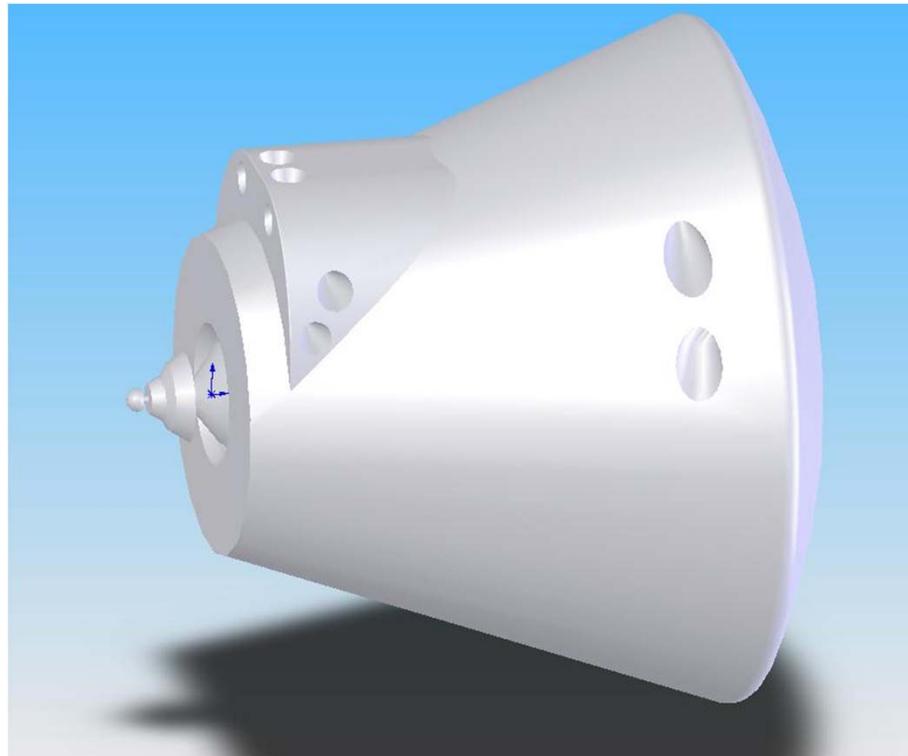


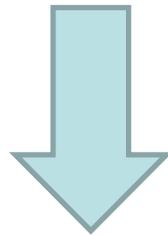
Численный анализ обтекания возвращаемого космического аппарата на основе современных моделей турбулентности



А.В. Гарбарук, Д.А. Никулин, М.Х. Стрелец

Аппараты для спуска в атмосфере

- При движении ВА в атмосфере Земли возникают две основные опасности:
 - Перегрузки
 - Перегрев
- Спуск аппарата по *баллистической траектории* сопровождается со значениями перегрузок и температур, приводящих к разрушению аппарата



Аппарат должен обладать некоторым
аэродинамическим качеством

Аппарат в форме «фары»

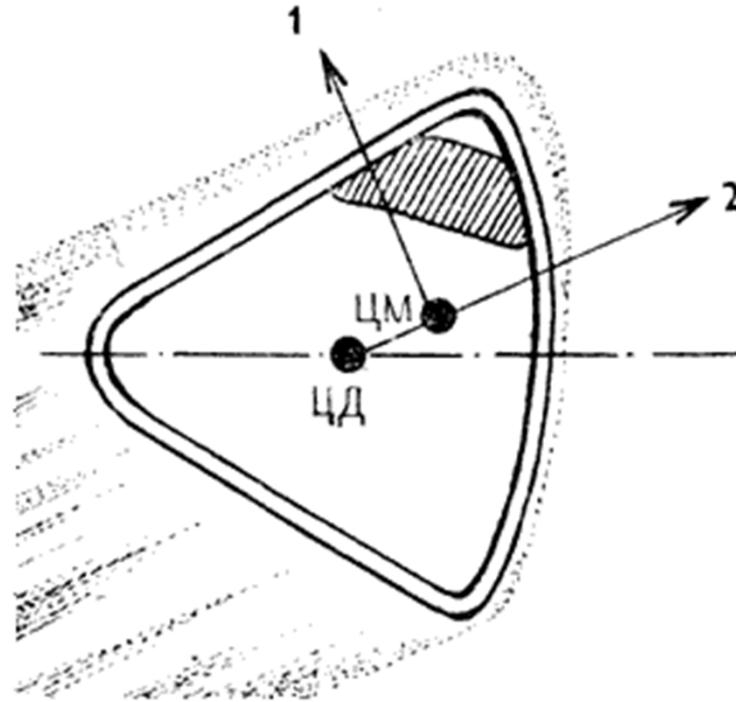
- Традиционным решением является аппарат в форме «фары»

Подобные аппараты
используются как в России



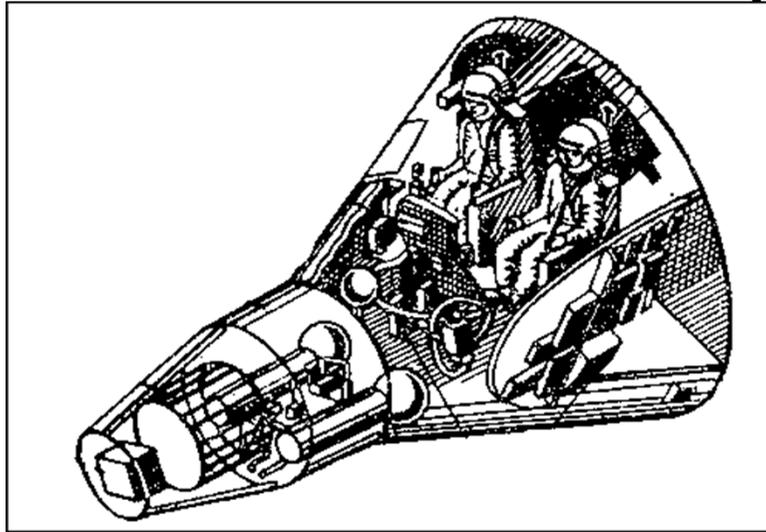
так и в США (NASA)

Возвращаемый аппарат (ВА) в форме «фары»



- Передняя сферическая часть (“сгонка”) обеспечивает вполне приемлемое аэродинамическое качество $(C_L/C_D) = \sim 35\%$
- Смещение центра тяжести относительно центра давления обеспечивает устойчивость полета

Вывод ВА на орбиту

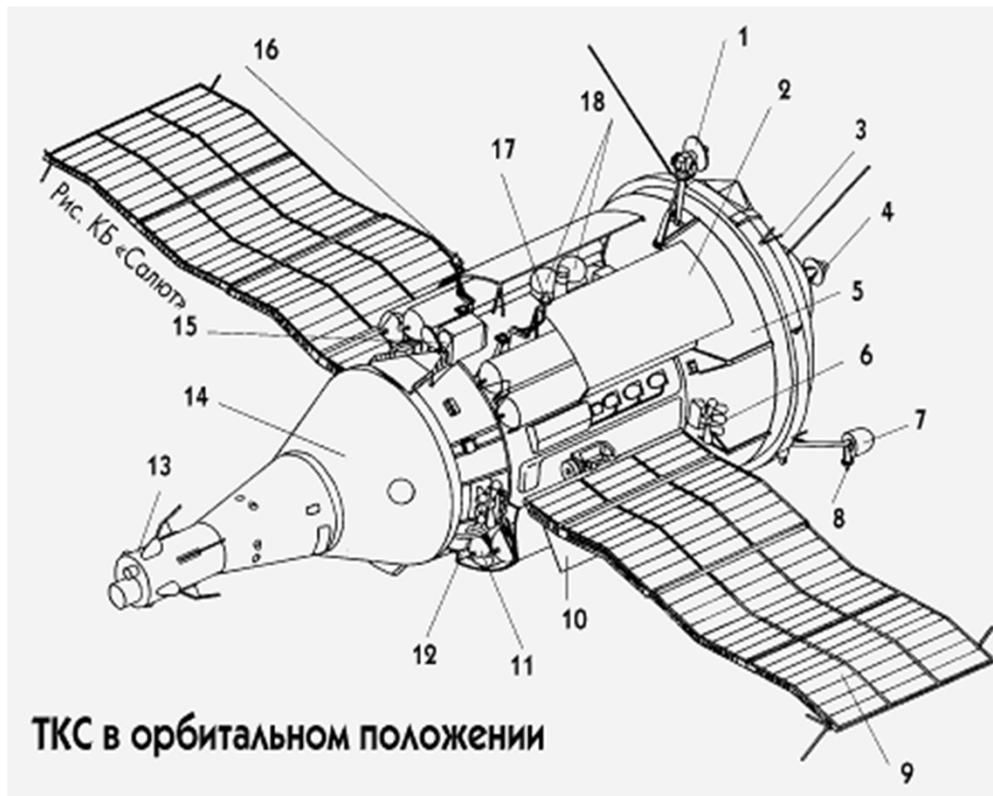


При выводе на орбиту аппарат стыкуется с ракетой-носителем



Стыковка ВА с другими модулями на орбите

При орбитальном полете ВА стыкуется с другими модулями для формирования единого рабочего пространства



Детали корабля «Орион», сверху вниз: возвращаемый аппарат, служебный модуль, адаптер для крепления на ракете-носителе

Разработка пилотируемого корабля нового поколения

- 2005 г. – решение на политическом уровне о создании совместного (Россия-Европа) проекта пилотируемой транспортной системы
 - ракетно-космический комплекс
 - пилотируемый транспортный корабль нового поколения
 - средства выведения
 - система аварийного спасения
 - космодром с необходимой инфраструктурой
 - наземный комплекс управления
- 2007 г. – создание технической рабочей группы JSET (Joint System Engineering Team)
 - Стоимость полета меньше 2 стоимостей запуска «Союза»

Требования к пилотируемому кораблю и возвращаемому аппарату

- Многоразовый, со сроком эксплуатации не менее 15 лет
- Работа на высоте до 500 км
- Посадка на Землю и Луну с точностью 15 км и перегрузками не более 3g
- Длительность полетов
 - Автономный - 15 суток
 - В составе станции – 200 суток
 - Возврат с любой точки земной и лунной орбит – 5 суток
- Вместимость – 6 человек (при полете на Луну – 4)
- Экологически безопасное топливо
- Сроки
 - Первый запуск – 2015 год
 - Пилотируемый полет – 2018 год

Схема полета к МКС

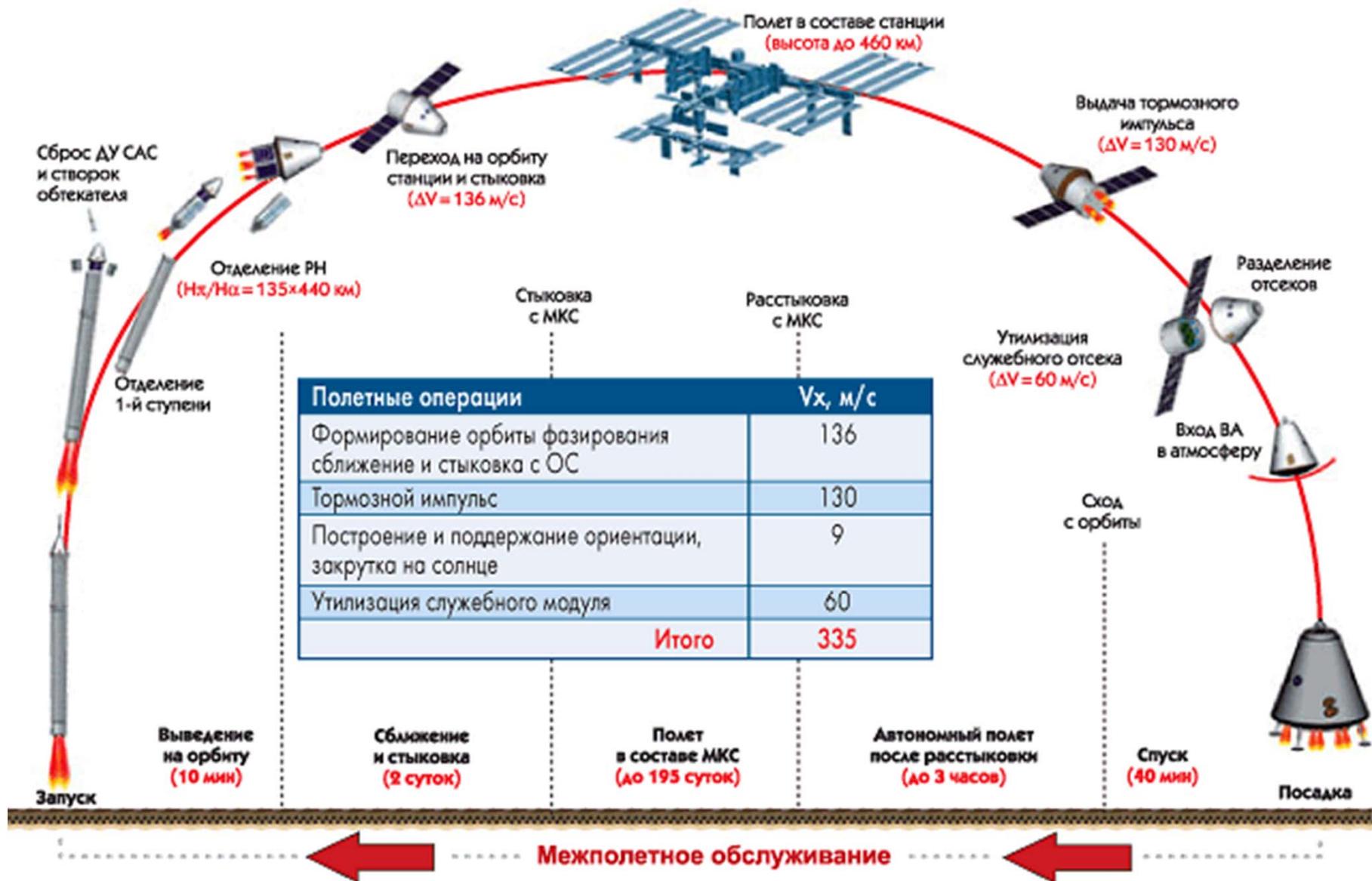
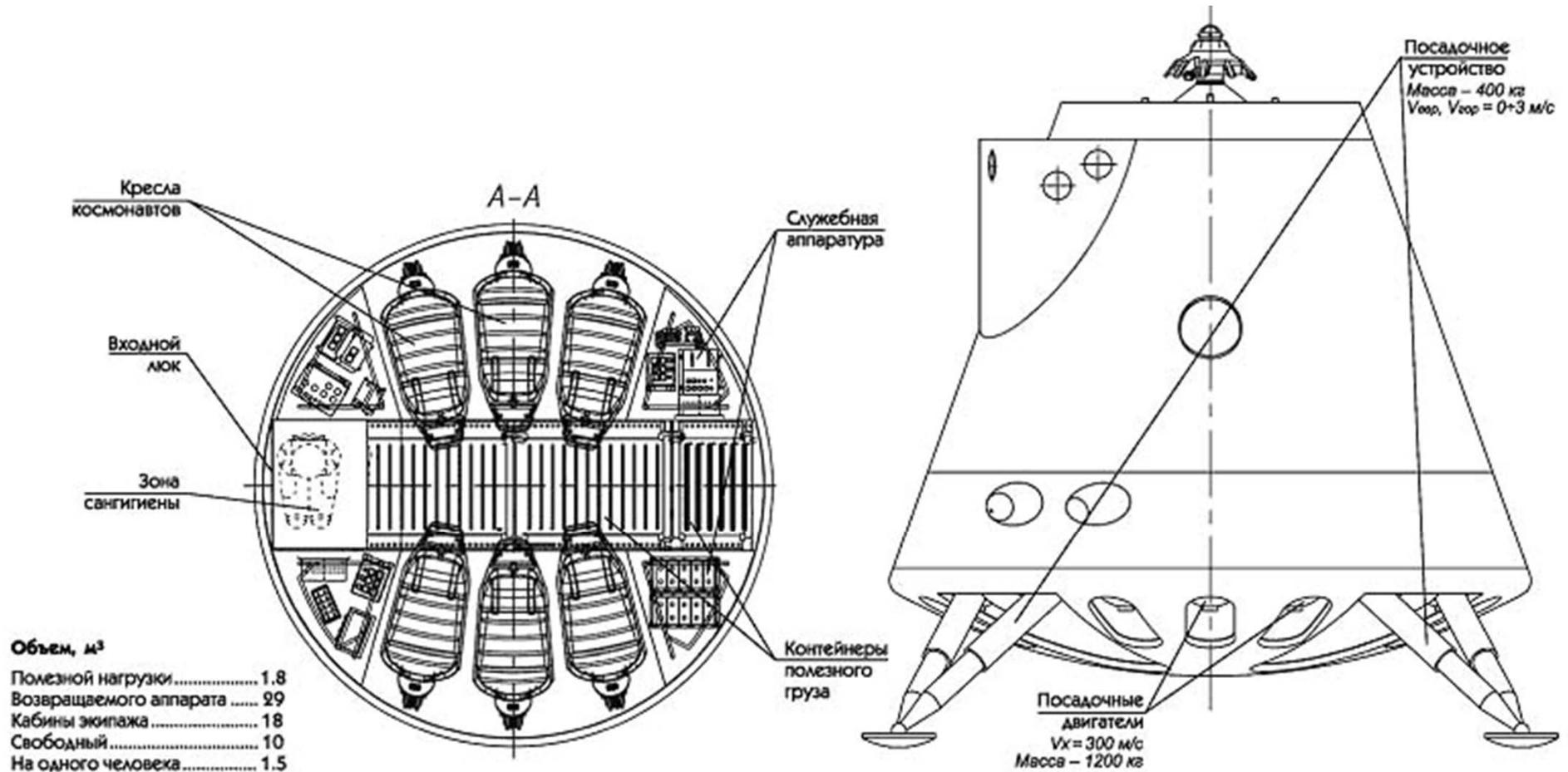


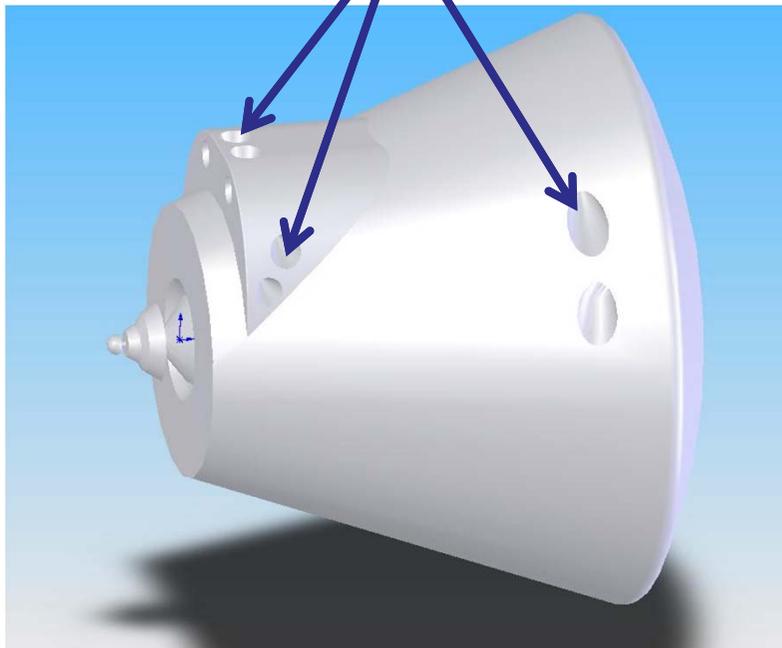
Схема ВА

- В 2008 году определены основные технические характеристики ВА
 - Для обеспечения точности посадки необходима система управления спуском

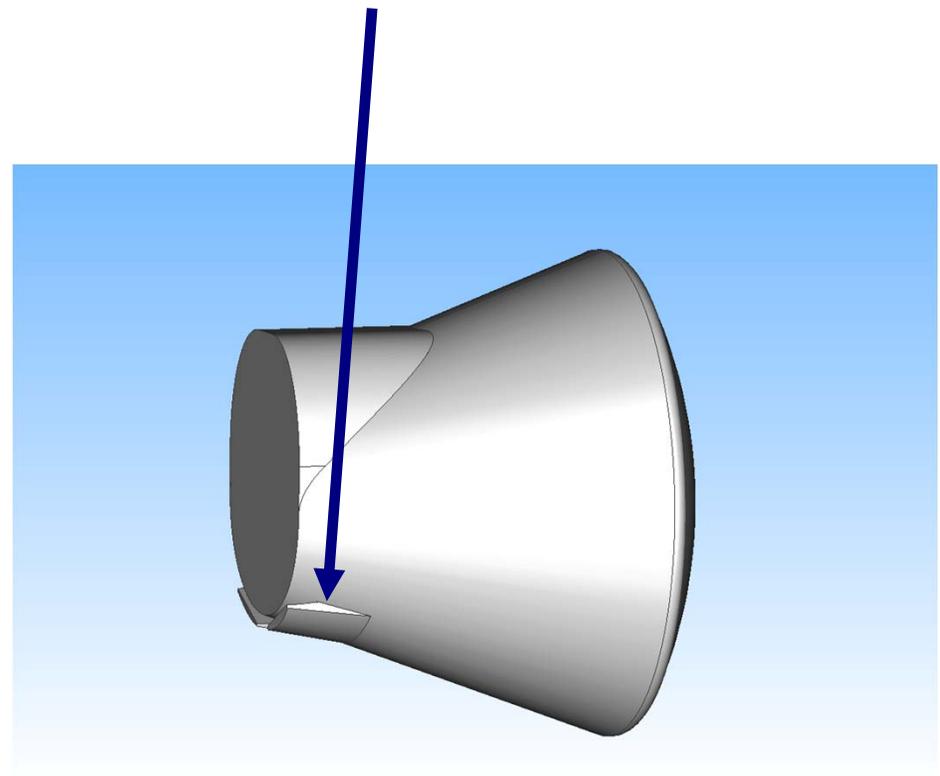


Системы управления спуском

Реактивные двигательные
установки



Балансировочные щитки



Цели работы

- Исследовать возможности различных подходов к моделированию турбулентности применительно к задаче об обтекании ВА без и с балансировочными щитками на транс- и сверхзвуковых скоростях полета
- Исследовать влияние балансировочных щитков на аэродинамические характеристики ВА

Математическая модель

- Уравнения для сжимаемого газа с учетом зависимости вязкости и теплопроводности от температуры при постоянной теплоемкости
- Моделирование турбулентности
 - Уравнения Рейнольдса
 - Модель Спаларта-Аллмараса (SA)
 - Модель Ментера (SST)
 - Гибридный метод
 - Delayed Detached Eddy Simulation (DDES)

Упрощенная модель ВА

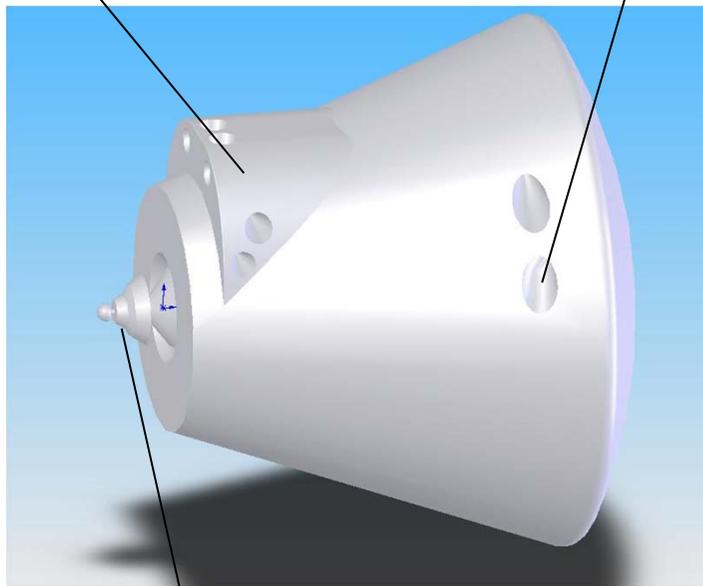
Расчетная геометрия

• Упрощения

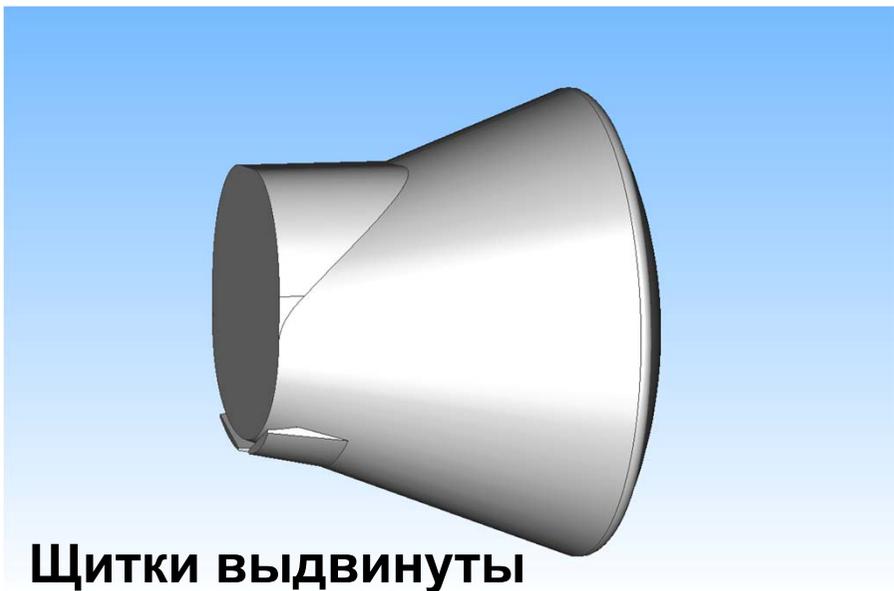
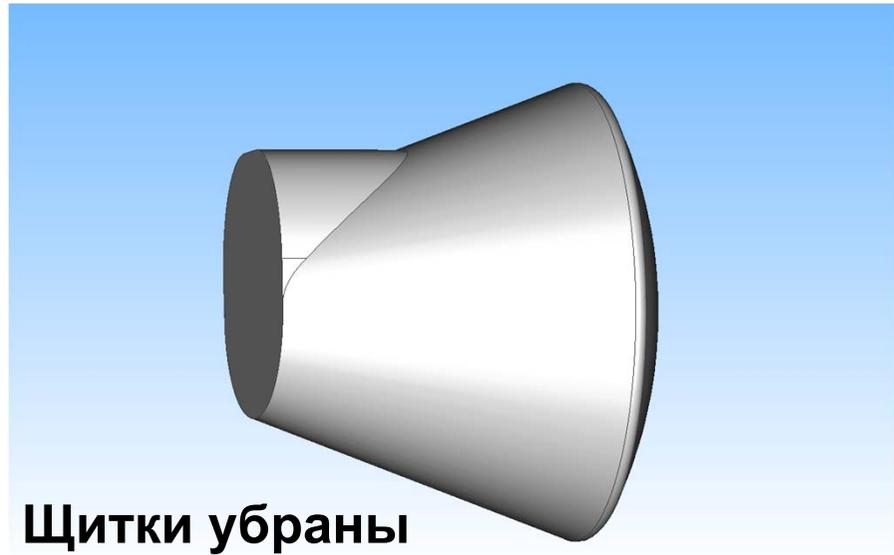
- удален стыковочный узел
- сопловые отверстия отсутствуют
- блок двигателей продлен до плоскости донного среза

Блок двигателей

Сопловые отверстия



Стыковочный узел

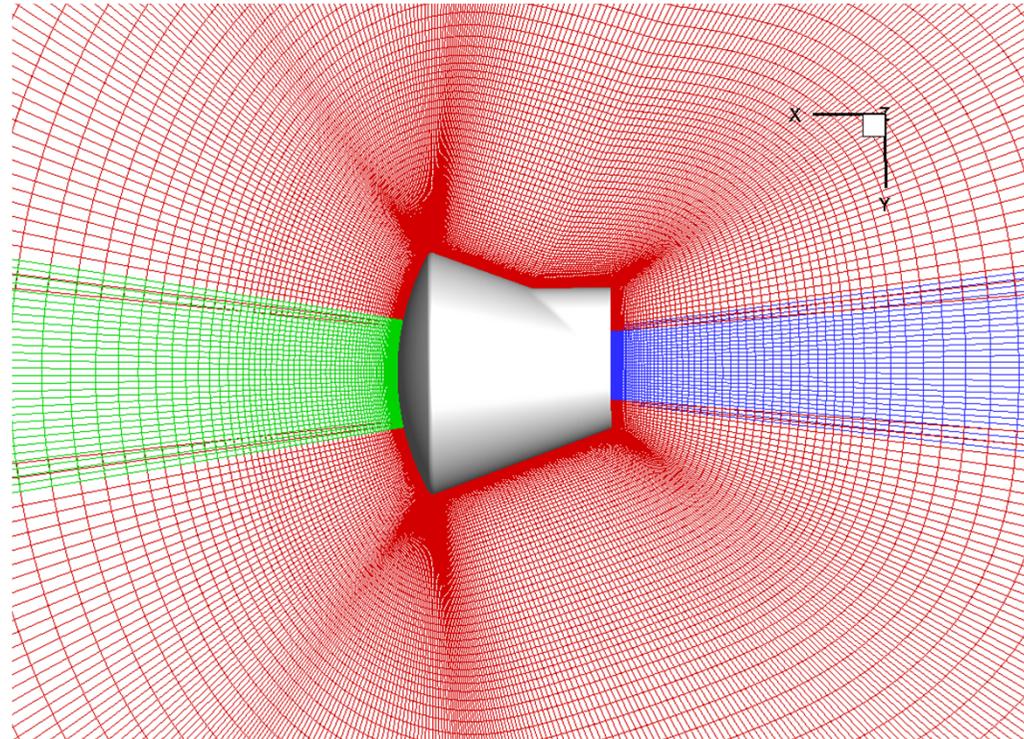


Метод расчета

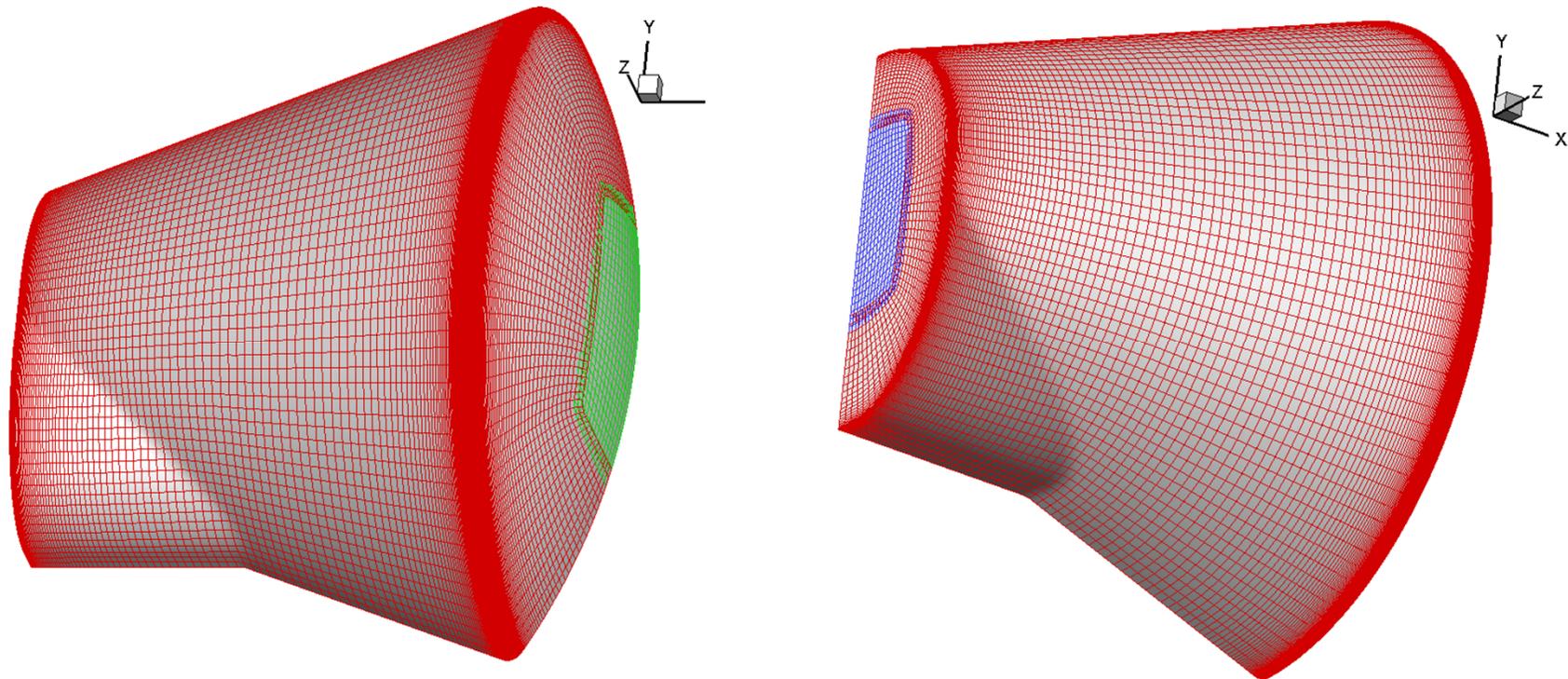
- Используется собственный расчетный код NTS
 - Метод конечных объемов
 - Vertex-based система хранения данных
 - Массивная параллелизация с использованием MPI и OMP
- Расчетные сетки
 - Структурированные многоблочные с перекрытием блоков (типа химера»)
- Дискретизация уравнений
 - Схема расщепления разностей потоков P_{ou} для аппроксимации конвективных слагаемых
 - Противопоточная аппроксимация третьего порядка (3 upw) для стационарных уравнений Рейнольдса
 - Гибридная схема (3 upw / 4 симметричная) для метода DDES
 - Использование ограничителя Ван-Альбада на скачках при $M > 1$
 - Симметричная схема второго порядка для вязких членов
- Неявная трехслойная схема интегрирования по времени второго порядка
 - Релаксация Гаусс-Зейделя по плоскостям
 - Метод приближенной факторизации по направлениям с диагональным преобладанием (DDADI)

Расчетная область и сетка

- Расчетная область – шар $R=150$ м с центром при $x=-35$ м
- Основной блок типа “О” и 2 дополнительных декартовых блока в окрестности оси симметрии для исключения сингулярности
 - При решении стационарных уравнений Рейнольдса расчетная область – половина шара (размер сетки 2.3М узлов)
 - При использовании метода DDES размер сетки 5М узлов

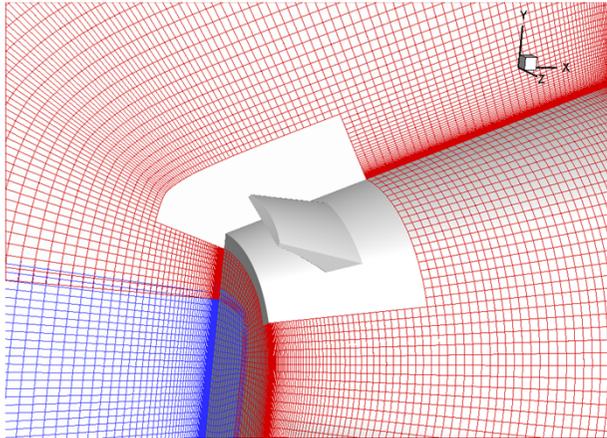


Поверхностная сетка

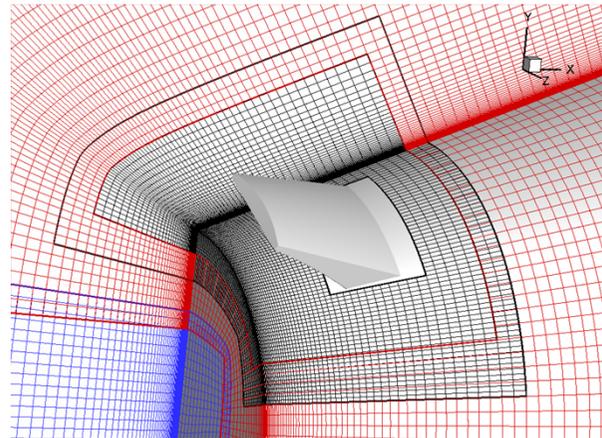


- Основной и дополнительные блоки имеют общую линию, что существенно облегчает и повышает точность вычисления поверхностных интегралов при расчете сил и моментов

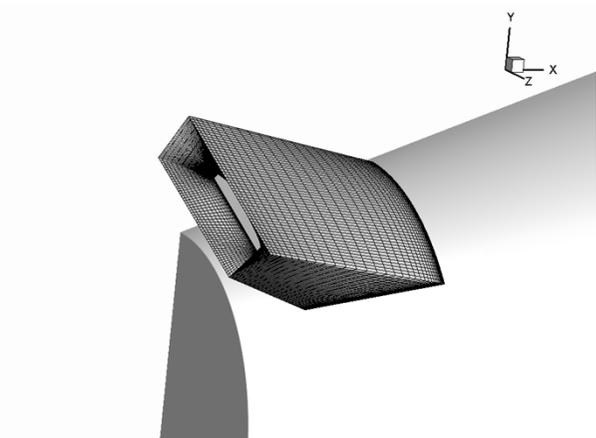
Особенности сетки при наличии щитков



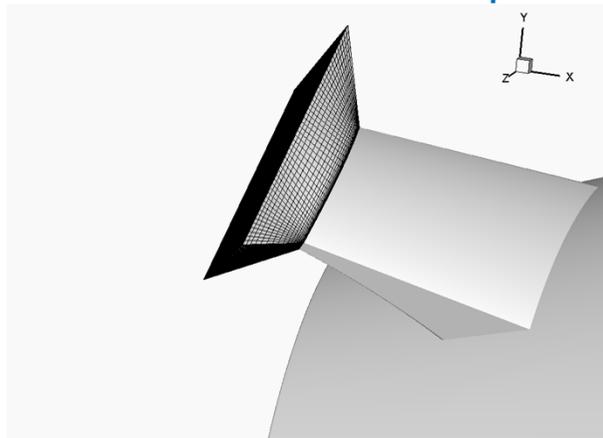
1. Вырез в основной «О»-сетке



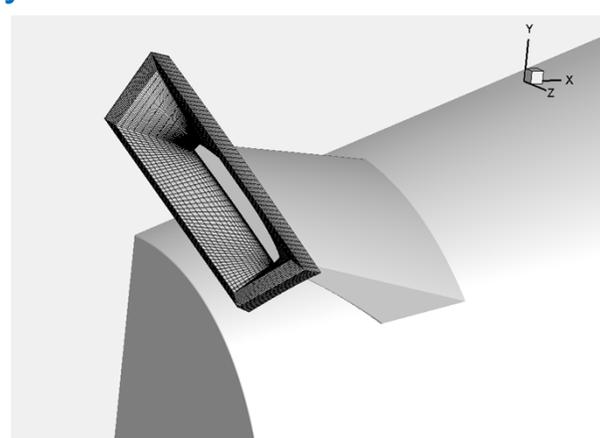
2. Построение измельченной промежуточной сетки



3. Построение блока «О»-типа вокруг щитка

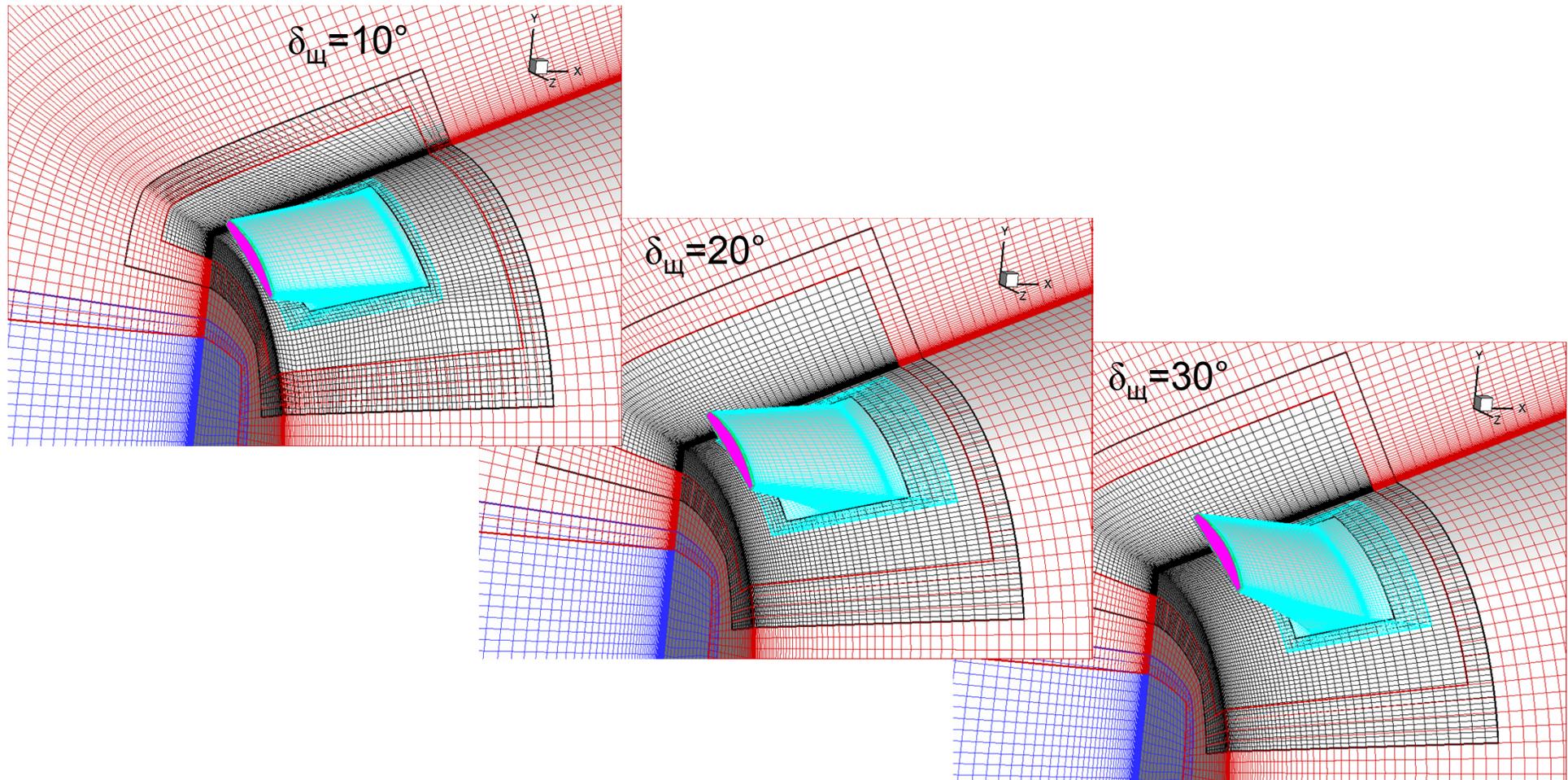


4. Построение блока вокруг торца щитка



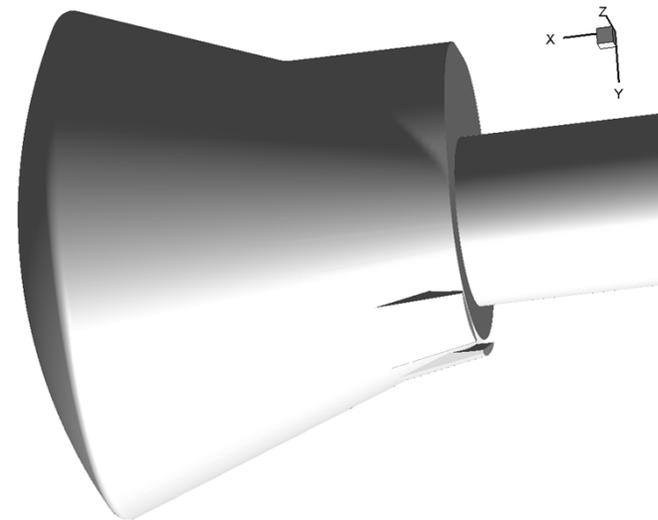
5. Построение интерфейсного блока

Изменения сетки при изменении угла отклонения щитков

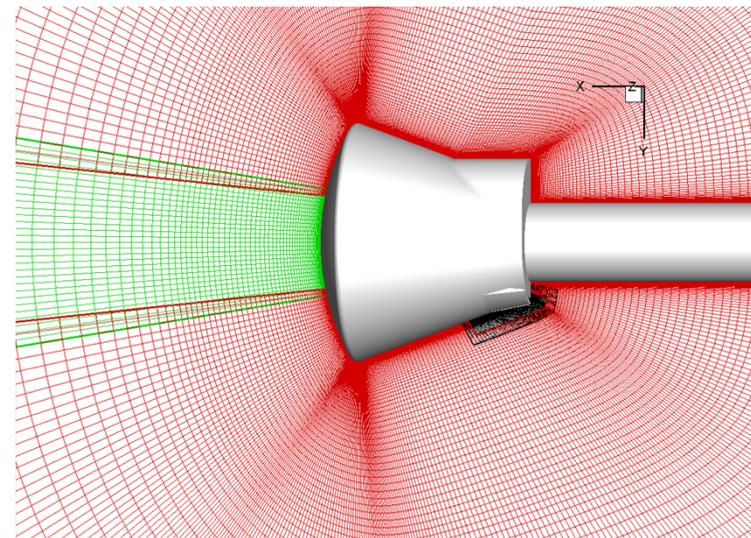


- Во всех случаях перекрывающиеся блоки имеют на поверхности общую линию

Модификация сетки для расчета обтекания ВА в аэродинамической трубе



Для сравнения с экспериментом была построена модель с державкой и соответствующая сетка



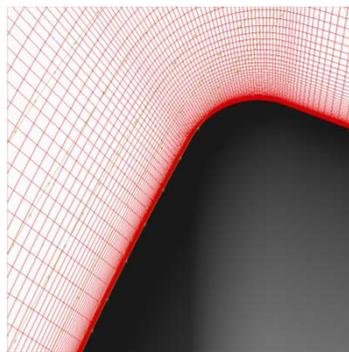
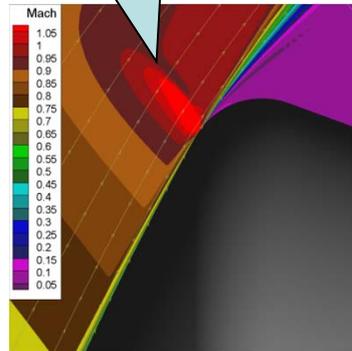
Параметры течения

- Расчеты проводились для высот полета ВА от 10 до 40 км
- Рассматривались трансзвуковые и сверхзвуковые режимы полета (число Маха от 0.6 до 6.0)
- Число Рейнольдса порядка 10^6 - 10^7
- Угол атаки от 0 до 30°
- Угол отклонения щитков от 0 до 30°

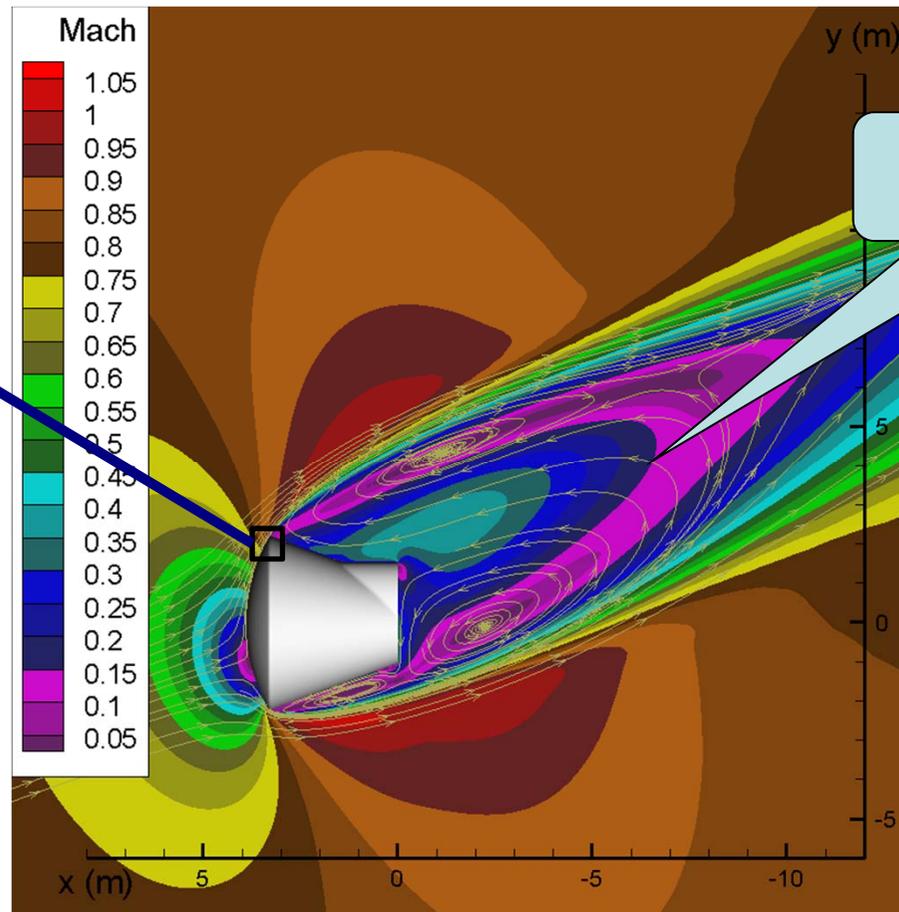
Особенности трансзвукового обтекания ВА (SA RANS)

Поле числа Маха в меридиональной плоскости

Локальные сверхзвуковые зоны и скачки уплотнения



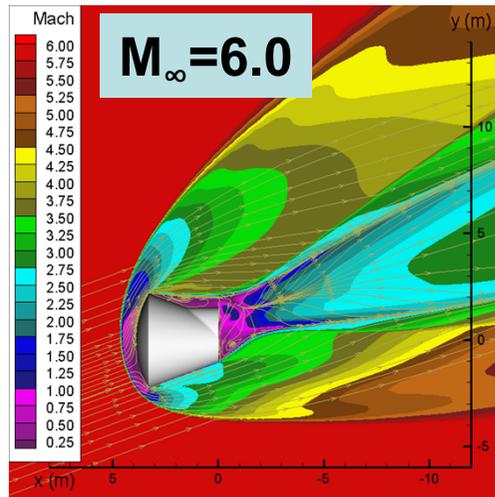
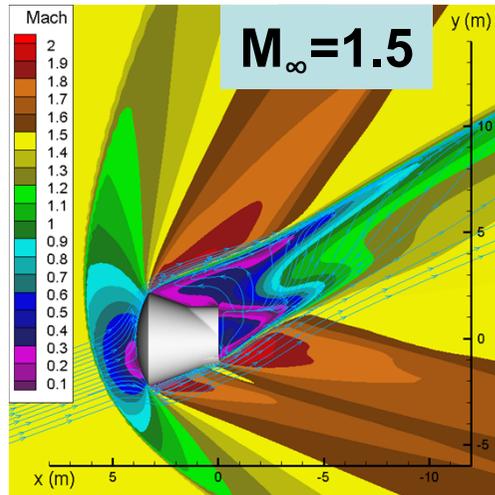
Локальное измельчение сетки



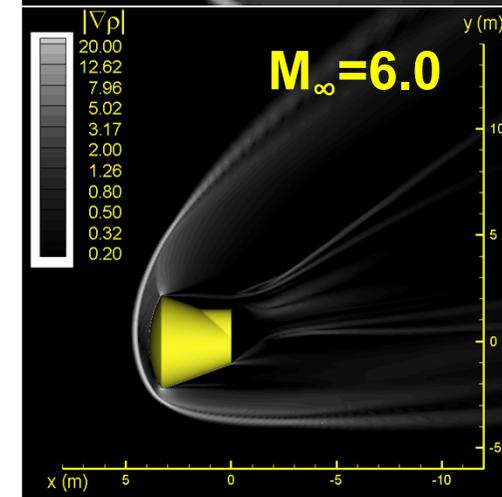
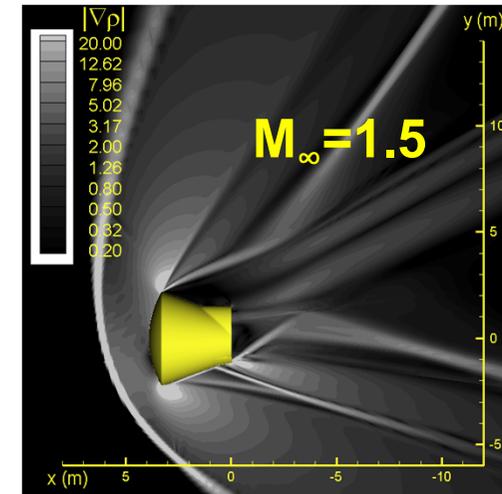
Обширная 3D зона отрыва

Особенности сверхзвукового обтекания

Поле числа Маха

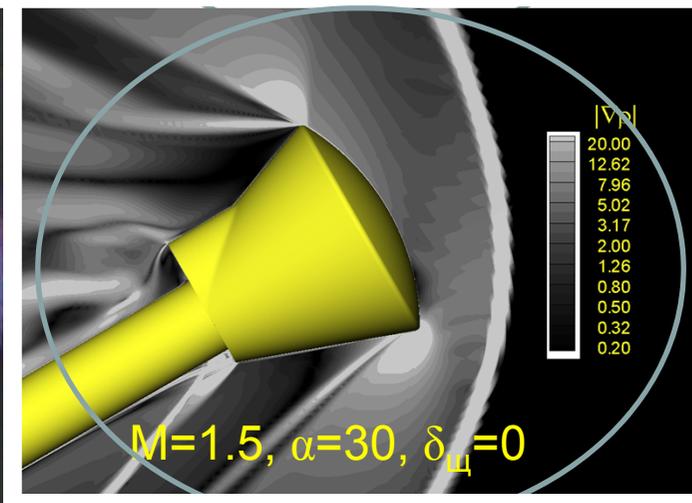
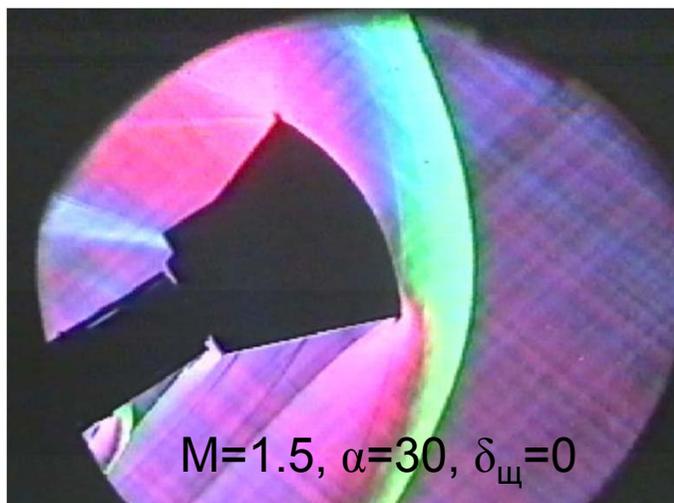
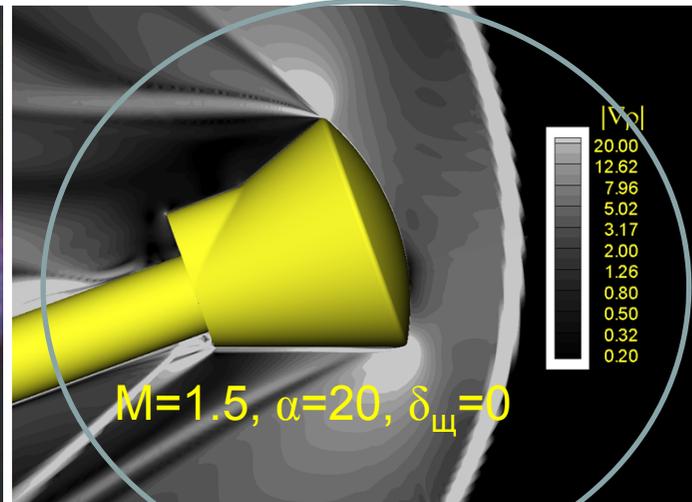
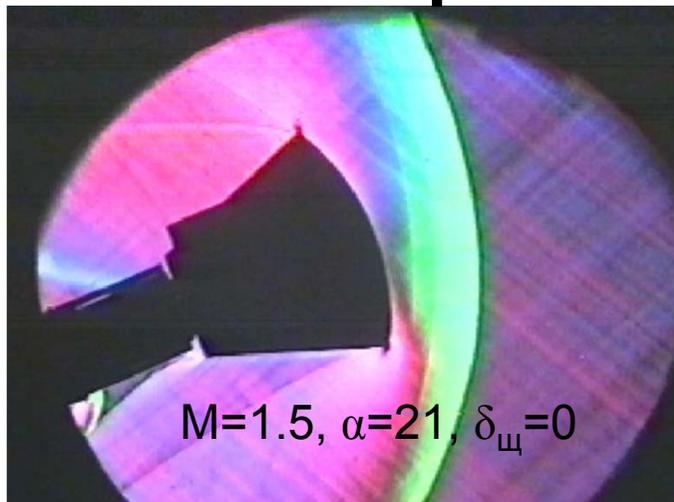


Вычислительная “Шлирен фотография”
(поле модуля градиента плотности)



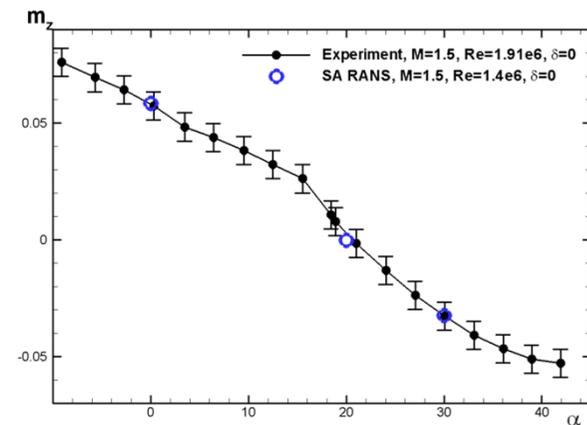
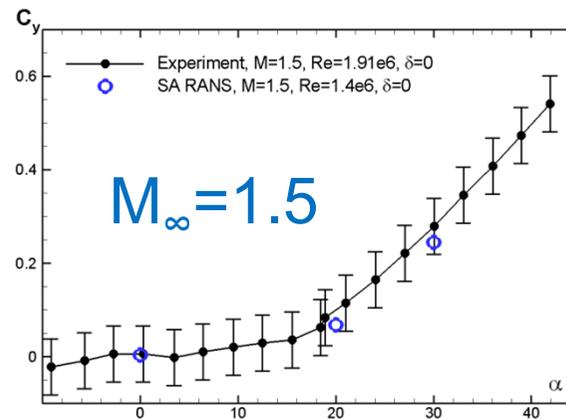
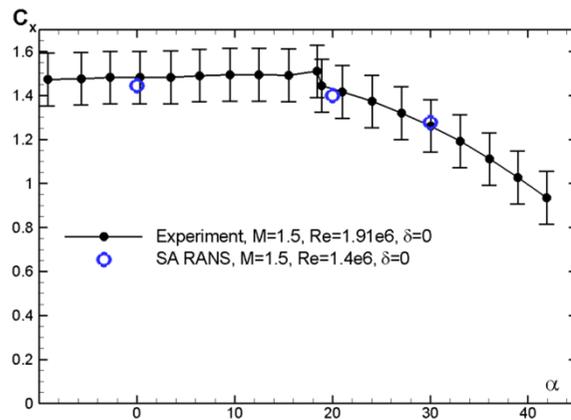
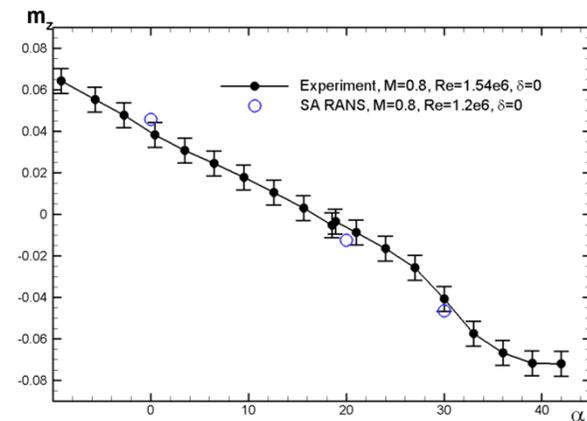
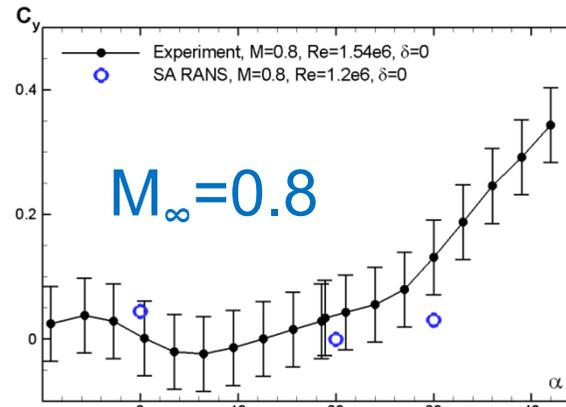
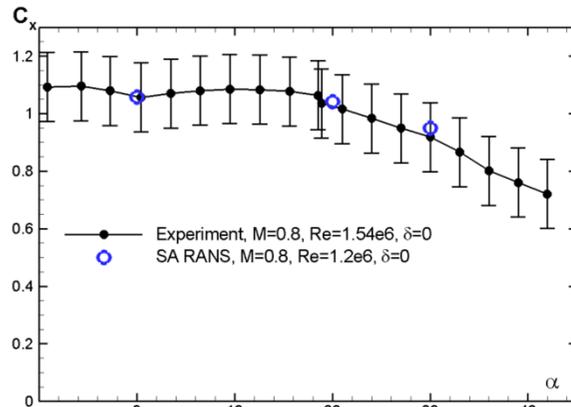
- Сложная ударно-волновая структура
- Умеренный отрыв

Сравнение результатов расчета по SA RANS с экспериментом: поле течения



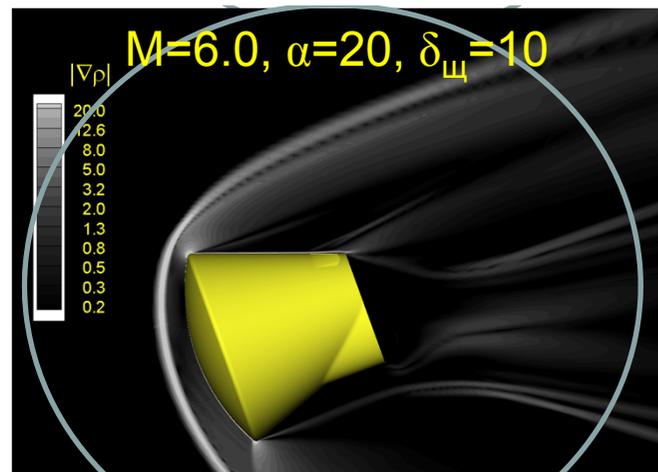
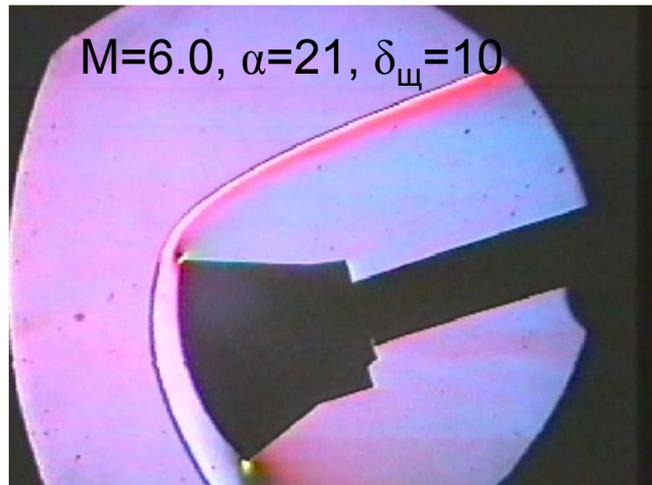
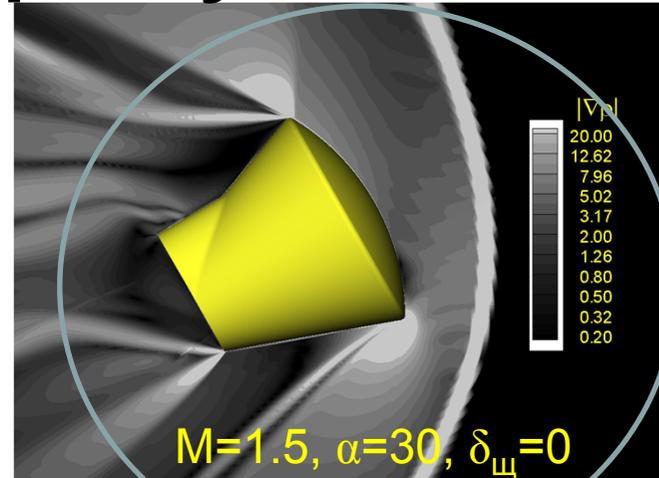
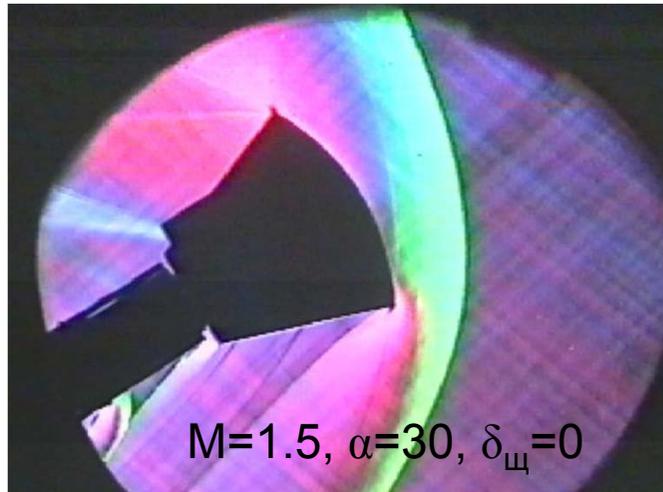
Хорошее совпадение всех элементов ударно-волновой структуры потока

Сравнение результатов расчета по SA RANS с экспериментом: силы и моменты



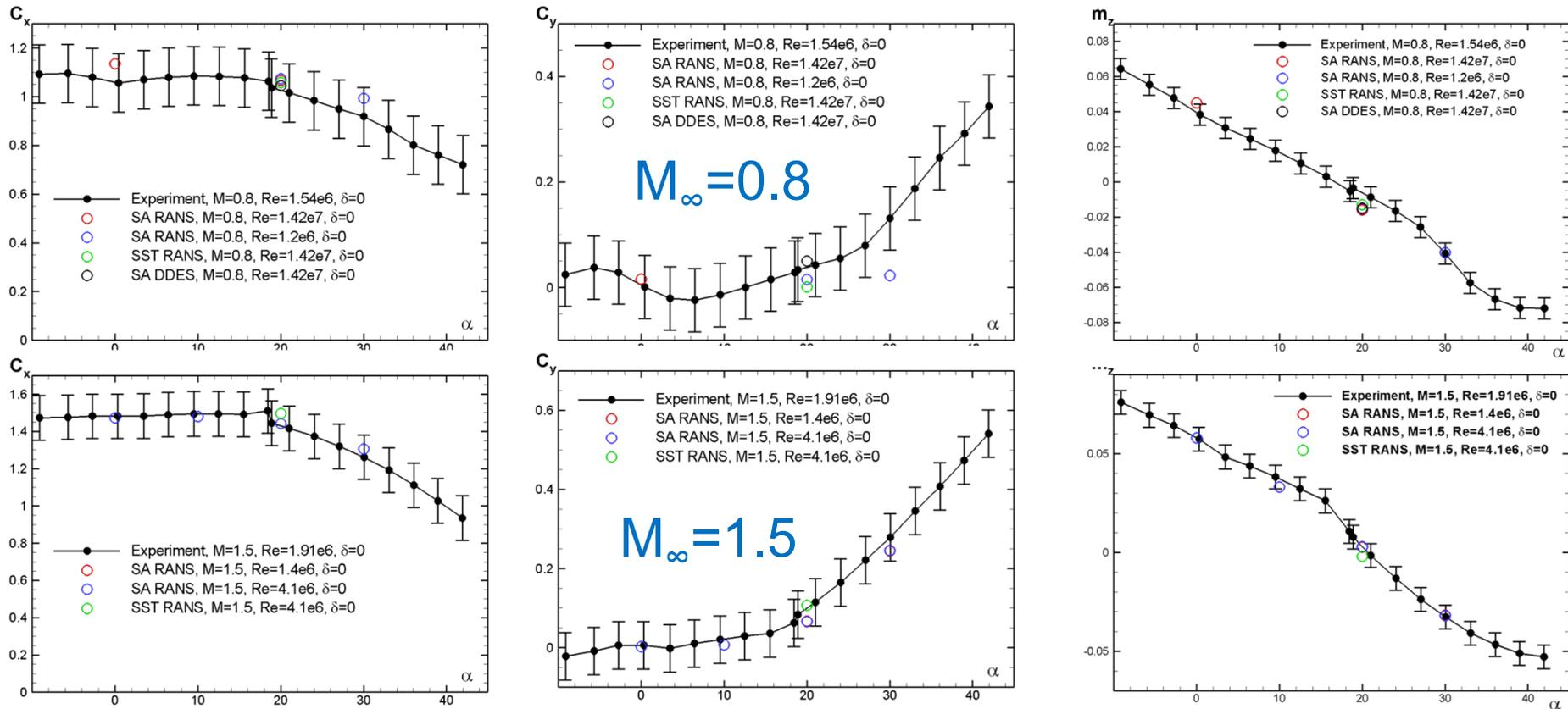
Расчетные значения совпадают с экспериментальными с точностью до погрешности измерений

Исследование влияния державки и числа Рейнольдса на картину обтекания ВА



Наличие державки сказывается только в ее непосредственной близости

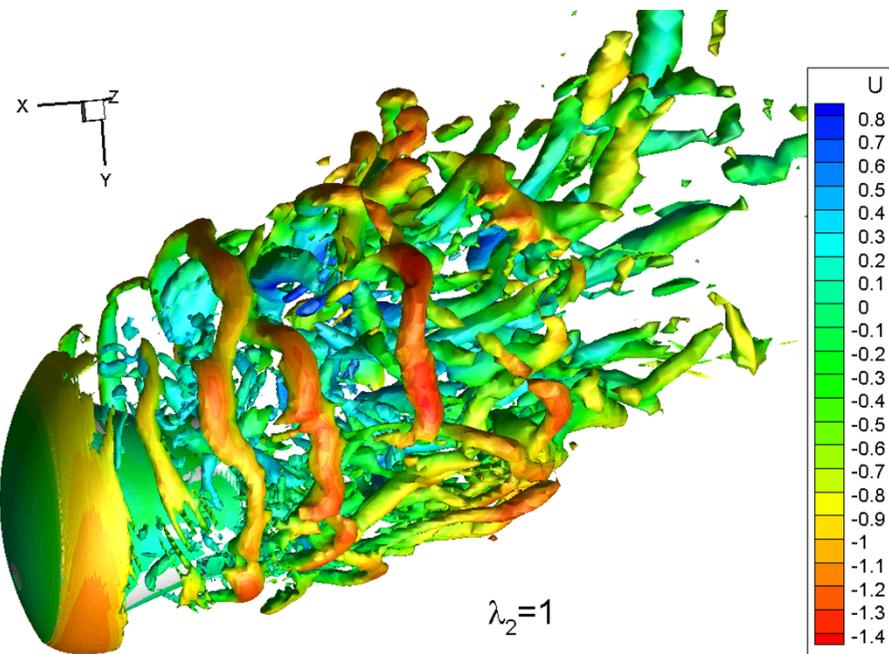
Сравнение различных подходов к моделированию турбулентности



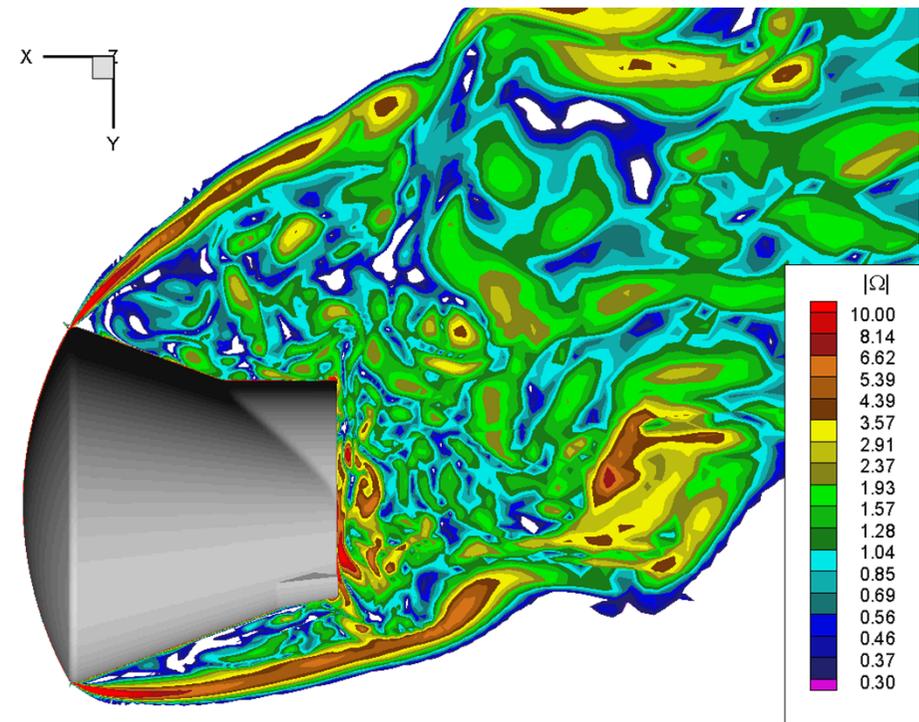
- Все подходы к моделированию турбулентности дают близкие результаты по интегральным силам и моментам, совпадающие с экспериментом с точностью до погрешности измерений
- Влияние числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне незначительно

Результаты расчетов с использованием гибридного метода SA-DDES

Изоповерхность “закрутки” $\lambda_2=1$

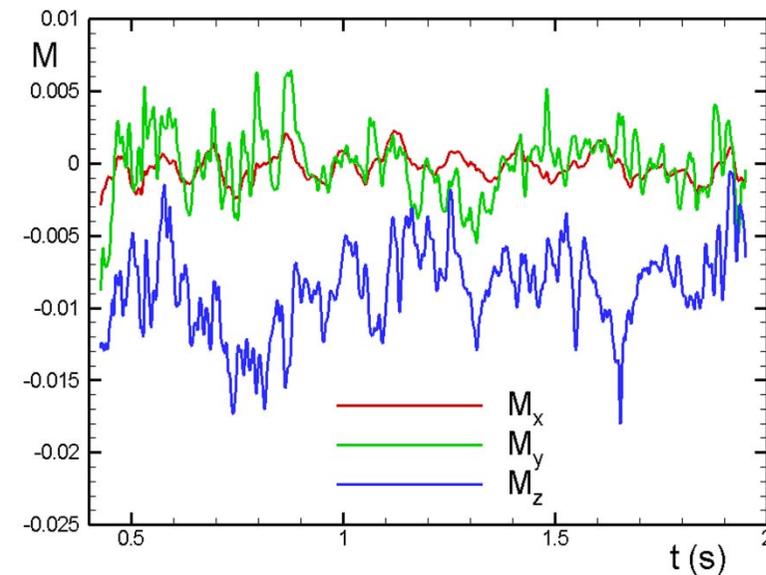
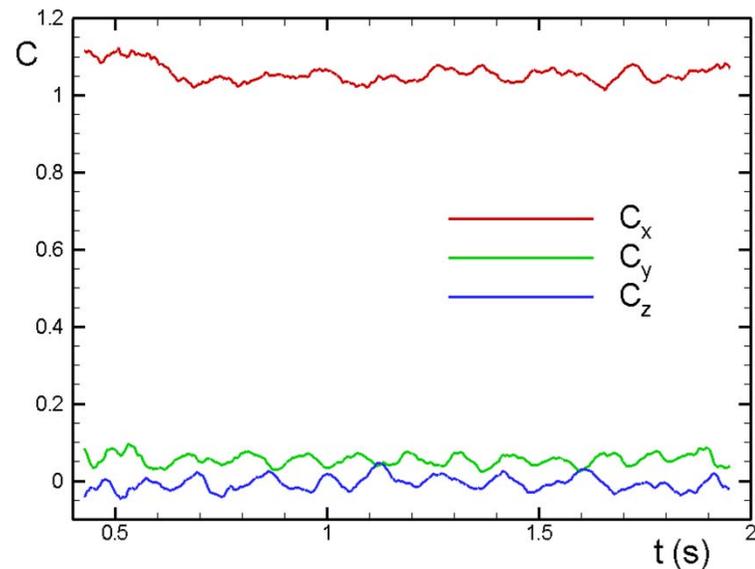


Мгновенное поле модуля завихренности



- DDES позволяет разрешить турбулентные вихри и получить нестационарную картину течения

Результаты расчетов нестационарных сил и моментов с помощью DDES



- Колебания во времени сил и, особенно, моментов сил имеют сложный характер и достаточно большую амплитуду, что необходимо принимать во внимание при оценке «живучести» ВА

Выводы

- Все рассмотренные подходы к моделированию турбулентности (SA и SST RANS и SA-DDES) дают близкие результаты по параметрам осредненного течения, хорошо совпадающие с результатами измерений
- Использование SA DDES позволяет, наряду с этим, определить нестационарные силы и моменты, знание которых необходимо для более надежной оценки «живучести» ВА