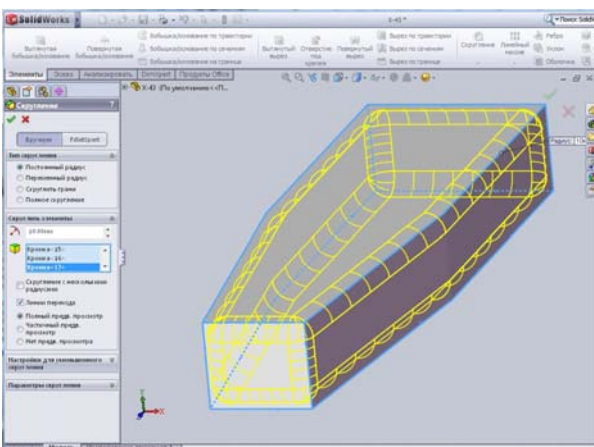


Рис. 6. Скругление

С помощью этого элемента скругляются нужные места в имеющейся трехмерной форме и создается окончательный вариант геометрической модели.

#### 4. ТРЕХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ГЛА

##### 4.1. Геометрическая модель беспилотного гиперзвукового летательного аппарата Х-43 с гиперзвуковым воздушно-реактивным двигателем (ГПВРД)

Х-43 – беспилотный экспериментальный гиперзвуковой летательный аппарат, построенный по программе NASA «Нурег-Х» – разработка самолёта с прямоточным реактивным двигателем. В начале 2000-х были проведены экспериментальные полеты этого аппарата.

В САПР SolidWorks с использованием вышеперечисленных действий моделирования была построена модель поверхности, приближенно соответствующая форме поверхности гиперзвукового летательного аппарата Х-43 (рис. 7).

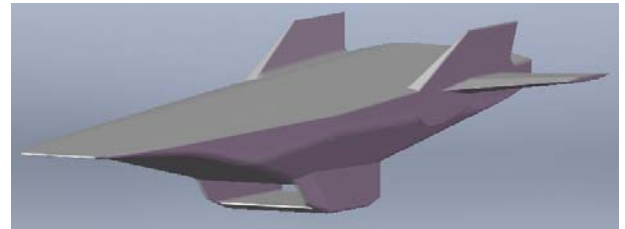


Рис. 7. Общий вид геометрии гиперзвукового летательного аппарата Х-43

Эта форма поверхности гиперзвукового летательного аппарата Х-43 в дальнейшем была использована для проведения трехмерных термоаэродинамических расчетов течения сжимаемого газа. Ниже представлены несколько стандартных видов построенной модели поверхности аппарата Х-43 (рис. 8–11).

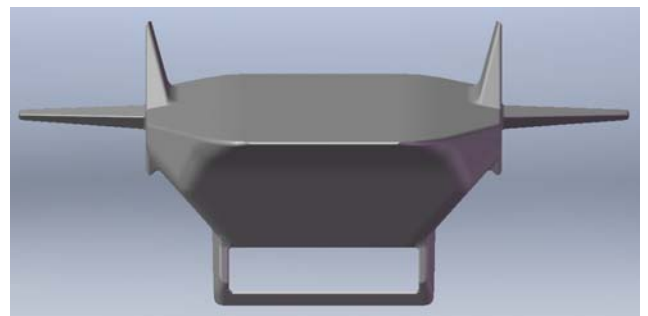


Рис. 8. Вид спереди

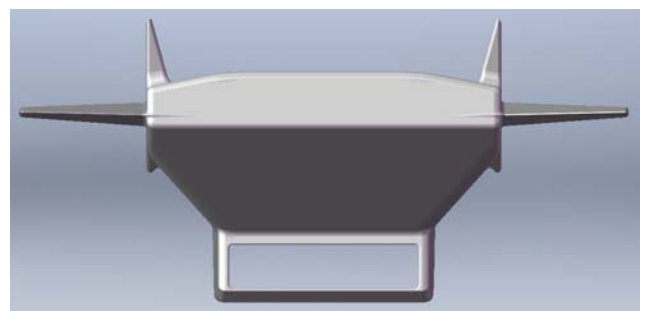


Рис. 9. Вид сзади

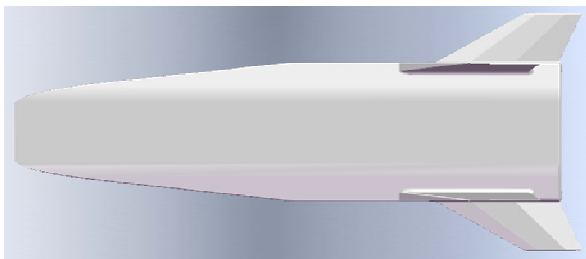


Рис. 10. Вид сверху

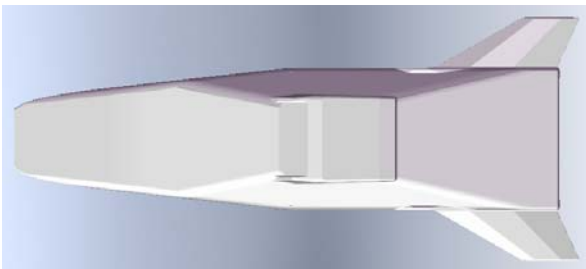


Рис. 11. Вид снизу

Модель имеет стреловидные формы хвостового оперения. Грани рулей поворота, которые находятся под углом с внутренней стороны, с внешней стороны параллельны и имеют продолжение на нижних поверхностях модели (рис. 8, 9). Относительно поперечной оси верхние и нижние грани рулей высоты находятся под симметричным углом. По продольной оси модель имеет одинаковые входное и выходное отверстия воздушно-реактивного двигателя (рис. 8, 9).

Для оценки влияния на тяговые характеристики хвостовой части аппарата X-43 были построены 3 варианта модели. Эти варианты различаются величиной угла наклона плоскости, примыкающей к кромке выходного сечения ГПВРД (рис. 12).

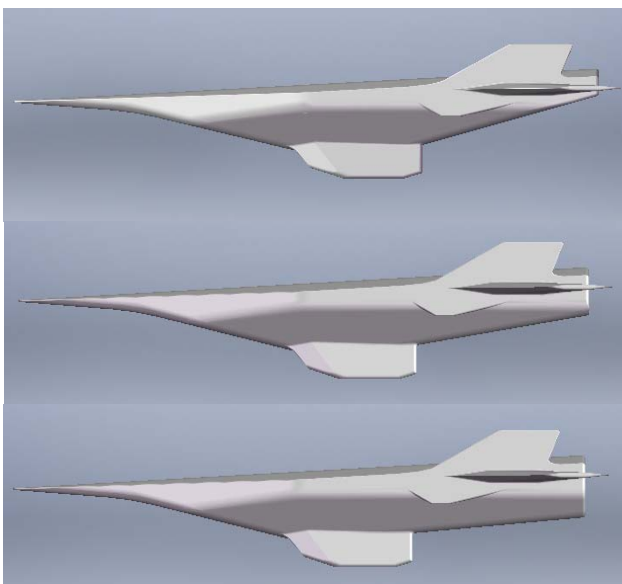


Рис. 12. Три варианта модели гиперзвукового летательного аппарата X-43. Вид справа

Данные варианты модели с различной задней нижней поверхностью аппарата позволяют оптимизировать влияние вытекающей из ГПВРД догорающей

смеси топлива и окружающего воздуха на силовые характеристики гиперзвукового аппарата X-43.

#### 4.2. Способы построения сложных поверхностей модели гиперзвукового аппарата Waverider

Представленные выше формы поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов имеют планер самолетного типа. Для создания безотрывного характера течения внешнего воздушного газового потока необходимо построить модель гиперзвукового аппарата с малым количеством ортогональных плоскостей и граней и с более обтекаемой геометрией внешней поверхности.

Процесс построения таких моделей гиперзвуковых аппаратов аналогичен порядку действий, которые использовались при построении модели аппарата X-43. Однако для проведения нужных операций здесь необходимо учитывать нетривиальные заданные визуальные условия, которым должна удовлетворять готовая трехмерная модель (минимум граней и сложная форма выпуклости каждой из них для лучшей обтекаемости).

В качестве основы для создания эскиза гиперзвукового аппарата Waverider была выбрана плоскость, параллельная оси аппарата, в которой в качестве контура аппарата Waverider была выбрана парабола. Затем “парабола” была вытянута в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза. В результате выполненных действий приближенная форма аппарата Waverider приобретает трехмерный вид (рис. 13).

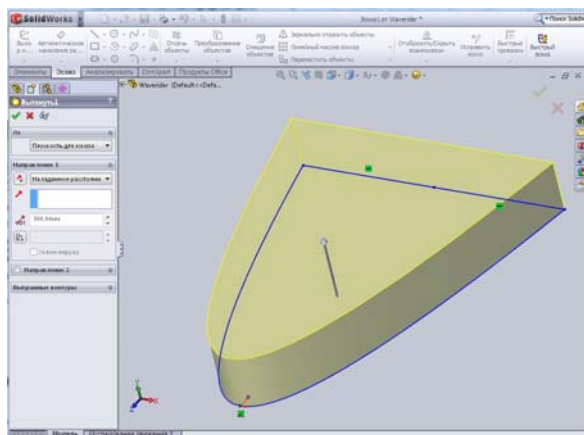


Рис. 13. Трехмерный вид эскиза гиперзвукового аппарата Waverider

Для построения симметрично-выпуклой верхней поверхности модели аппарата Waverider в плоскости, перпендикулярной оси системы, создается эскиз параболической кривой, путем вытягивания которой вдоль оси аппарата и отсекания (используется интерфейс выреза) верхней поверхности (рис.14) формируется верхняя часть модели поверхности гиперзвукового аппарата.

Таким же образом строится выпуклая нижняя поверхность гиперзвукового аппарата Waverider. Но поскольку эта поверхность должна находиться под наклоном к горизонту, в интерфейсе свойств выреза задается нужное значение угла наклона (рис.15,16).

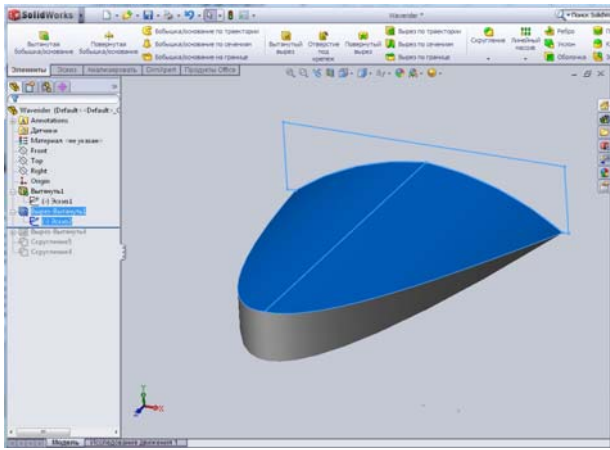


Рис. 14. Вытянутый вырез гиперзвукового аппарата Waverider

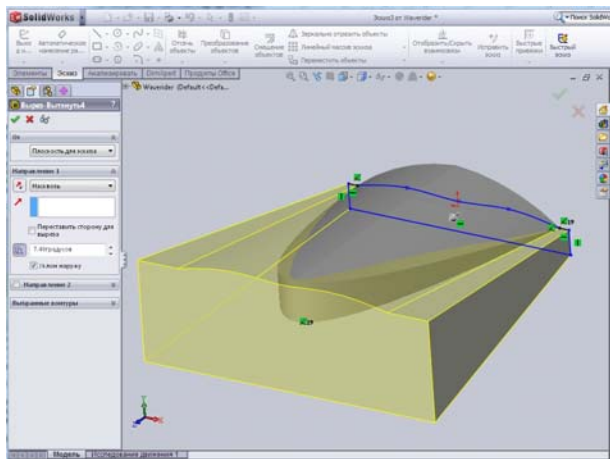


Рис. 15. Создание нижней поверхности гиперзвукового аппарата Waverider

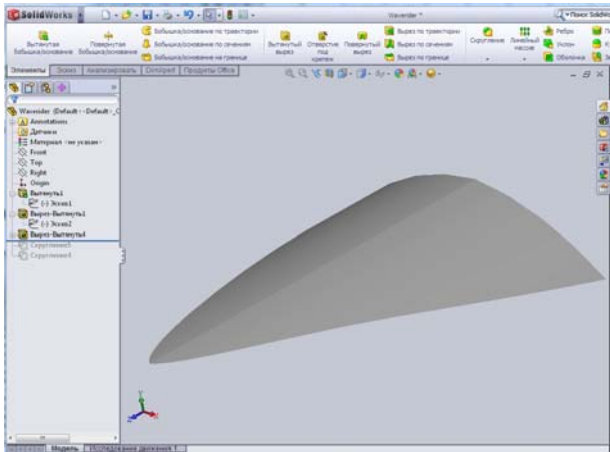


Рис. 16. Предварительный вариант модели поверхности гиперзвукового аппарата Waverider

Для придания модели гиперзвукового аппарата Waverider лучшей обтекаемости (см. обсуждение, которое приведено выше) используются операция скругления. Поскольку эскизы, которые использовались для вытянутых вырезов, имеют плавные контуры, то и поверхности, построенные с помощью этих элементов, имеют сглаженные формы. По этой причине операцию скругления необходимо применить только к носовой части и к граням модели гиперзвукового аппарата Waverider. После чего создается окончательный вариант

поверхности гиперзвукового аппарата типа Waverider (рис. 17).

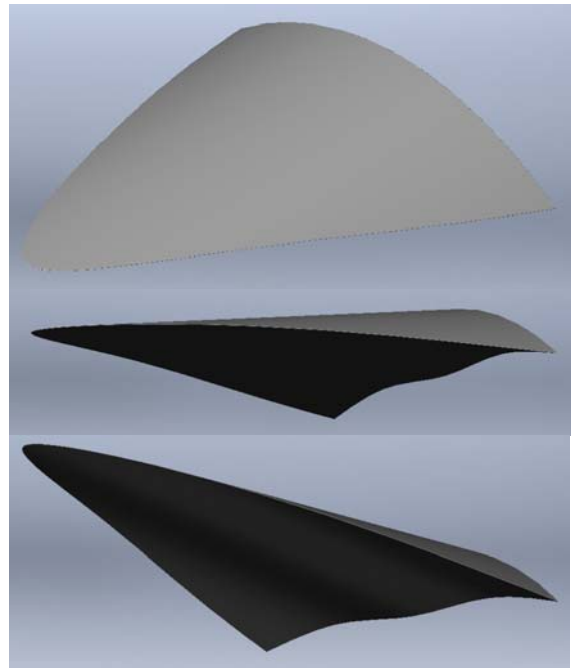


Рис. 17. Общие виды модели гиперзвукового аппарата Waverider

Ниже представлены несколько стандартных видов модели (рис. 18–20).



Рис. 18. Вид спереди гиперзвукового аппарата Waverider

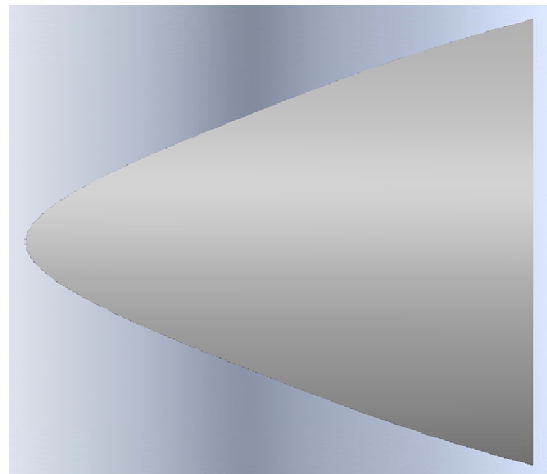


Рис. 19. Вид сверху гиперзвукового аппарата Waverider

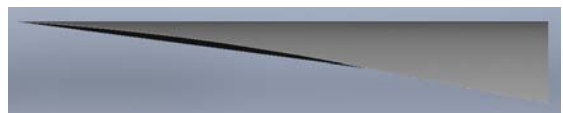


Рис. 20. Вид справа гиперзвукового аппарата Waverider

Необходимо отметить, что при построении таких сложносопряженных форм и участков модели конечных решений может быть несколько. Надо учитывать специфику элементов и очередность их выполнения. Основная проблема заключается в избегании конфликтов сложения и взаимосвязи геометрических примитивов. При этом нужно обращать внимание на конечное сохранение и грамотное исполнение начальных визуальных условий, которые поставлены для модели. Поэтому операции построений и алгоритм действий моделирования для таких форм может различаться.

### 4.3. Геометрическое моделирование гиперзвукового аппарата X-51A

Используя вышеперечисленные действия и способы сопряжения ведется процесс построения модели гиперзвукового аппарата X-51A, доработка и испытания которого в настоящее время ведутся в США.

Для создания гладких наклонных плоскостей, как, например, выпуклые грани перед рулями высоты, строится вытянутый по сечениям элемент. Но определяющие этот элемент эскизы расположены под углом друг к другу, имеют одинаковое количество отрезков и одну общую грань (рис. 21).

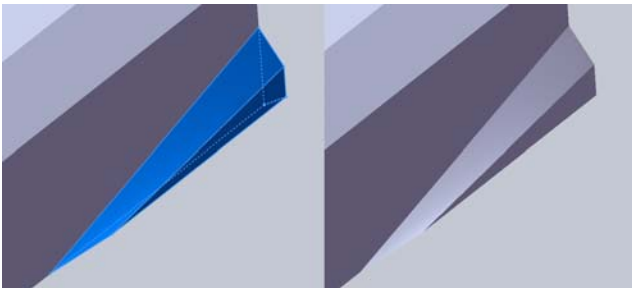


Рис. 21. Вытянутый по сечениям элемент

Также, ввиду особенностей внешнего вида модели, вытягивание должно быть выполнено не прямым (кратчайшим) путем (рис.21), а с небольшой выпуклостью. Для этого задается кривая, которая указывает направление вытягивания (рис.22). Для успешного построения элемента необходимо, чтобы она имела общие точки с определяющими эскизами.

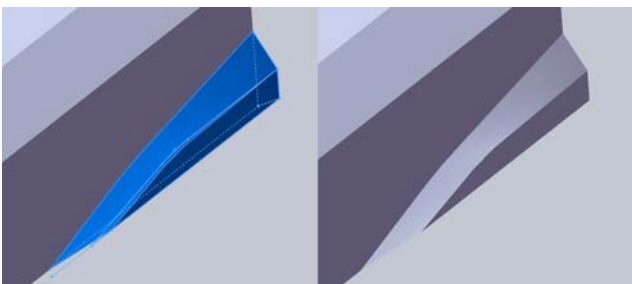


Рис. 22. Вытянутый по сечениям элемент с указанием направляющей кривой

Похожим образом строится носик модели (рис. 23). Носик модели имеет плавный переход от частичного сглаживания кромок в центре до полного скругления в конце. Для создания такого перехода используется элемент скругления с переменным радиусом (рис. 24–25).

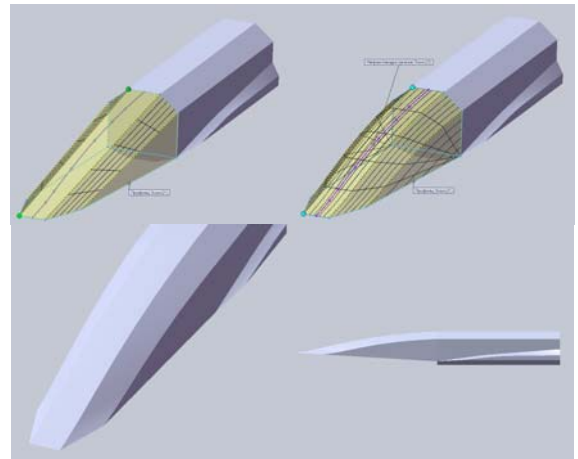


Рис. 23. Создание носика модели

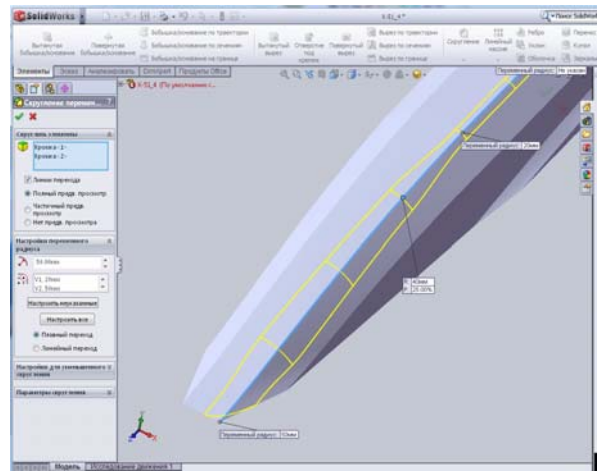


Рис. 24. Определение радиусов скругления кромки

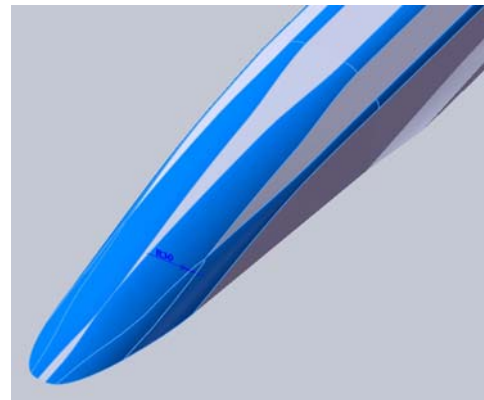


Рис. 25. Скругление носика модели

На рис.26 представлены несколько видов предварительного варианта модели ГЛА X-51A. В настоящее время ведется построение дальнейших элементов модели, таких, как ГПВРД, рули высоты и поворота, а также доработка имеющихся.

## 5. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ В COSMOSWORKS

COSMOSWorks – интегрированный в SolidWorks программный пакет, позволяющий производить различные виды анализов для трехмерных моделей. В настоящее время ведется изучение пакета для получения в нем расчетных сеток поверхности нужного качества.

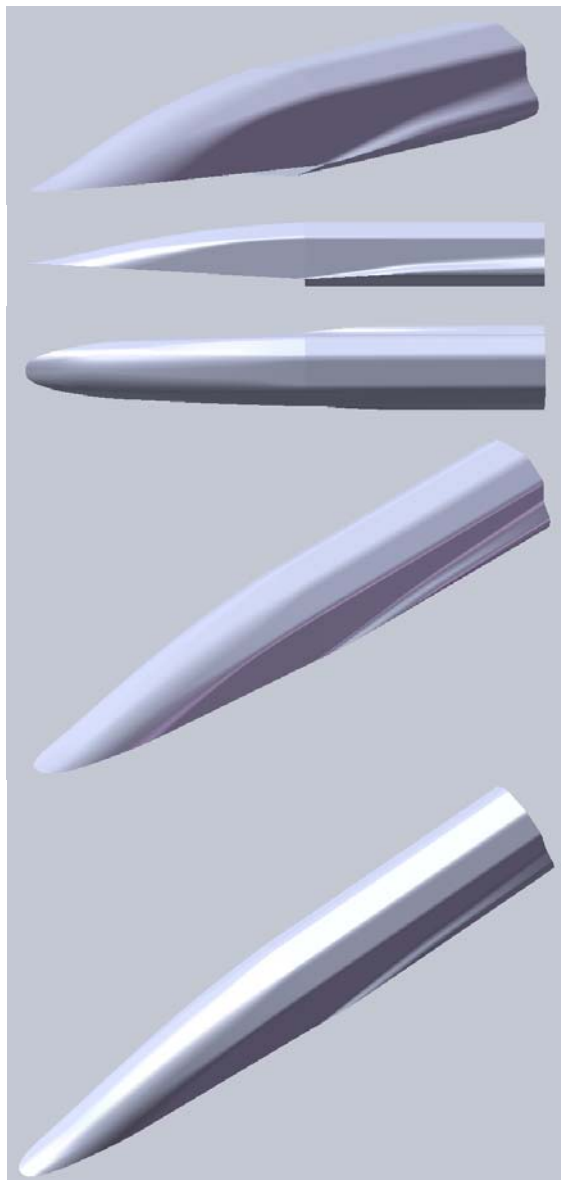


Рис. 26. Предварительный вариант модели

Для примера построения сеток рассматривается модель Waverider. В параметрах задается размер общего шага сетки (размер задается в единицах измерения длины) и указываются места сгущения с меньшим шагом (плоскости, грани, кромки). На рис. 27 показана поверхностная сетка Waverider с общим шагом в 5 см (длина модели 1.86 метра, ширина 1.5, высота 0.3). Сетка строится с помощью конечных элементов. В зависимости от геометрии модели происходит разбиение на области, в которые потом вписывается конечное число элементов (для поверхности это треугольники).

Для задания сгущения используется элемент управления сеткой. Указываются элементы модели (грани, кромки, плоскости) и шаг сетки для них. На рис. 28 показана поверхностная сетка Waverider с общим шагом в 5 см и с шагом в 1 см на кромках модели.

Как видно из рис.28, при переходе от большого шага к малому, перед областями сгущения сетки, строятся несколько слоев элементов сопряжения с разным значением шага (на поверхностях модели перед кромками), за счет которых осуществляется переход.

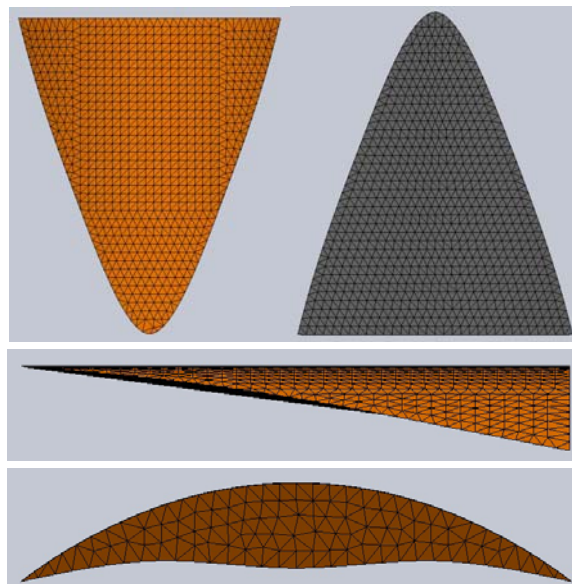


Рис. 27. Расчетная сетка Waverider, шаг 5 см

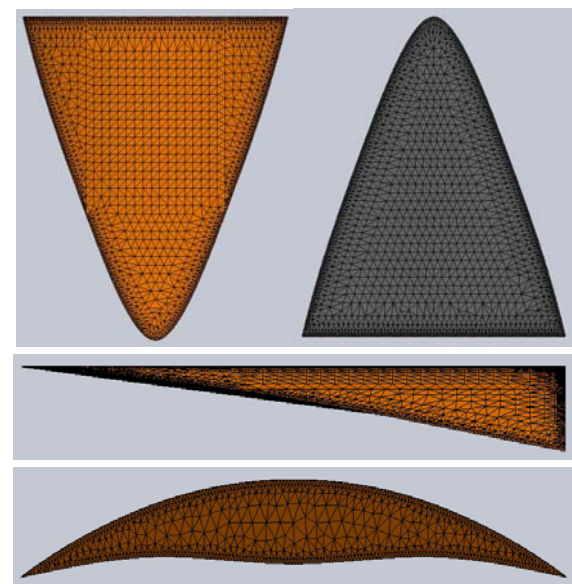


Рис. 28. Расчетная сетка Waverider, шаг 5 см, у кромок 1 см

Интересовал характер строения сетки при задании маленького шага в области сгущения, а так же до каких значений шаг можно уменьшать и в какие временные рамки укладывается создание такой сетки. Была построена сетка поверхности трехмерной модели Waverider с указанием общего шага в 5 мм, шага в 0.5 мм для передних кромок модели, шага в 2 мм для задних кромок (рис.29–32). Общее количество узлов – 1189850.

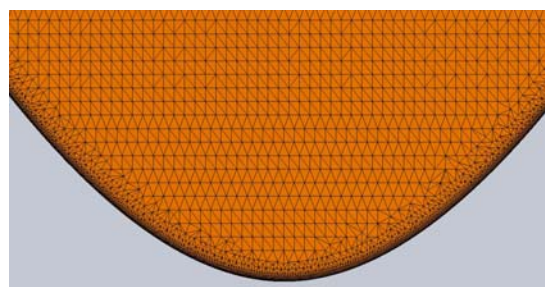


Рис. 29. Расчетная сетка Waverider, носик модели, вид сверху

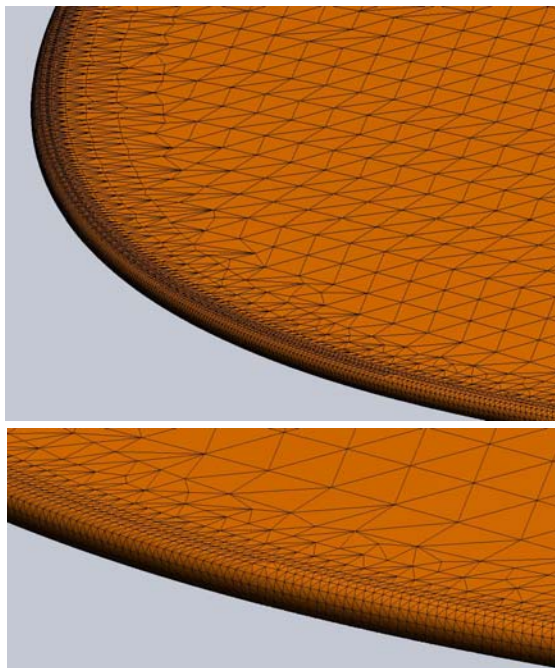


Рис. 30. Расчетная сетка Waverider, носик модели, изометрия

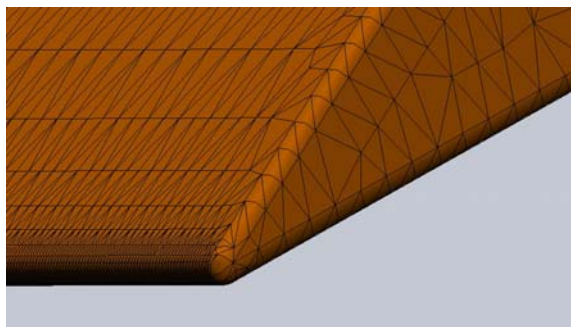


Рис. 31. Расчетная сетка Waverider, левый угол модели

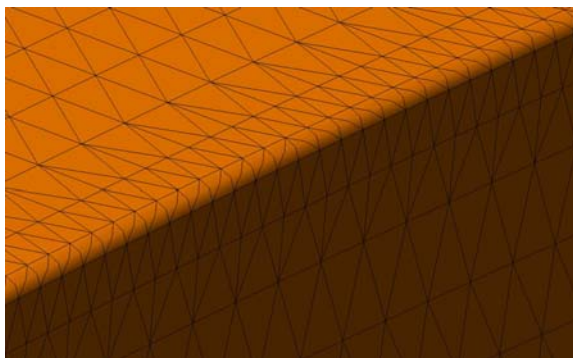


Рис. 32. Расчетная сетка Waverider, верхняя задняя кромка

На рис.30–31 видно, что элементы сетки делятся на плоские треугольники с узлами в вершинах (на поверхностях модели) и криволинейные треугольники с узлами в вершинах и на середине сторон (на скругленных кромках).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были созданы сложные поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов в САПР SolidWorks, необходимые для проведения численных расчетов термоаэродинамики. Рассмотрены способы создания сложносоединенных трехмерных элементов и их взаимо-

связи. Ведется трехмерное моделирование форм сложных летательных аппаратов для последующих расчетов и анализов. Приведены примеры построения расчетных сеток поверхностей трехмерных моделей в программном пакете COSMOSWorks.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной газовой динамики Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН (ИПМех РАН). Отдельные части представленной работы проводились в рамках проектов РФФИ № 10-01-00544 (разработка пространственных моделей радиационной газовой динамики химически реагирующего газа), 09-08-00272 (экспериментальное исследование структуры ударных волн), а также в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы механики взаимодействия в технических и природных системах, материалах и средах» (разработка форм сложных моделей гиперзвуковых летательных аппаратов), Программ фундаментальных исследований отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОЭММПУ) РАН «Физико-химическая механика неравновесных систем» (исследование неравновесной кинетики высокотемпературных газов) и «Фундаментальные проблемы горения и детонации в энергоустановках» (разработка математических моделей горения многокомпонентных газовых смесей). С использованием изложенной технологии выполнены расчетные исследования в работах [5–10].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charles E. Cockrell. Interpretation of Waverider performance data using computational fluid dynamics // American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
2. SolidWorks. Практическое руководство. М.: Бином, 2004.
3. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. М.: Физматлит, 2002.
4. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks. М.: ДМК Пресс, 2011.
5. Суржиков С.Т. Перспективы многоуровневого подхода к задачам компьютерной аэрофизики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-002.pdf>
6. Суржиков С.Т. Трехмерная вычислительная модель аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-002.pdf>
7. Котов М.А., Кузенов В.В. Создание сложных поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов системами САПР // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-039.pdf>
8. Железнякова, А.Л., Суржиков, С.Т. Поле течения около космического аппарата Fire II под углом атаки // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-020.pdf>
9. Железнякова А.Л., Кузенов В.В., Петрусев А.С., Суржиков С.Т. Расчет аэротермодинамики двух типов моделей спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-025.pdf>
10. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата X-43 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-030.pdf> Т.11.