

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики

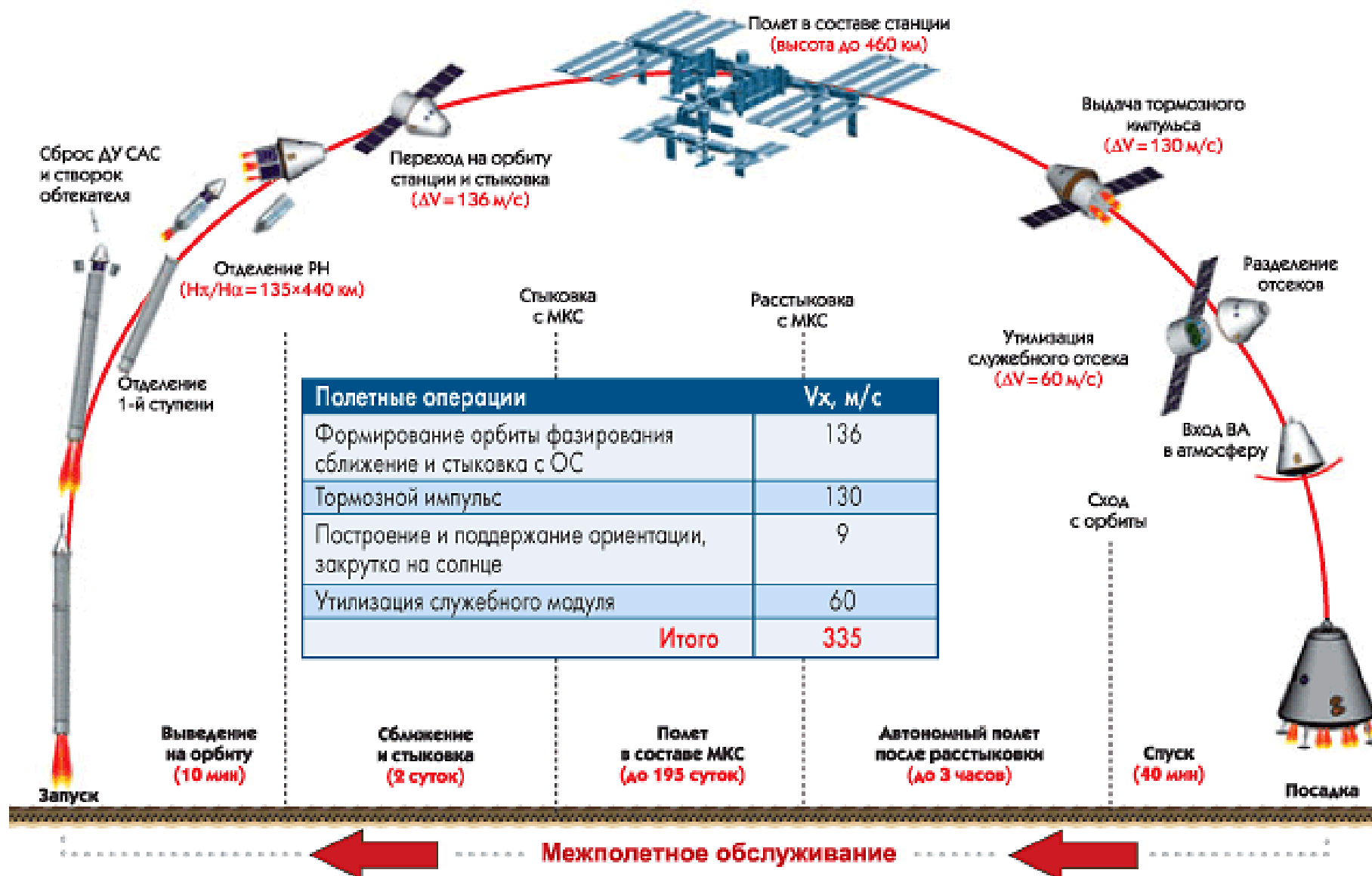
Курс лекций «Модели молекулярного и турбулентного переноса.
Полуэмпирические модели турбулентности»
(http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/RANS_models)

Лекция 9

Актуальные задачи орбитальной космонавтики (посвящается дню космонавтики)

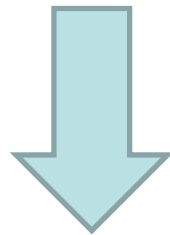
Гарбарук Андрей Викторович (agarbaruk@mail.ru)
2023

Схема полета к МКС



Аппараты для спуска в атмосфере

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



Аппарат должен обладать некоторым аэродинамическим качеством (планировать при спуске)

Аппарат в форме «фары»

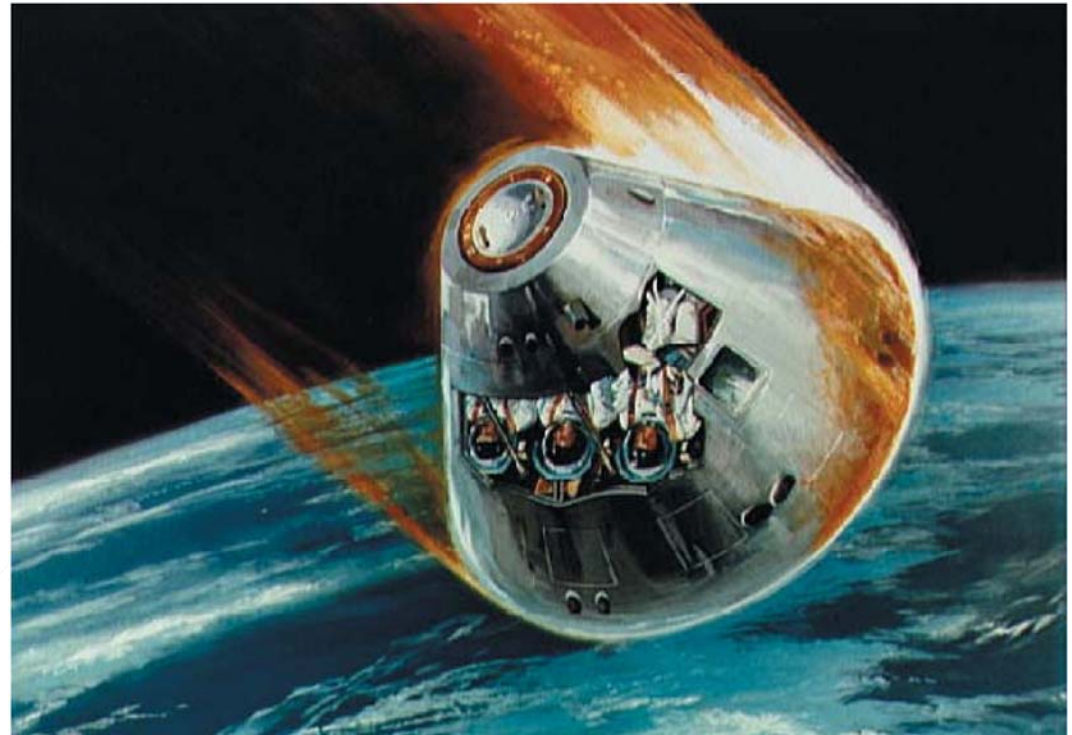
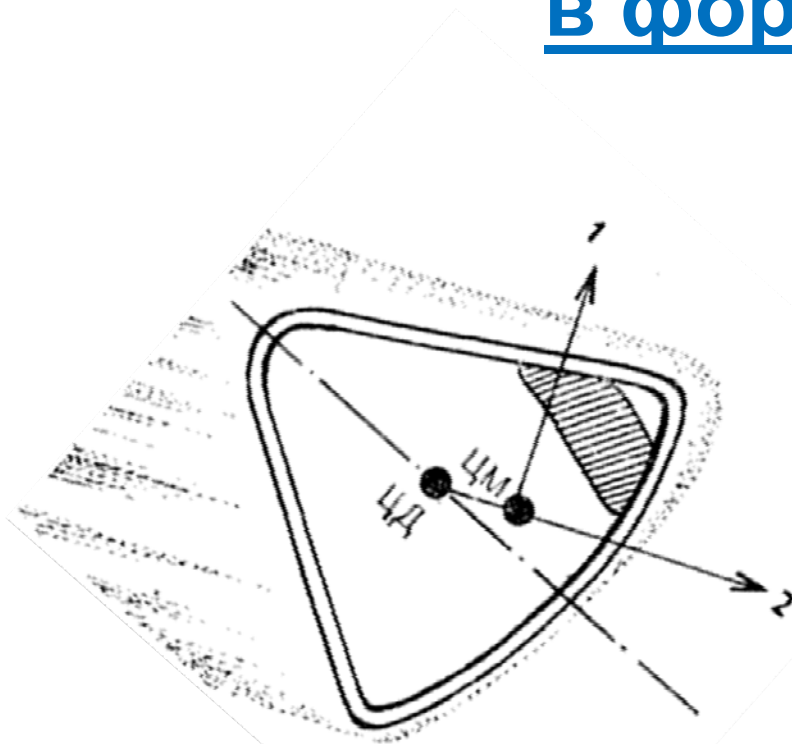
- Традиционным решением является аппарат в форме «фары»

Подобные аппараты
используются как в России



так и в США (NASA)

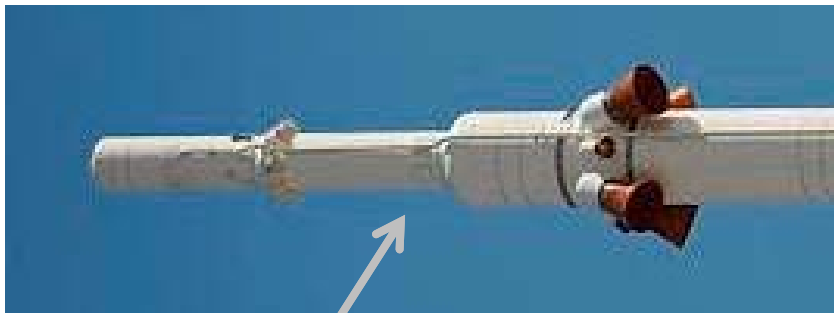
Возвращаемый аппарат (ВА) в форме «фары»



- 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

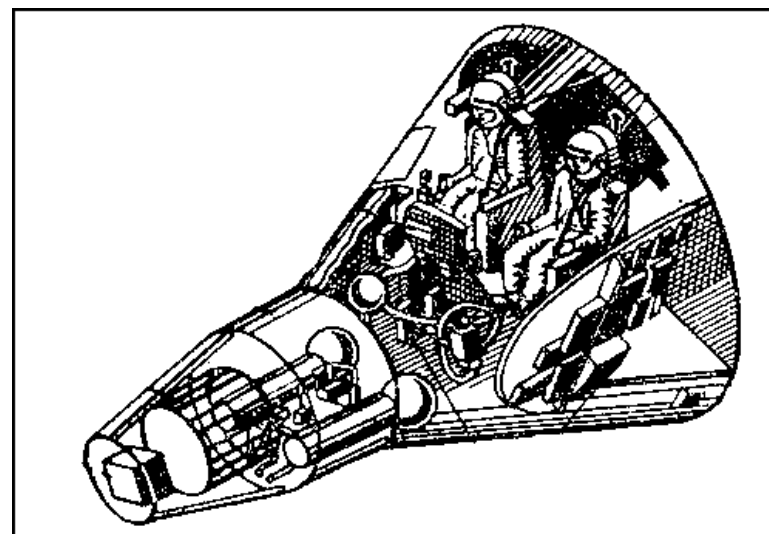
- При выводе на орбиту аппарат стыкуется с ракетой-носителем
 - Возвращаемый аппарат оснащается ракетным блоком аварийного спасения (РБАС) экипажа
 - При аварии ракеты-носителя (РН) РБАС срабатывает и уводит обитаемый возвращаемый аппарат корабля из опасной зоны



Ракетный блок
аварийного спасения



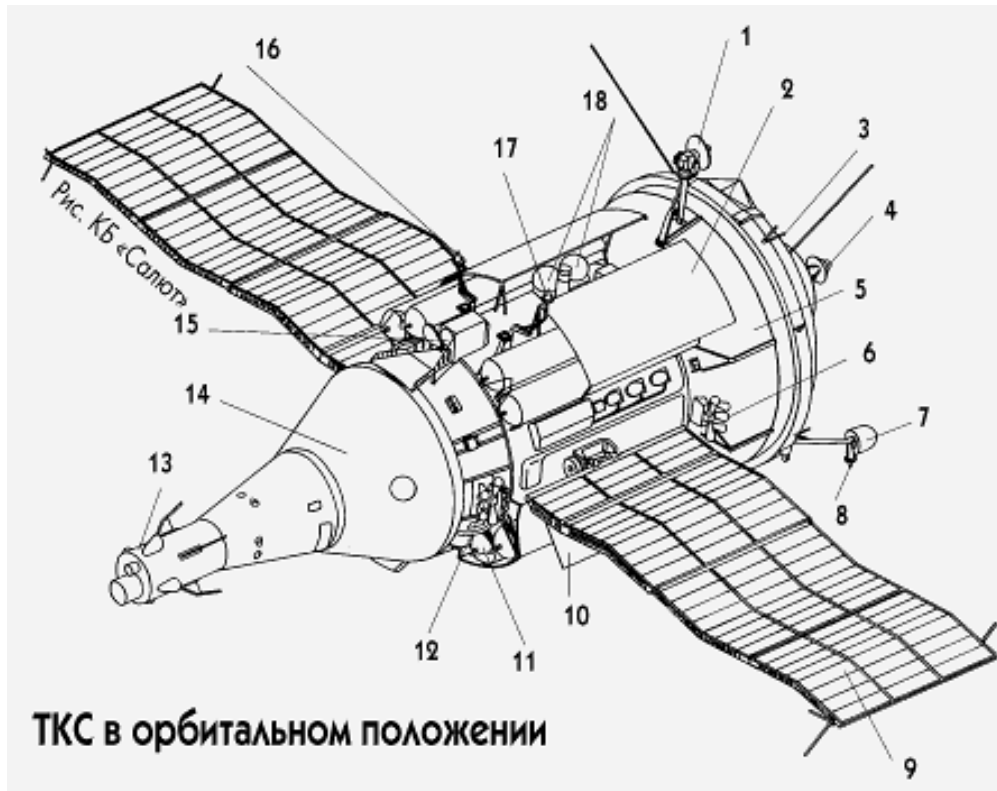
Ракета-носитель на стартовой площадке



Возвращаемый аппарат

Стыковка ВА с другими модулями на орбите

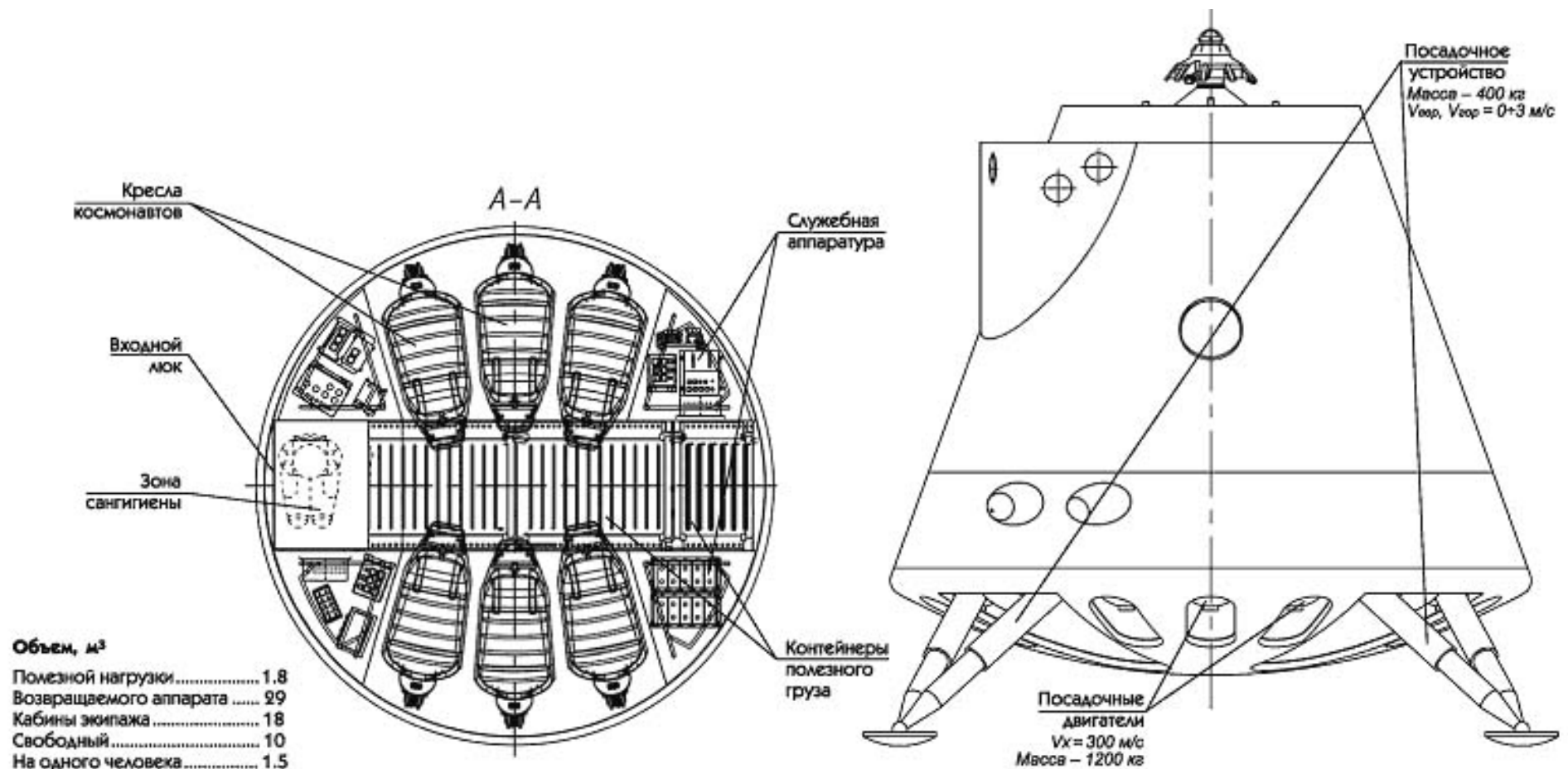
При орбитальном полете ВА стыкуется с другими модулями для формирования единого рабочего пространства



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

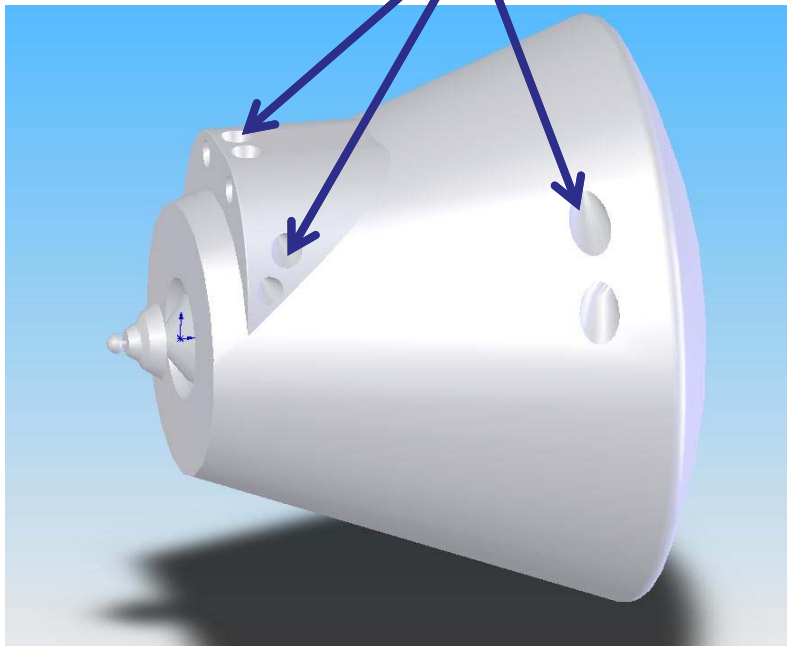
Схема ВА

- Для обеспечения точности посадки необходима система управления спуском

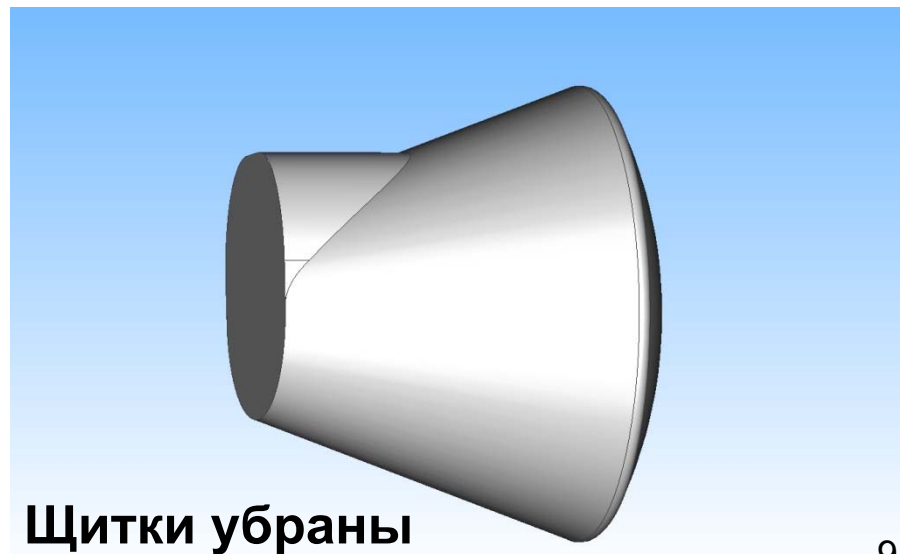
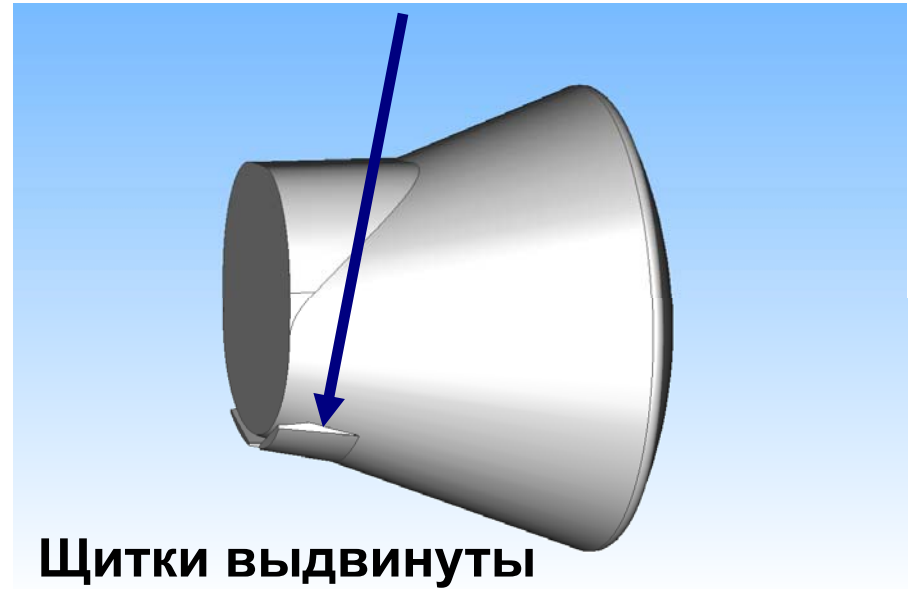


Системы управления спуском

Реактивные двигательные
установки



Балансировочные щитки



Разные задачи, связанные с орбитальной космонавтикой

1. Расчет обтекания ВА с балансировочными щитками
2. Расчет одиночной струи, истекающей из ВА
3. Расчет акустического воздействия РБАС на ВА при взлете
4. Расчет акустического воздействия работающих сопел РБАС

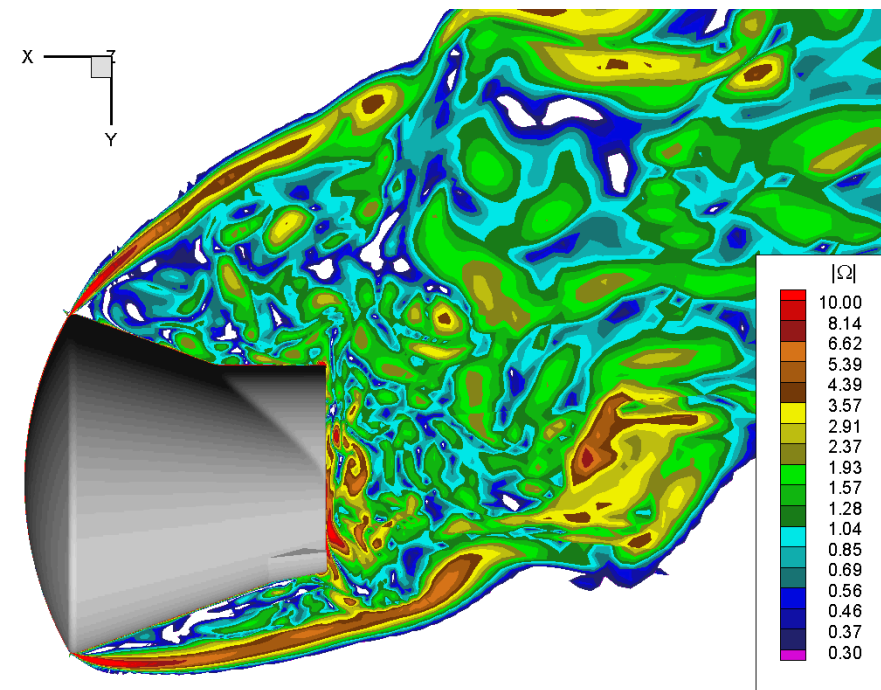
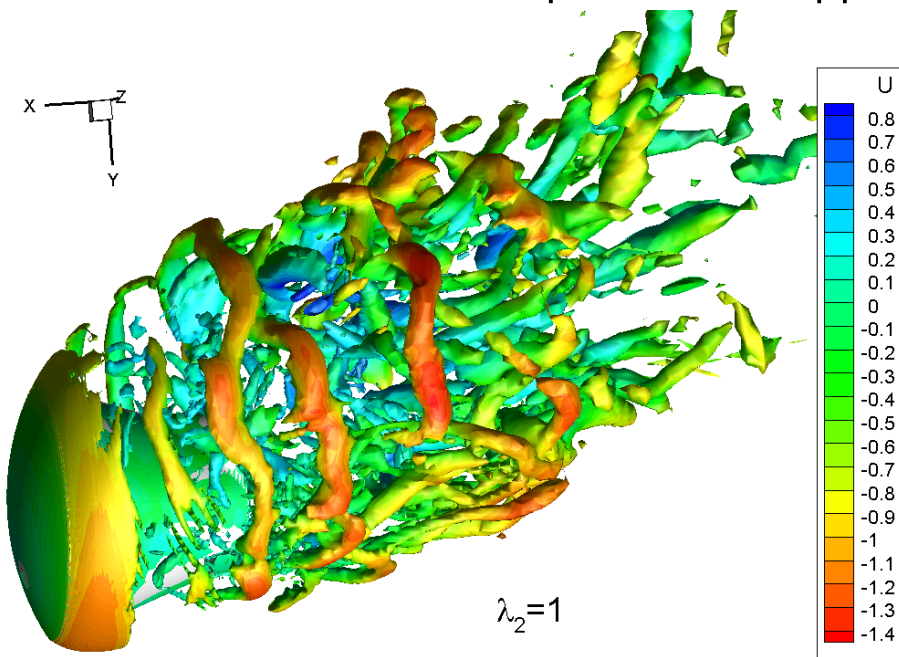
1. Расчет обтекания ВА с балансировочными щитками

- Высота полета 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°

$M_\infty=0.8$

$AoA=20^\circ$

высота – 15 km

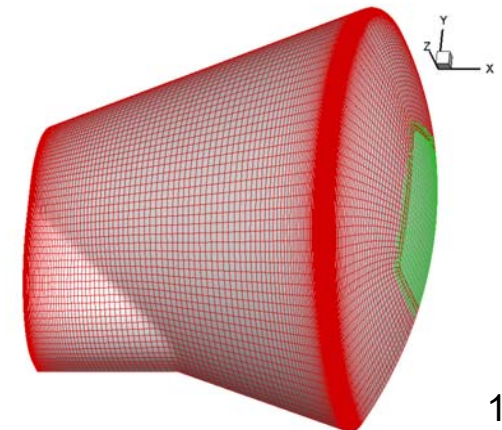
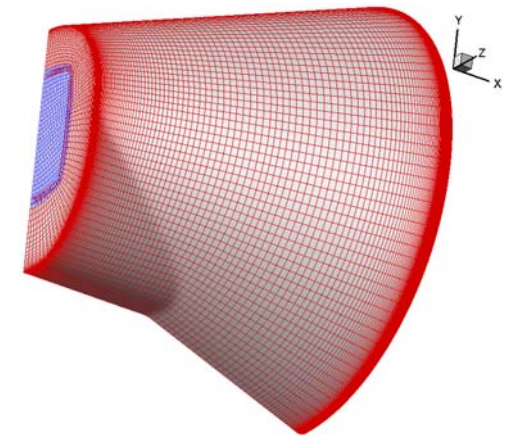
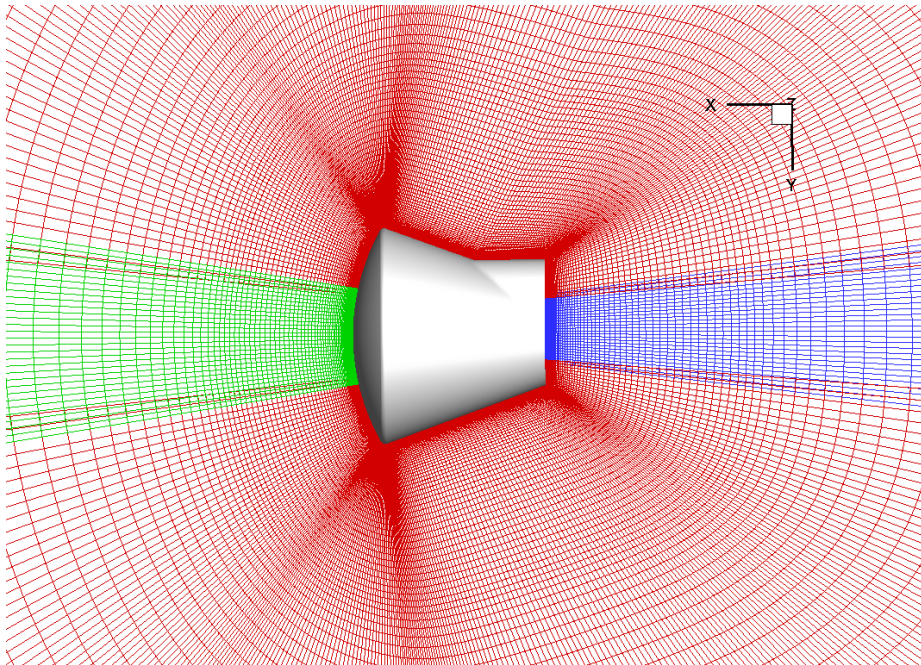


Изоповерхность “закрутки” $\lambda_2=1$

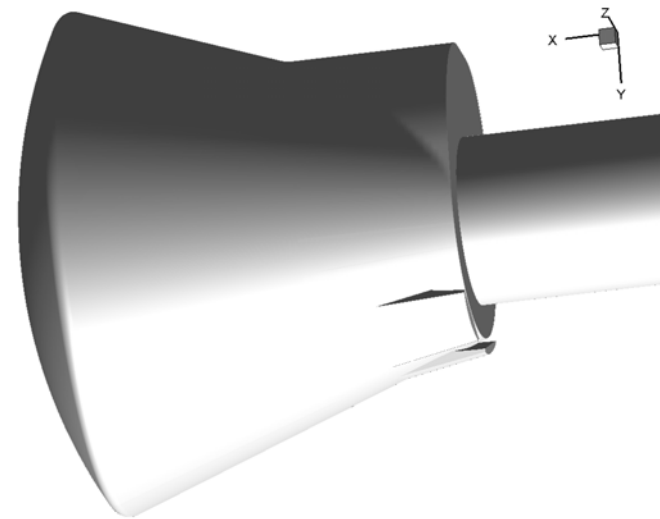
Завихренность

Расчетная область и сетка

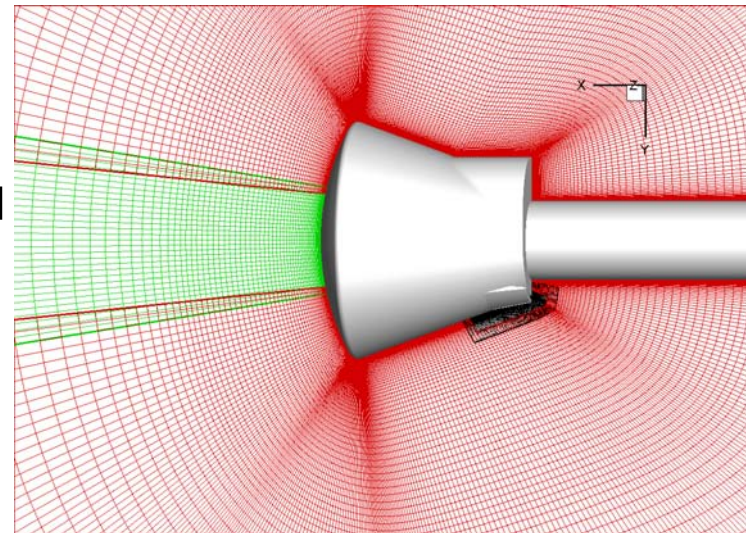
- Уравнения газовой динамики решались численно
 - Расчетная область – шар $R=150$ м
 - Размер расчетной сетки от 2.5 до 5 миллионов узлов



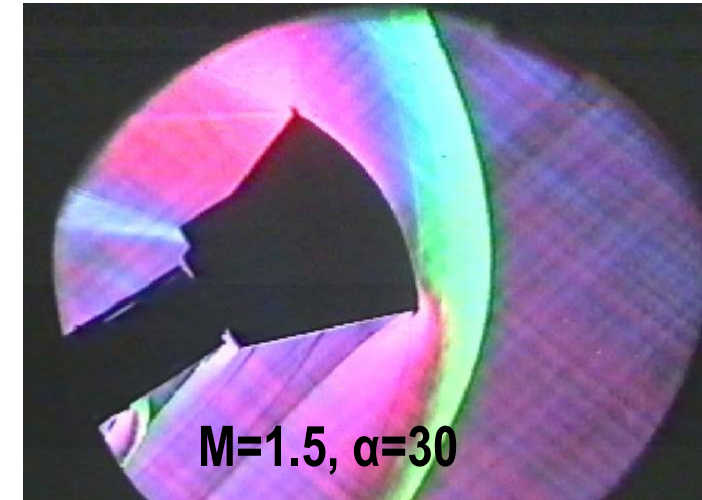
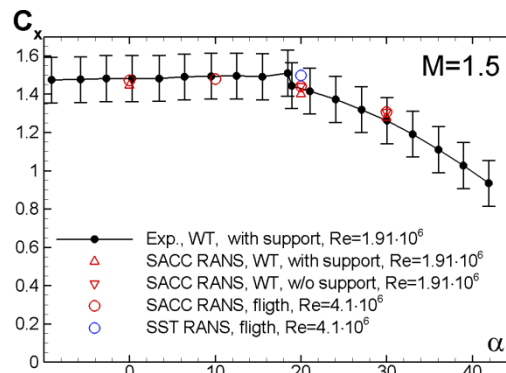
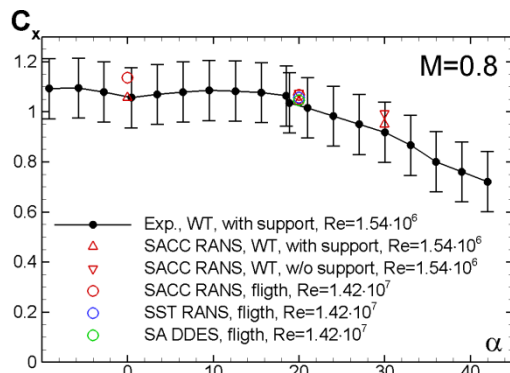
Модификация сетки для расчета обтекания ВА в аэродинамической трубе



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



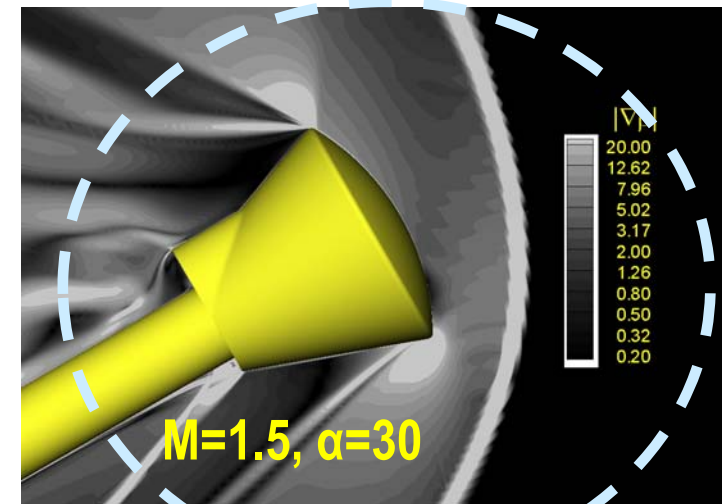
Сравнение с экспериментом



Экспериментальная Шлирен-фотография

- Отличия рассчитанных сил сопротивления от экспериментальных данных лежат в пределах точности эксперимента

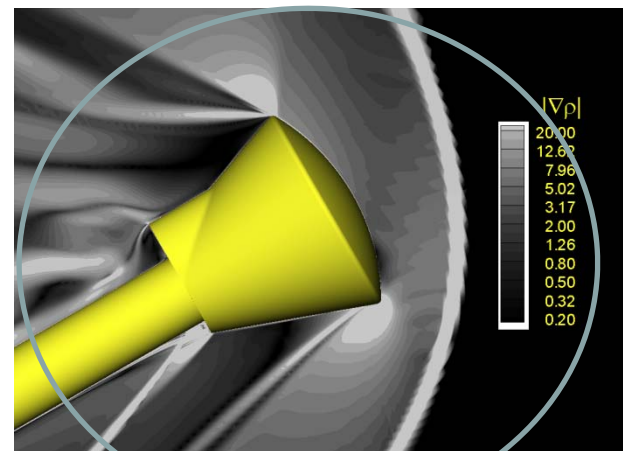
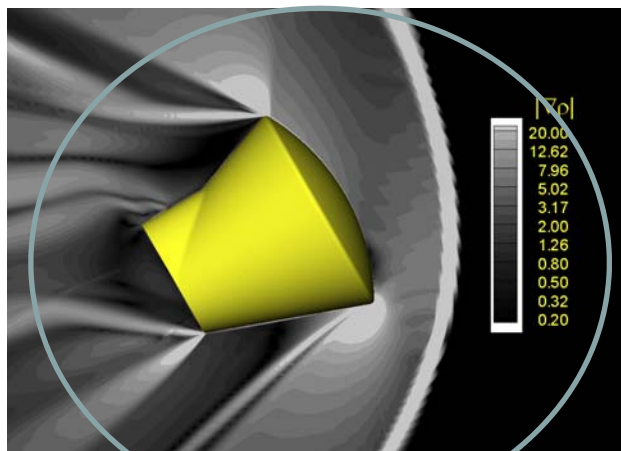
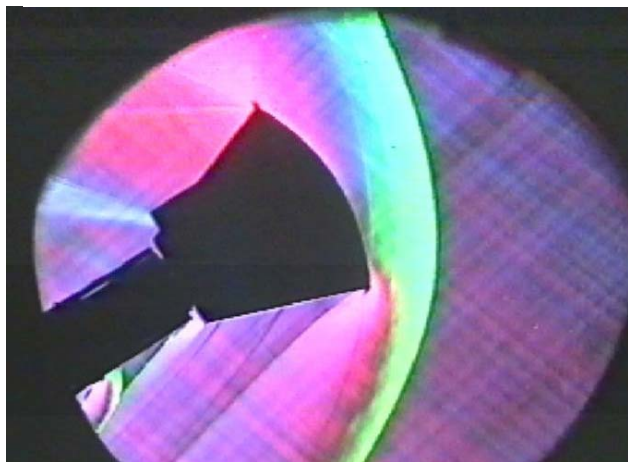
– Расчетная модель адекватна



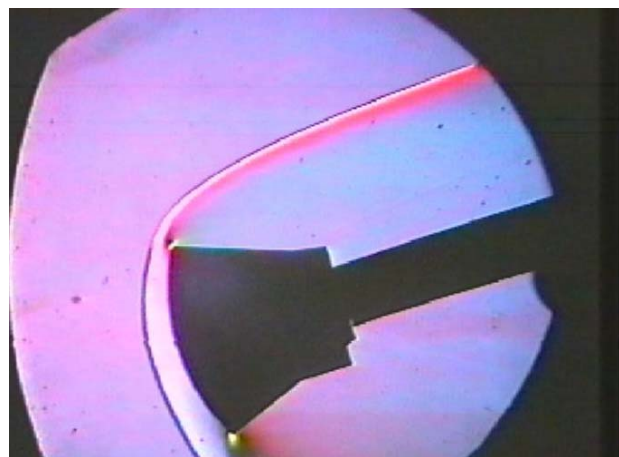
Численный Шлирен ($|\text{grad } \rho|$)

Влияние державки и числа Рейнольдса

Наличие державки сказывается только в ее непосредственной близости



$M=1.5, \alpha=30, \delta_{щ}=0$



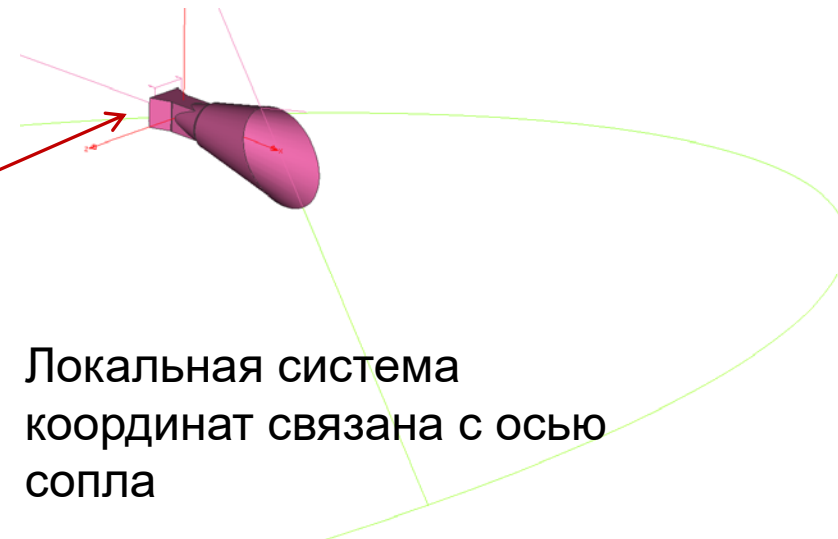
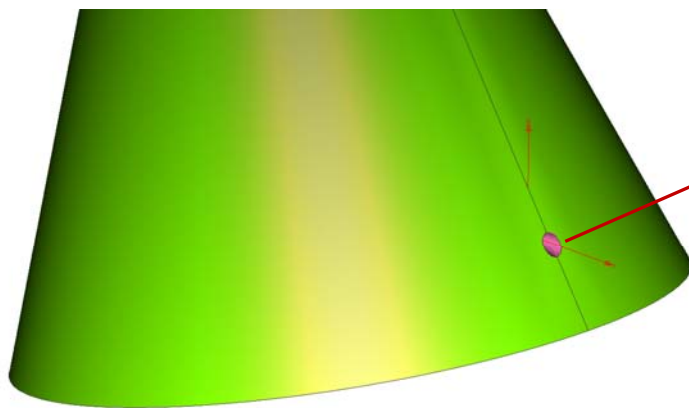
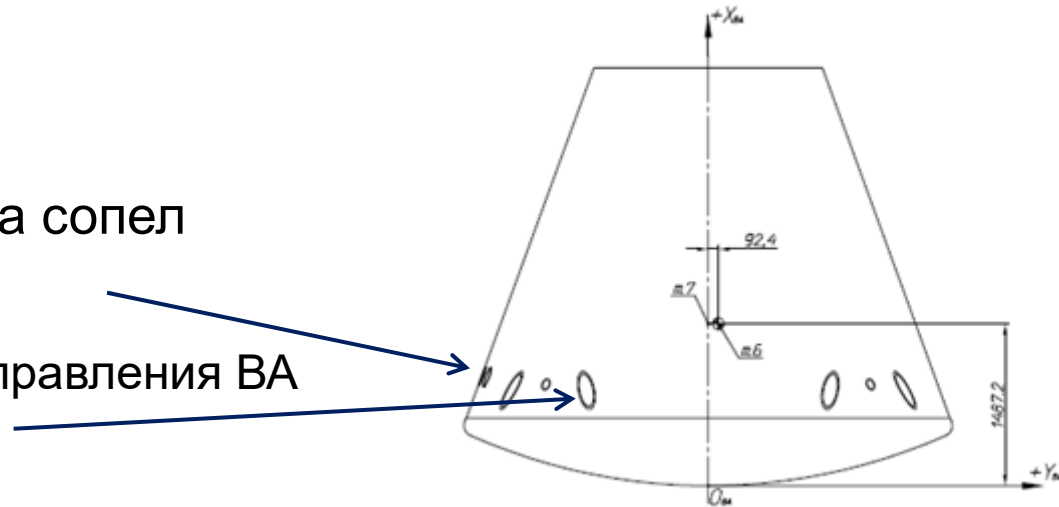
$M=6.0, \alpha=20, \delta_{щ}=10$

Сравнение экспериментальных Шлирен-фотографий с результатами расчетов

2. Расчет одиночной струи, истекающей из ВА

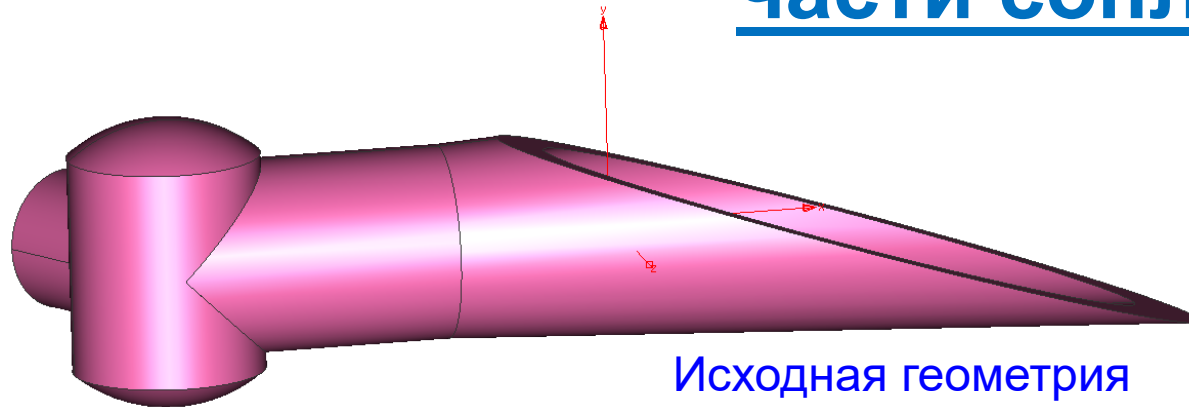
Рассматриваются два типа сопел

- Горизонтальное сопло
 - Предназначено для управления ВА
- Вертикальное сопло
 - Обеспечивает дополнительное торможение при посадке



Локальная система
координат связана с осью
сопла

Упрощенная геометрия проточной части сопла

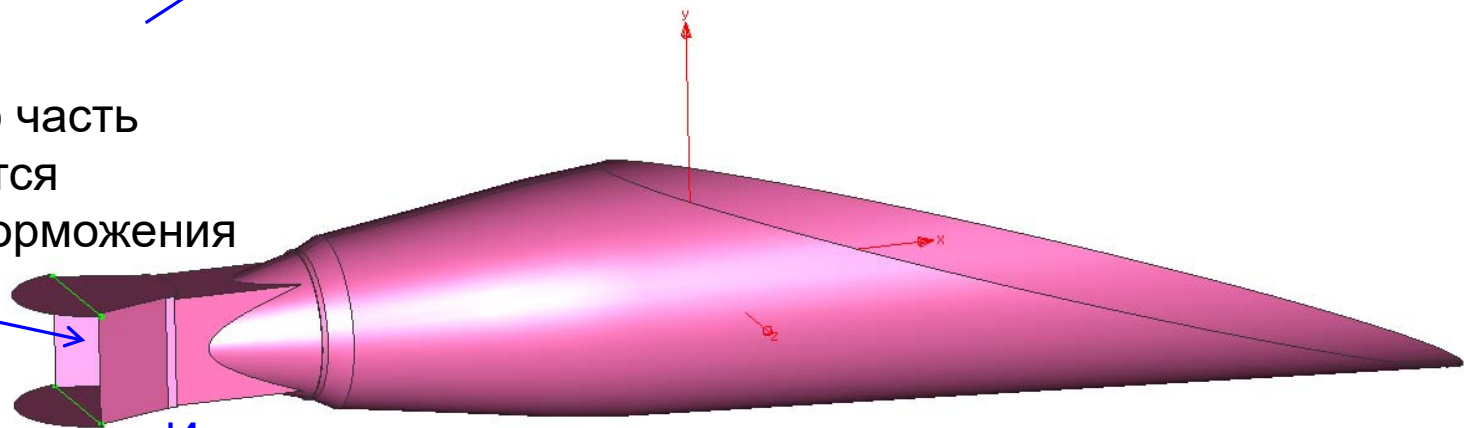
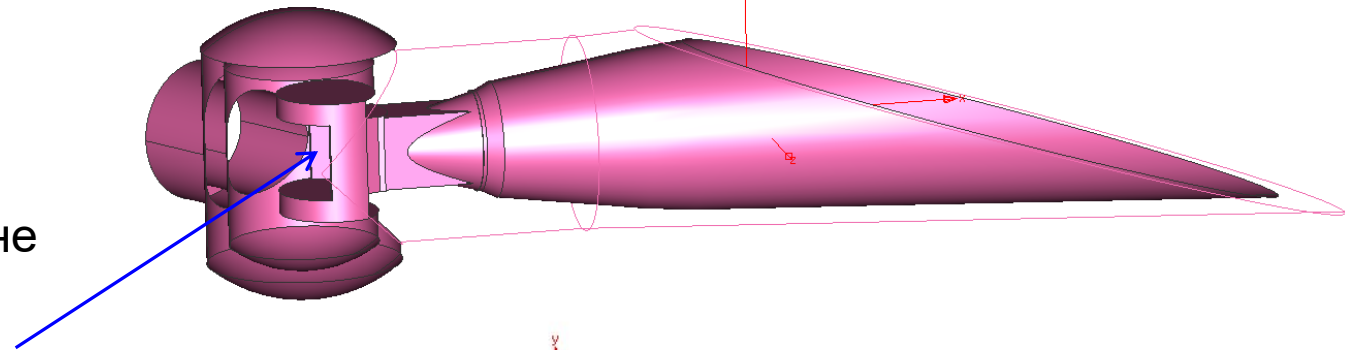


Предполагается, что критическое сечение сопла полностью открыто

Исходная геометрия

Упрощения

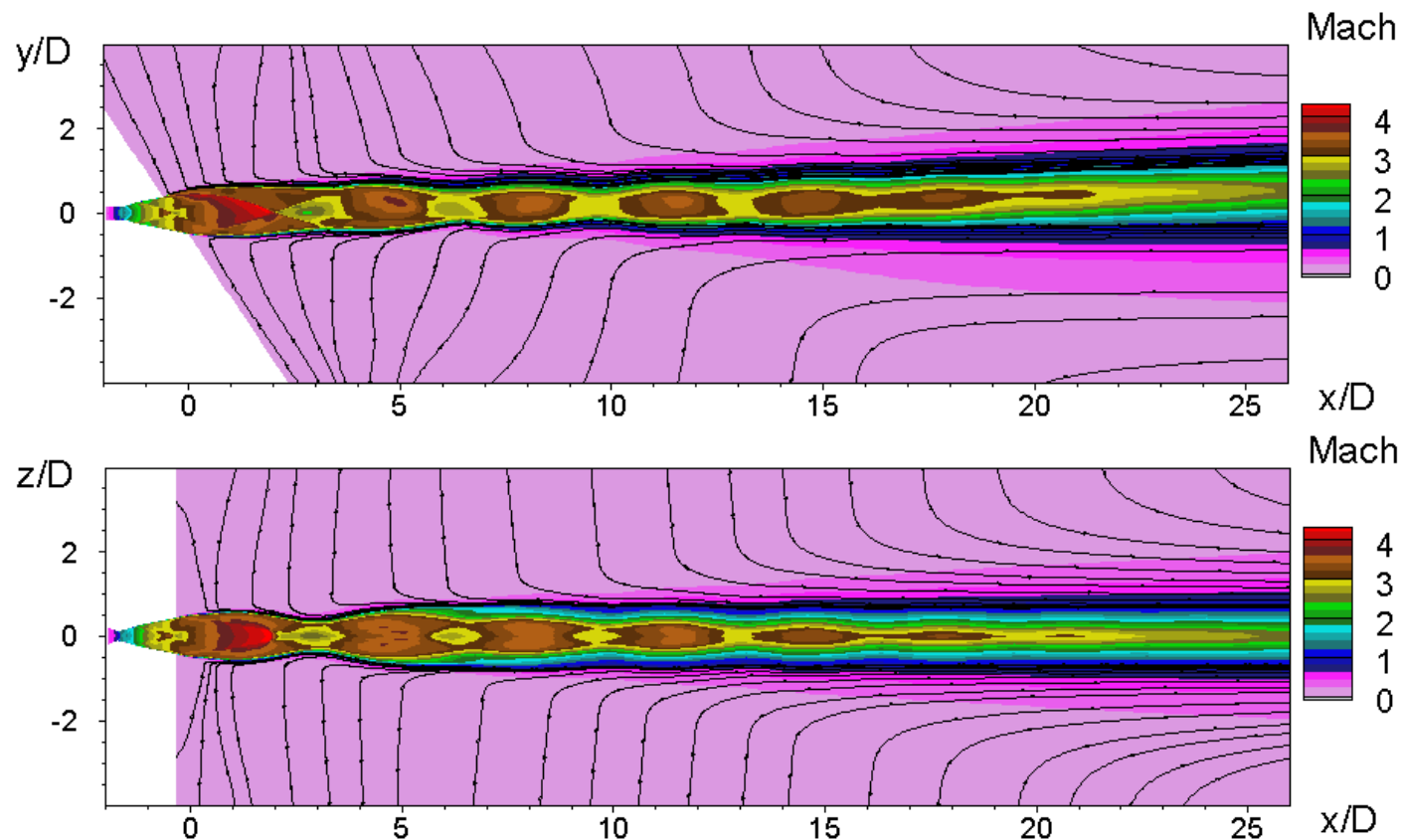
- Течение в камере не рассматривается
- На входе в конфузорную часть сопла задаются параметры торможения потока



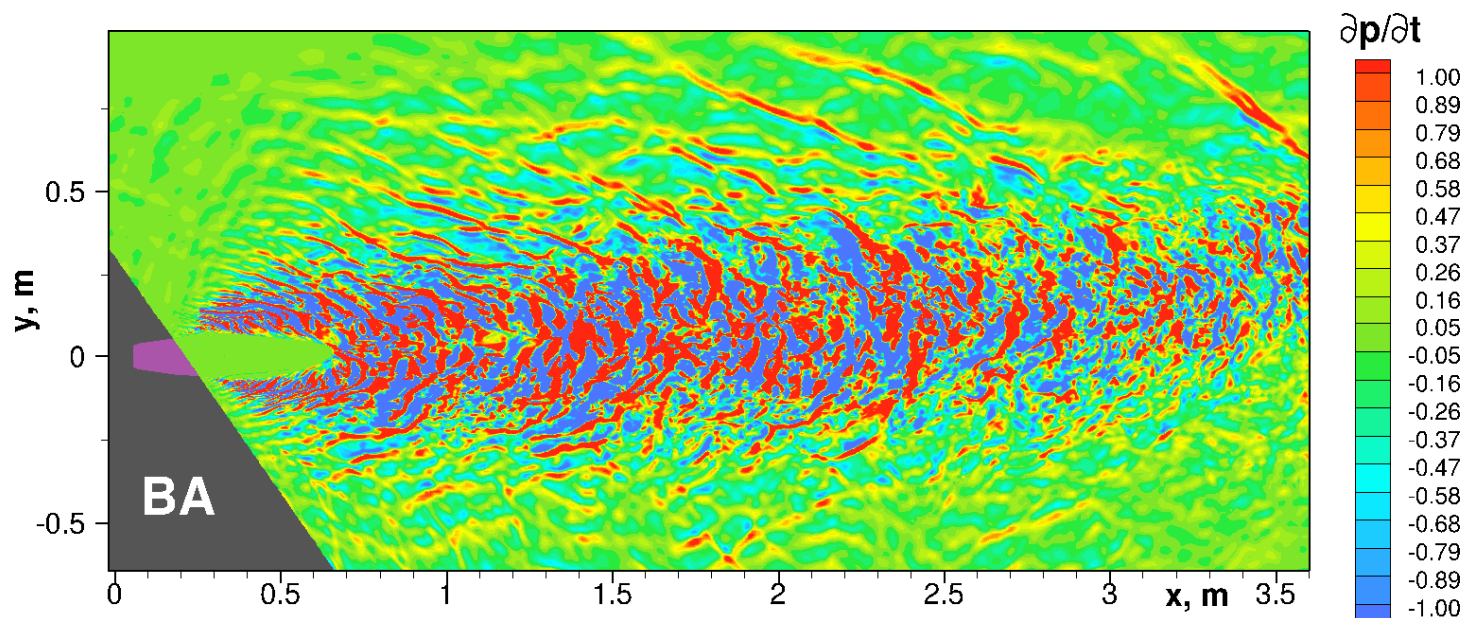
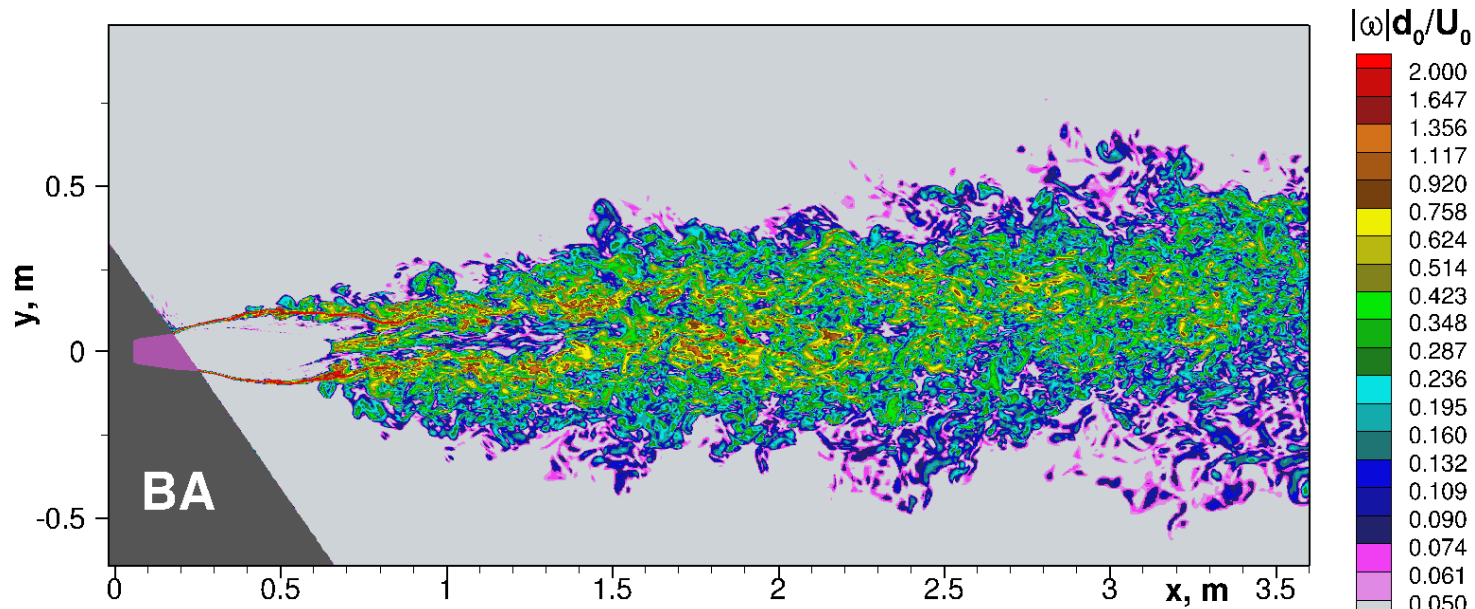
Используемая геометрия

Горизонтальный двигатель

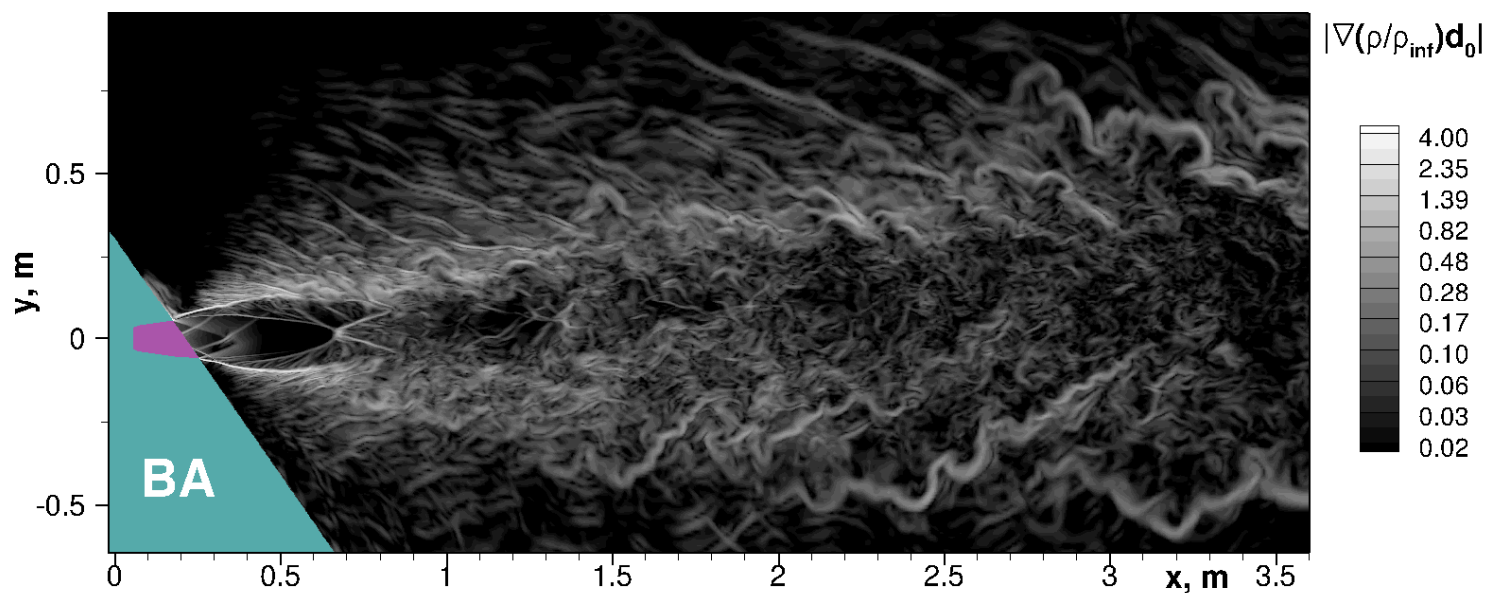
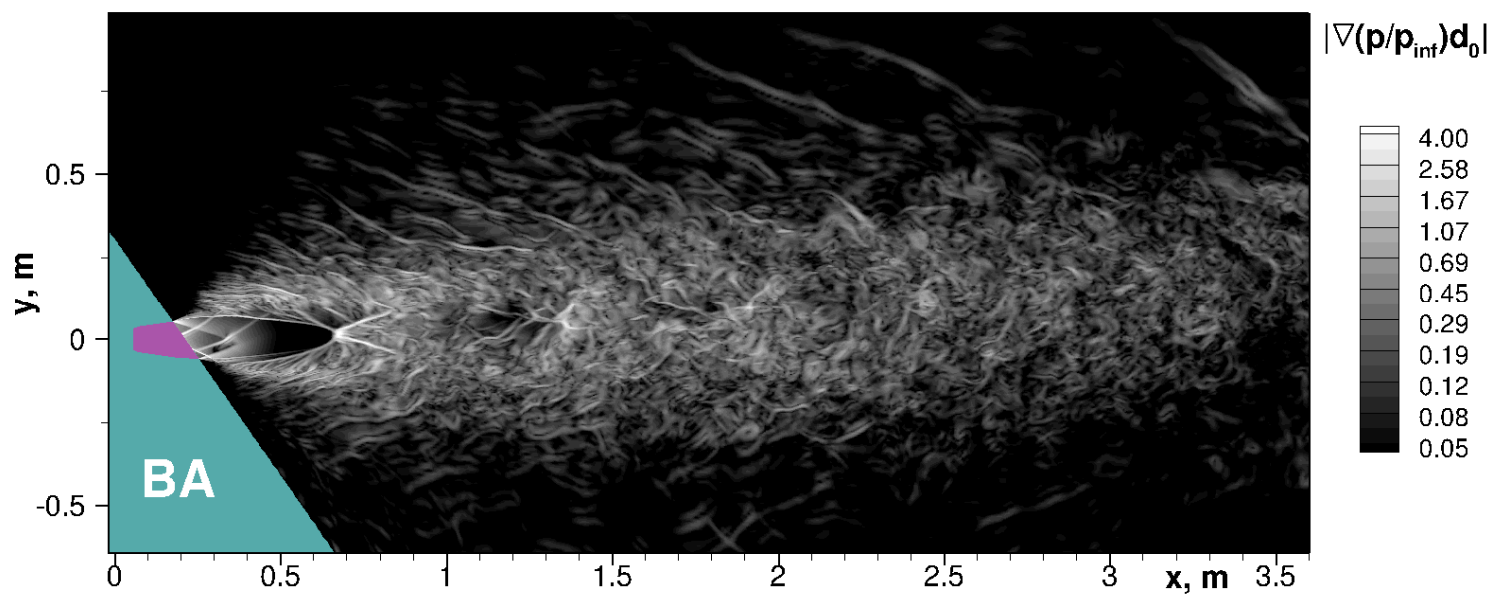
- Сильно недорасширенная, сверхзвуковая горячая струя
 - Разрешается 6-7 бочек
 - ✓ Число Маха в первой бочке достигает 4
- Скос сопла практически не приводит к отклонению струи
- Существенно неоднородный поток внутри сопла



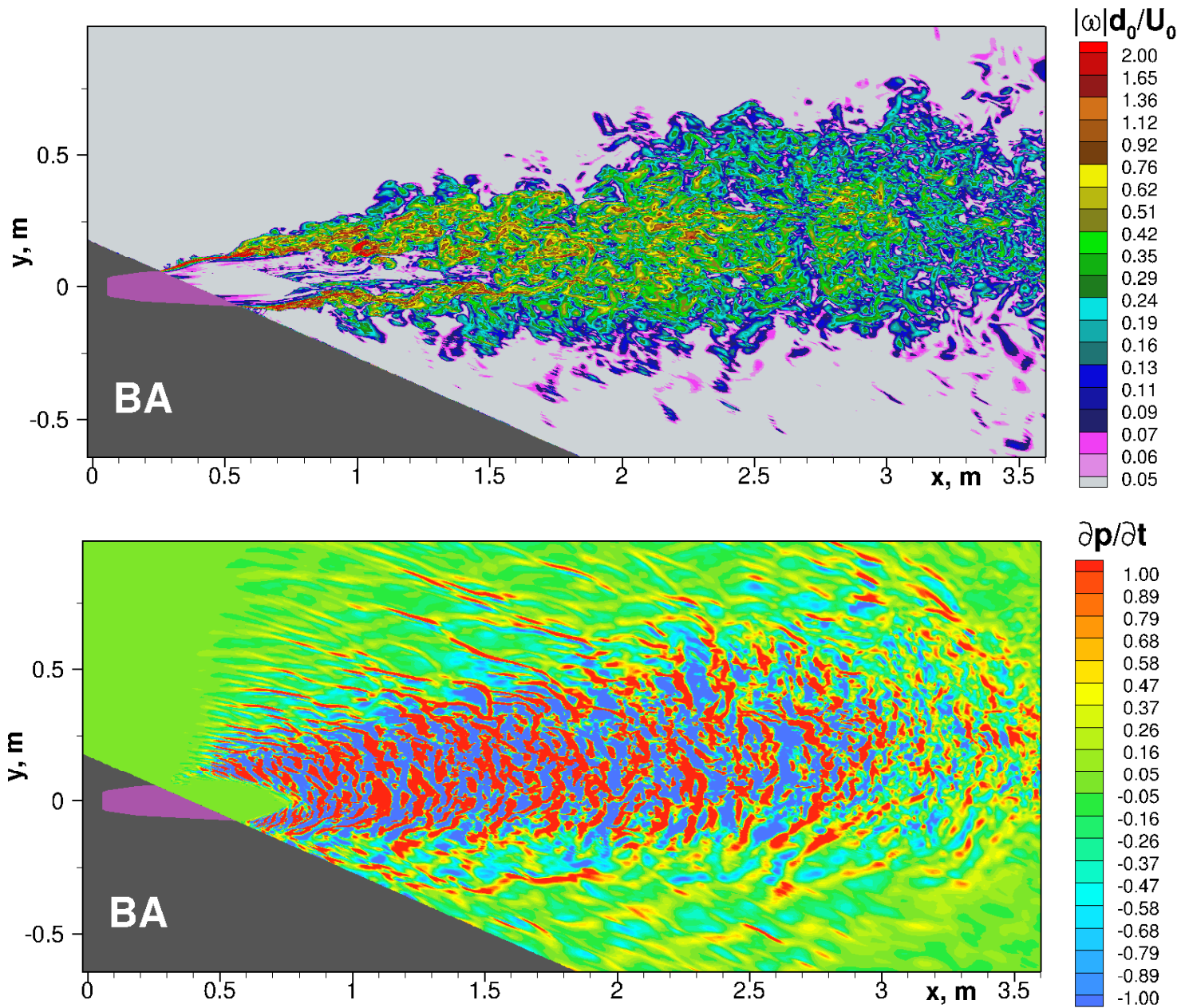
Визуализация течения



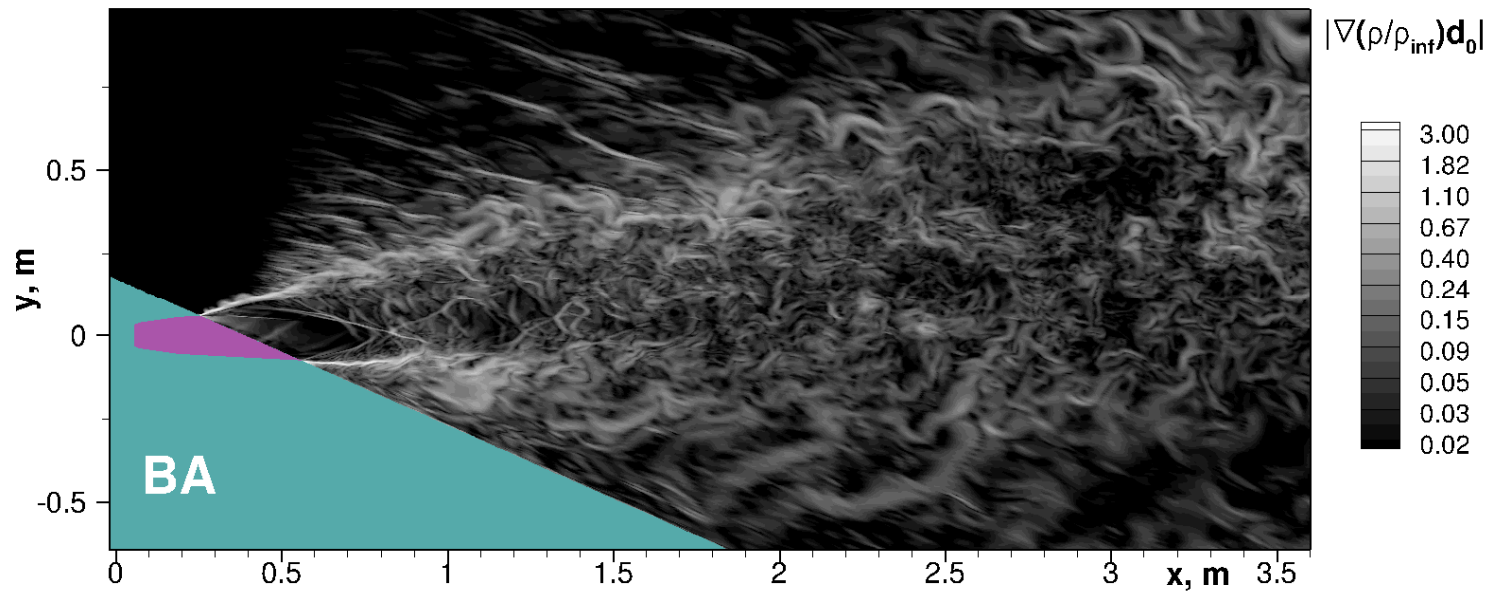
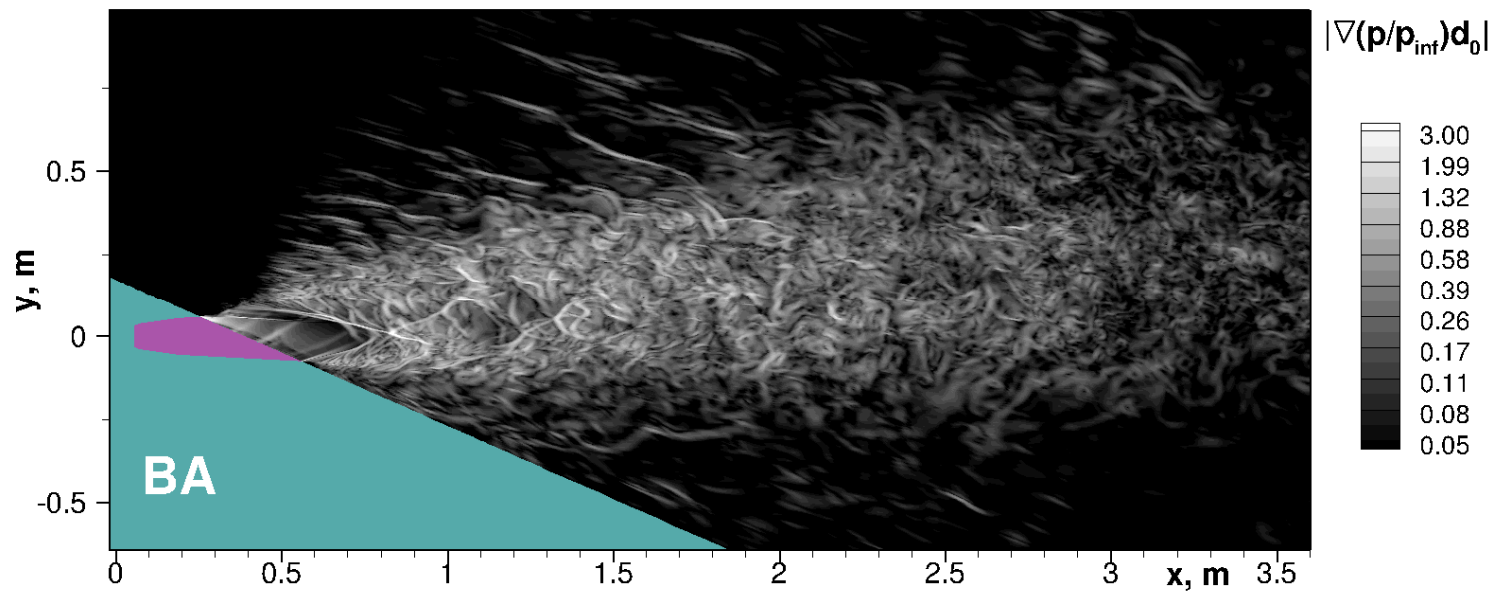
Моделирование «теневаых фотографий»



Вертикальный двигатель



Вертикальный двигатель

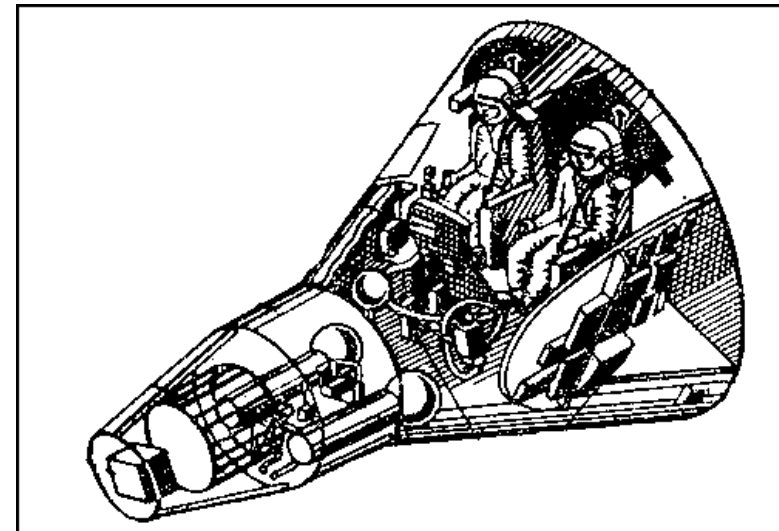


3. Расчет акустического воздействия РБАС на ВА при взлете



Ракетный блок аварийного спасения (РБАС)

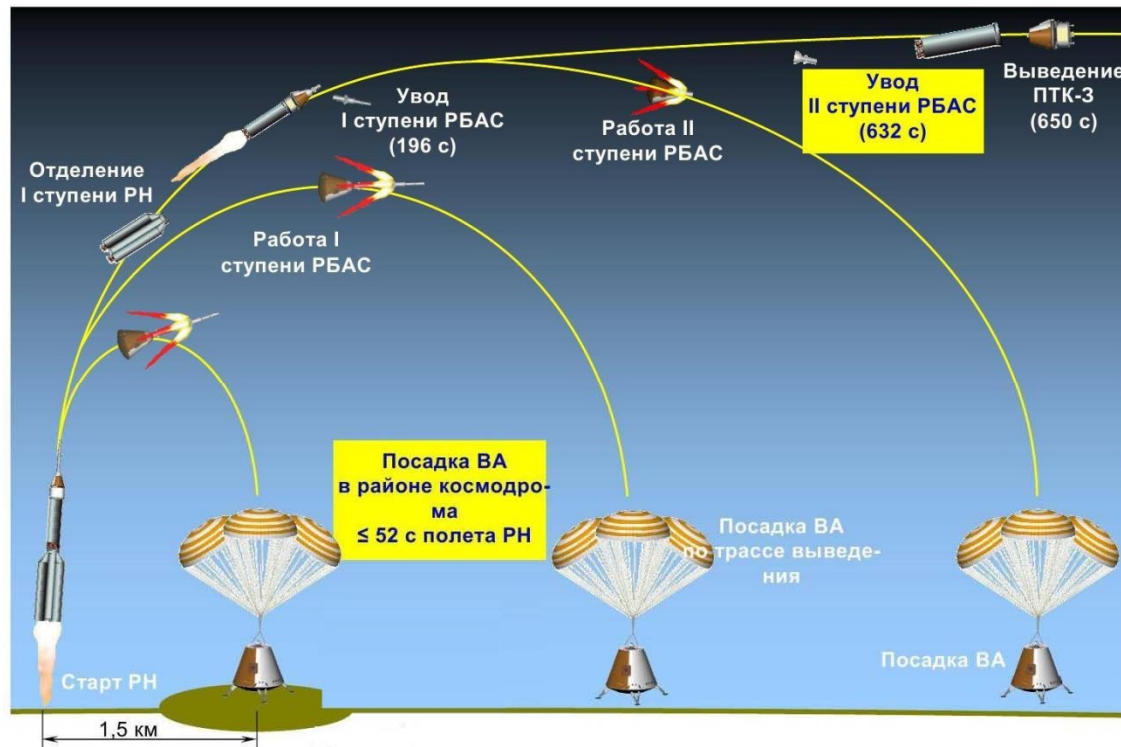
При выводе на орбиту пилотируемого корабля ракета-носитель оснащается системой аварийного спасения (САС) экипажа



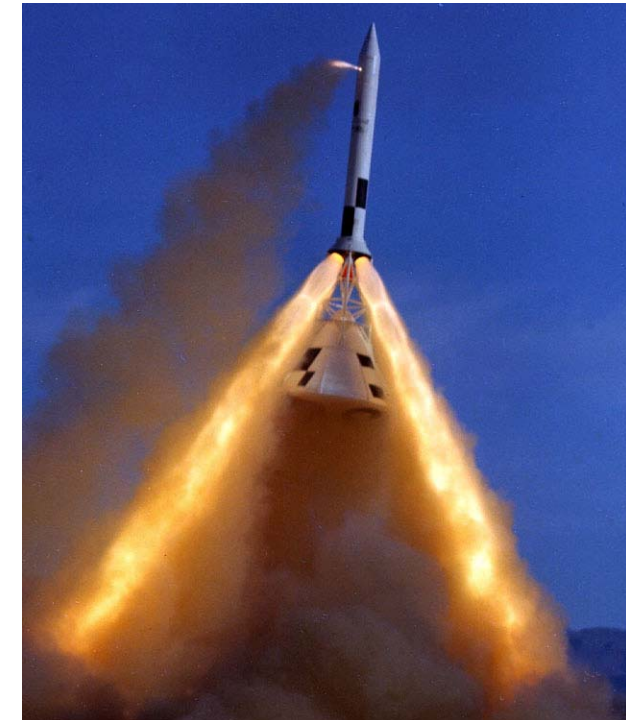
Возвращаемый аппарат (ВА)

Назначение ракетного блока аварийного спасения

- При аварии ракеты-носителя (РН) РБАС срабатывает и уводит обитаемый возвращаемый аппарат (ВА) корабля из опасной зоны



Аварийное спасение экипажа на участке выведения



Испытания системы спасения космического корабля Аполлон. Июнь 1965 года

Срабатывание системы аварийного спасения

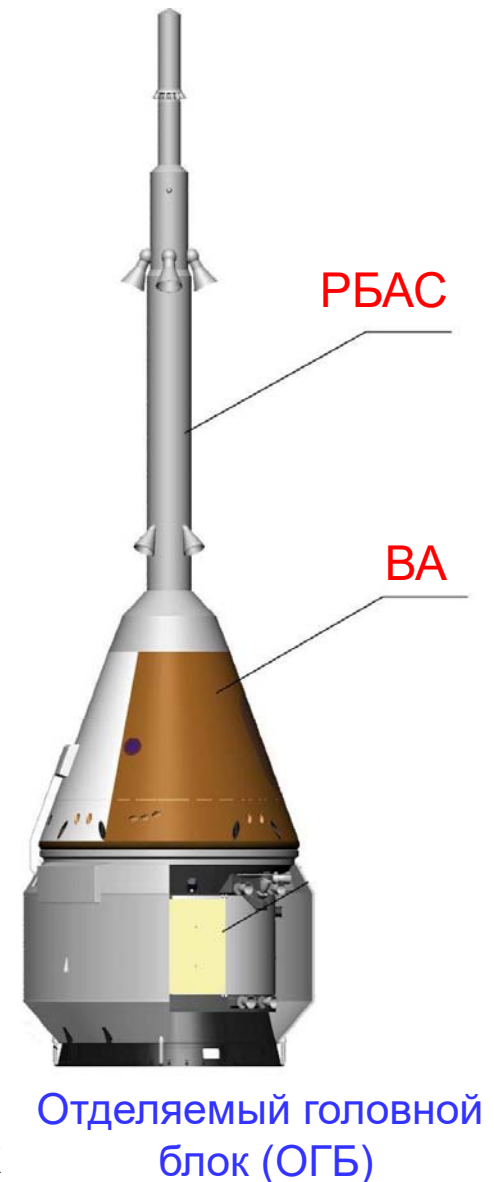
- Известно 2 случая срабатывания САС в пилотируемой космонавтике
 - 5 апреля 1975 года — Союз-18-1 (Василий Лазарев и Олег Макаров)
 - ✓ Не отделилась вторая ступень ракеты-носителя. САС отстрелила спускаемый аппарат и он по суборбитальной траектории вернулся на Землю (перегрузки около 26 g)
 - 26 сентября 1983 года — Союз Т-10-1 (Владимир Титов и Геннадий Стрекалов)
 - ✓ Взрыв ракеты-носителя на стартовом столе. САС подняла спускаемый аппарат на 950 м, где произошло раскрытие парашюта (перегрузки от 14 до 18 g)
- Остальные случаи срабатывания САС происходили на беспилотных кораблях
 - Союз 7Л, Союз 7К, МР-1 и др.



Срабатывание САС корабля Меркурий-Редстоун-1 (МР-1)
21 ноября 1960 года

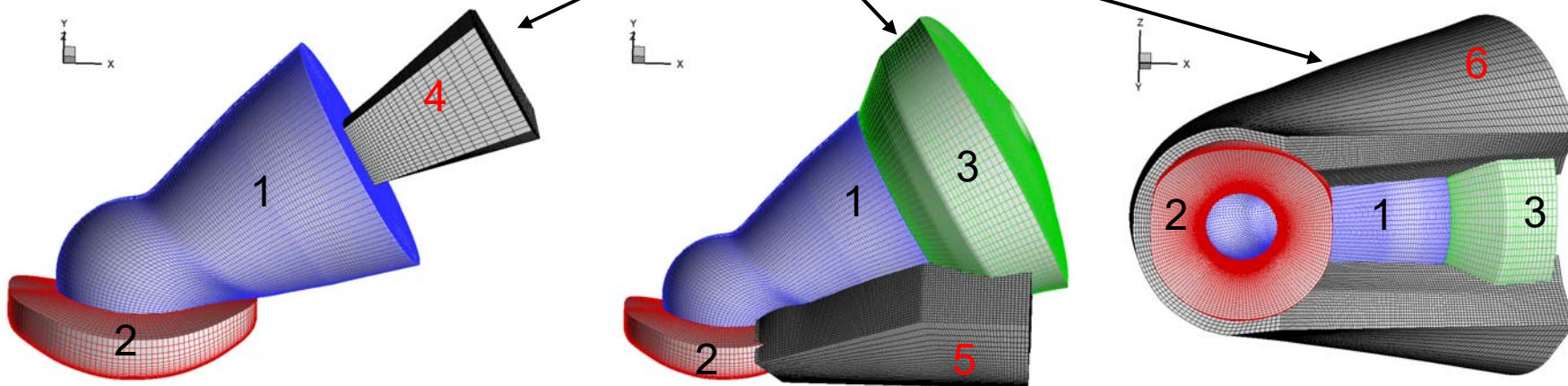
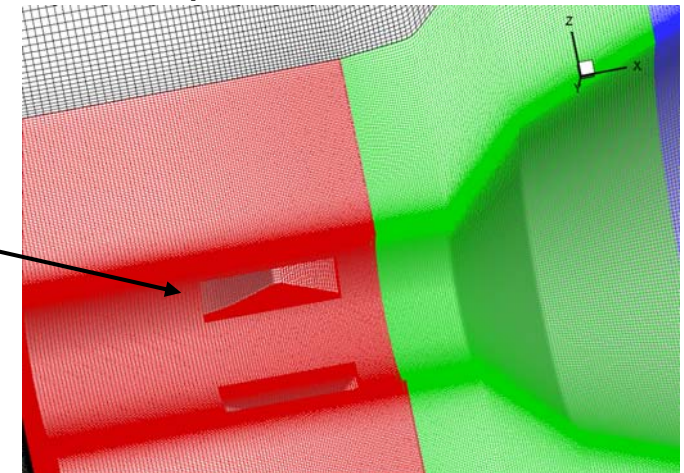
Воздействие сопел РБАС на ВА

- Одной из важных задач при проектировании нового пилотируемого корабля является снижение аэроакустических нагрузок на элементы конструкции корабля на участке выведения на орбиту
 - Особое внимание уделяется обитаемому модулю - возвращаемому аппарату (ВА)
- При отсутствии головного обтекателя эти нагрузки в значительной степени обусловлены натеканием на поверхность ВА турбулентного потока
 - Существенный вклад вносит турбулентный след за соплами РБАС
- **Задача работы** состоит в расчетном определении аэроакустических нагрузок на поверхность ВА
 - Использование осредненные по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) не позволяют получить требующуюся для этого информацию об амплитудных и спектральных характеристиках пульсаций давления
 - ✓ **Необходимо использование вихреразрешающих подходов к описанию турбулентности**



Сетка для LES расчета

- NTS код использует блочно-структурированные сетки типа «химера»
 - Блоки сетки перекрываются и могут иметь «вырезы»
- Удовлетворяет общепринятым критериям для WMLES сеток
 - Шаг сетки не превышает $\delta/10$ вдоль потока и $\delta/20$ поперек потока (δ - локальная толщина пограничного слоя)
- Общий размер сетки составляет примерно 26 млн. ячеек
 - В базовой сетке сделаны «вырезы» вокруг сопел РДЭО
 - Для заполнения образовавшихся пустот построены дополнительные блоки сетки



Эксперимент ЦАГИ

- В 2016 году в ЦАГИ на АДТ-128 под руководством Сергея Михайловича Дроздова и Евгения Павловича Столярова были выполнены эксперименты с моделью космической головной части (КГЧ) в масштабе 1:20
- Модель воспроизводит геометрические обводы КГЧ и фрагмента РН

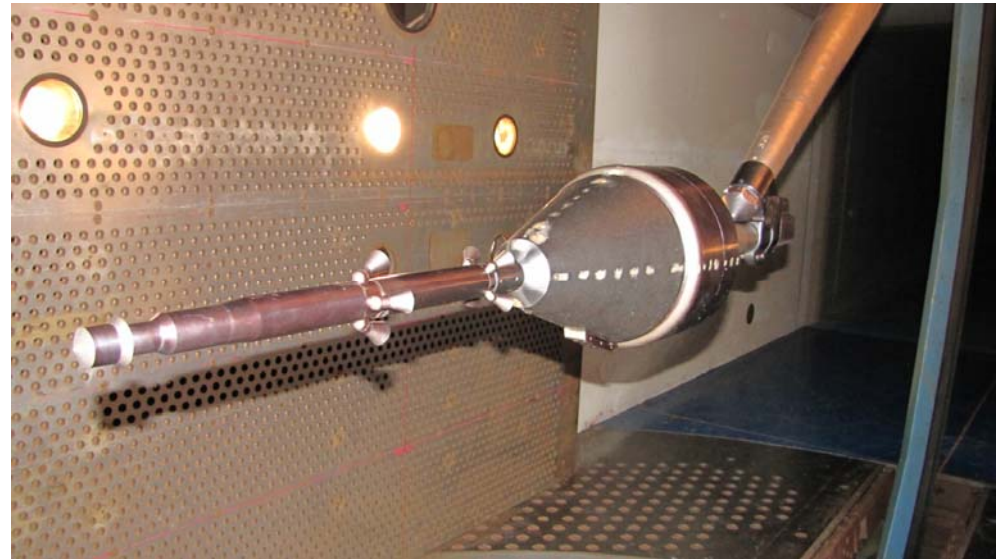
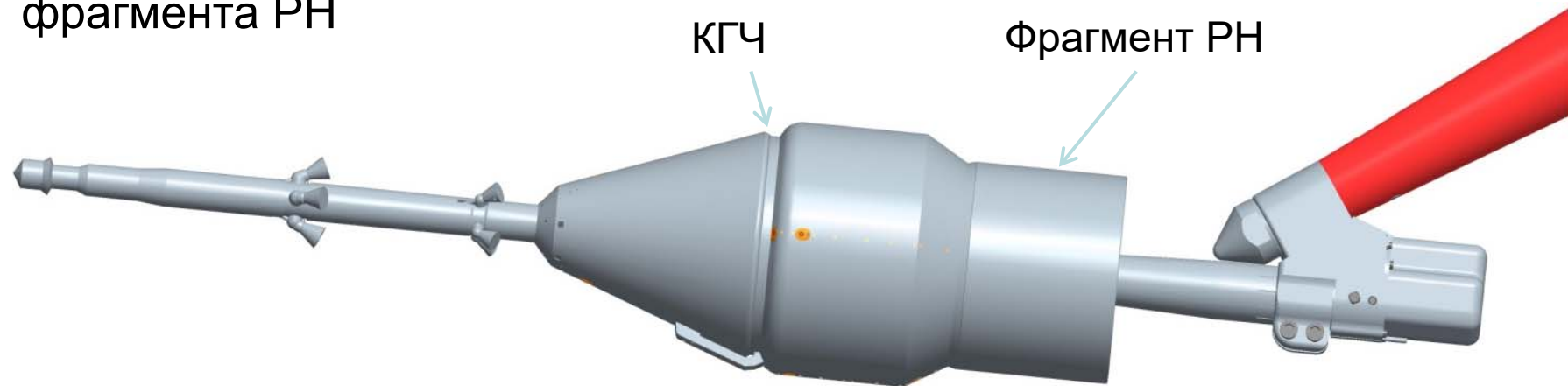


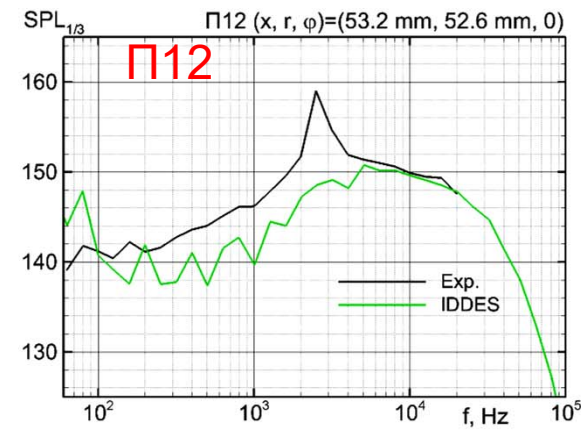
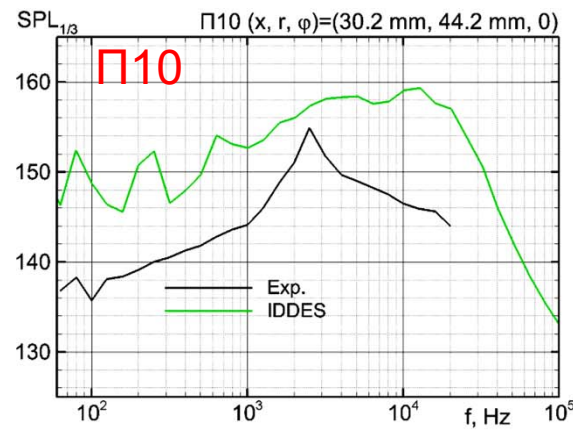
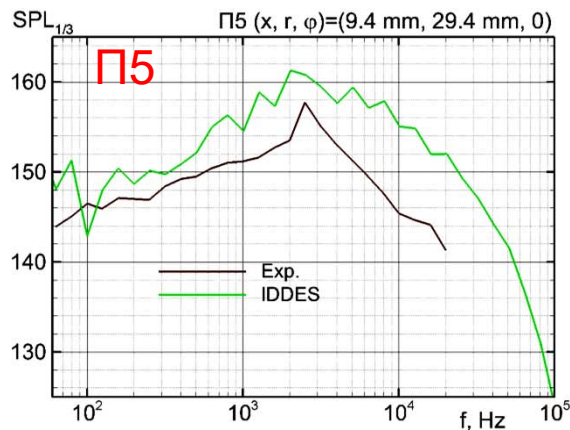
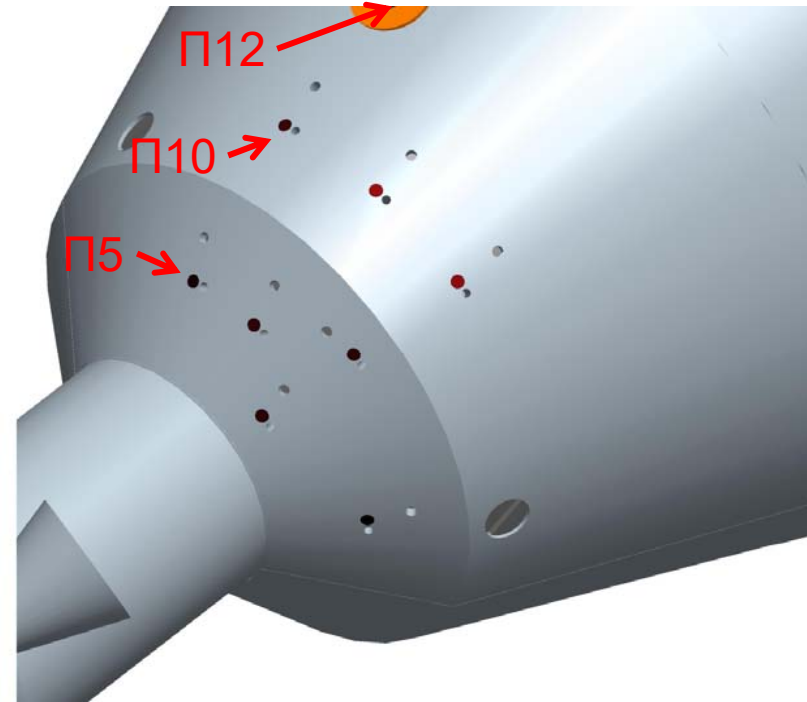
Фото модели КГЧ в рабочей части Т-128



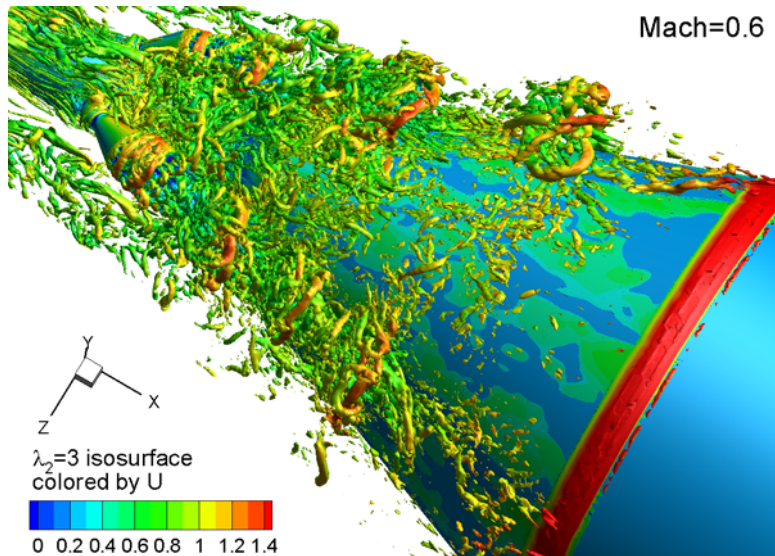
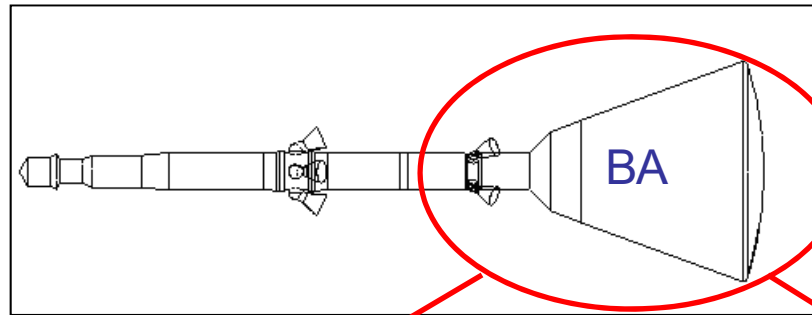
Экспериментальная модель

Сравнение спектров в точках П5, П10, П12

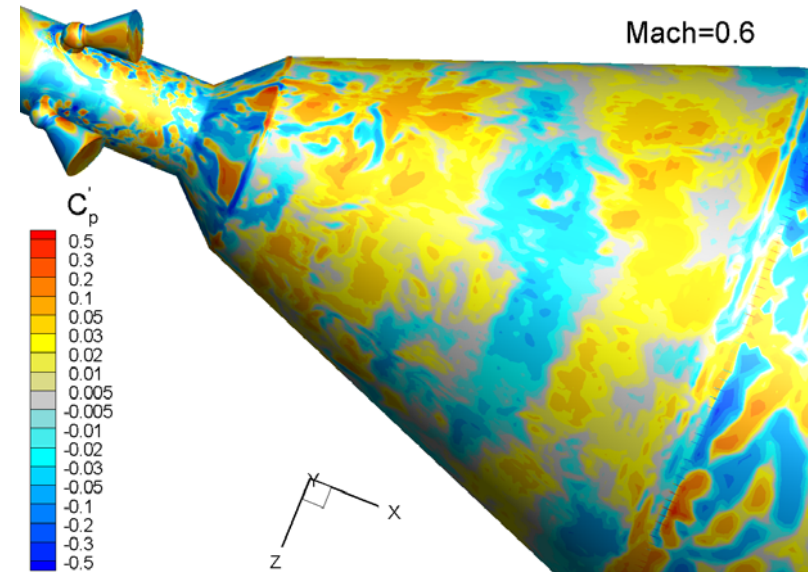
- Во всех точках в эксперименте наблюдается пик при $f=2.5$ кГц, обусловленный фоновым шумом трубы (в расчете он отсутствует)
- В окрестности «излома» геометрии (точки П5 и П10) расчетные спектры завышены на 5-10 децибел
 - Возможные причины рассогласования обсуждаются на следующем слайде
- В точке П12 расчет и эксперимент согласуются вполне удовлетворительно



Анимация течения



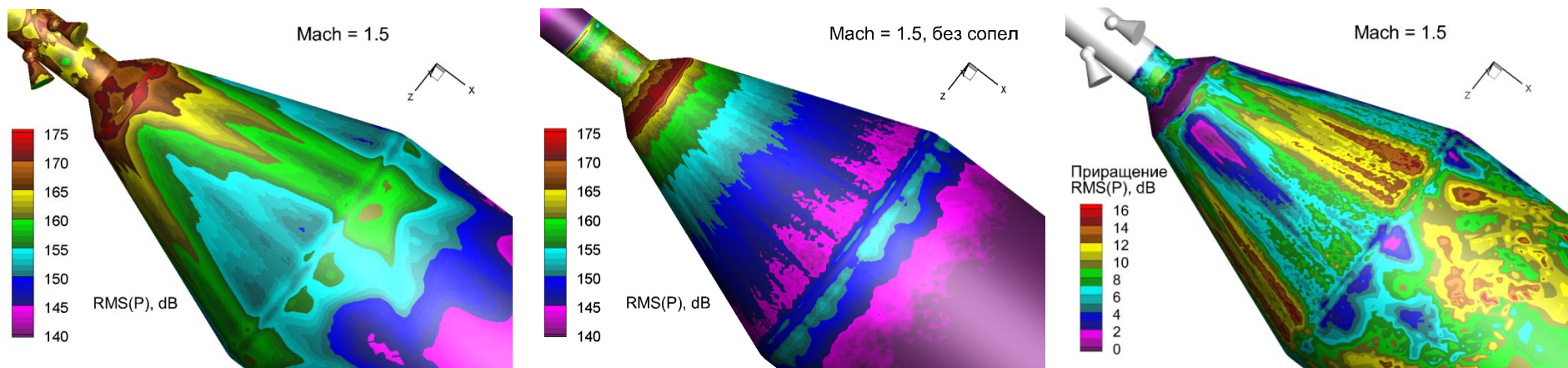
Анимация картины течения



Анимация поля давления на поверхности ВА

Влияние сопел ОРД и РДЭО (1/2)

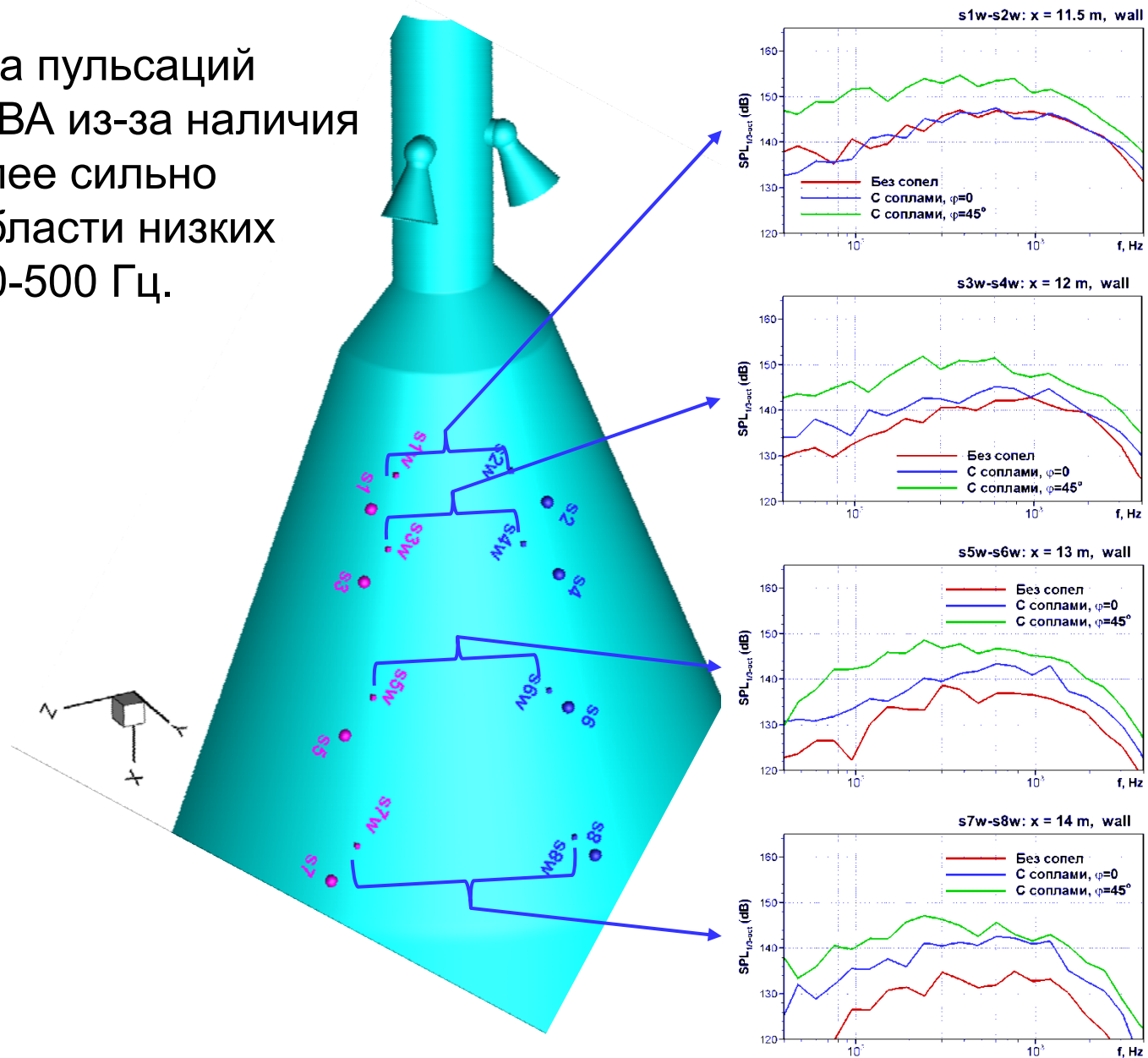
- Вклад турбулентных следов, образующихся за соплами ОРД и РДЭО, в пульсации давления на поверхности ВА является весьма существенным
 - Он оказывается наибольшим в следе сопел РДЭО
- Величина этого вклада возрастает по мере движения вниз по потоку
 - К концу ВА она достигает 15 дБ в следе сопел РДЭО и 10 дБ между этими соплами (в следе сопел ОРД)



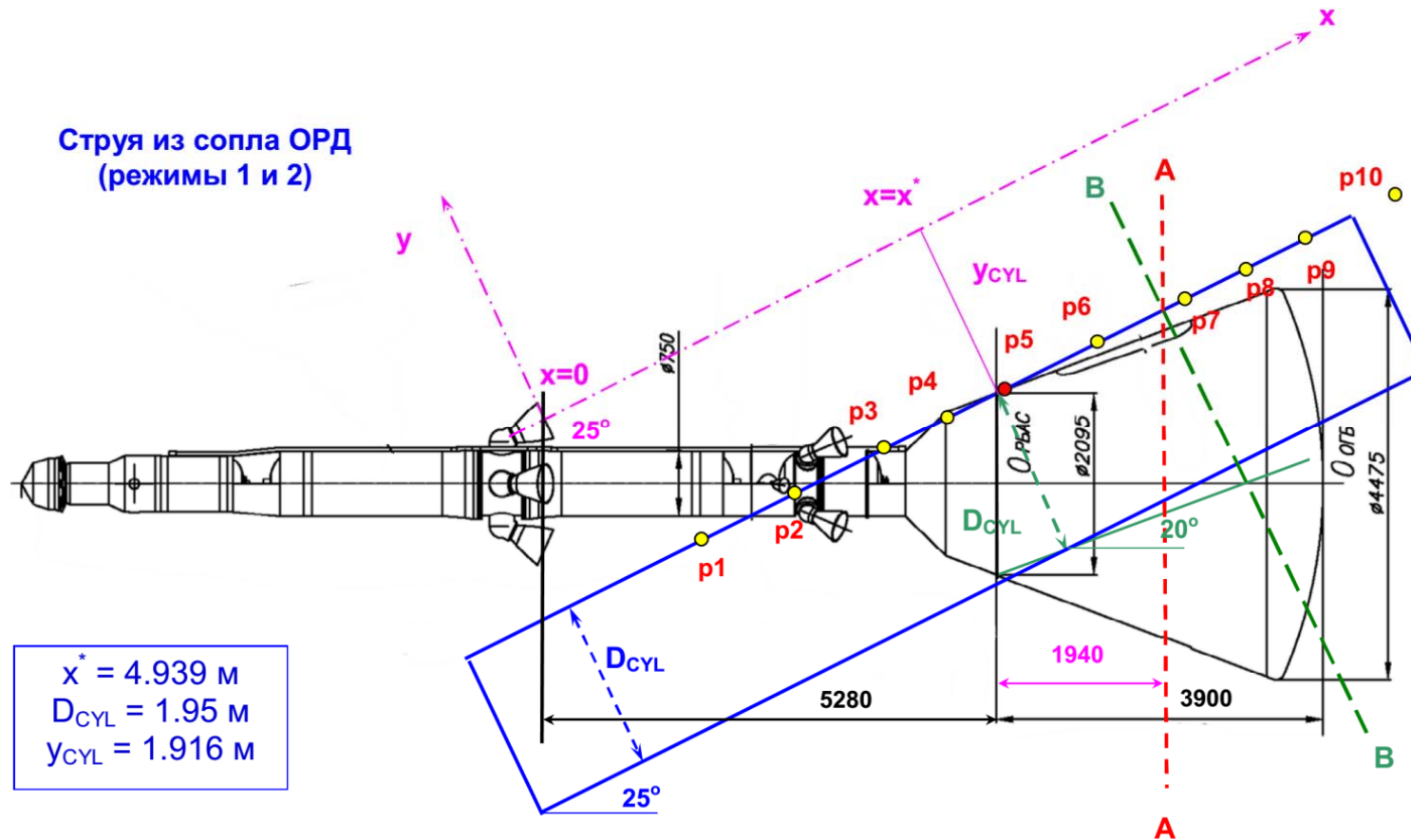
Поля среднеквадратичных пульсаций давления для режимов 3 и 3а ($M = 1.5$), а также поле их разности

Влияние сопел ОРД и РДЭО (2/2)

- Эффект роста пульсаций давления на ВА из-за наличия сопел наиболее сильно выражен в области низких частот $f = 150-500$ Гц.



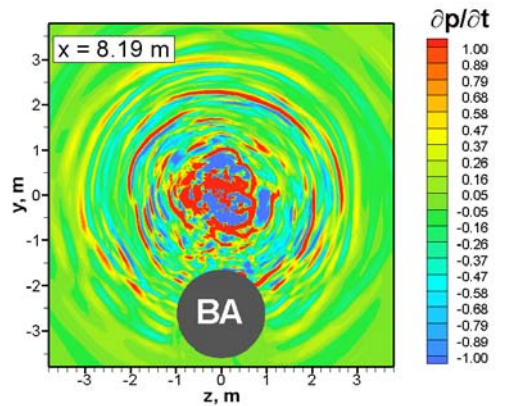
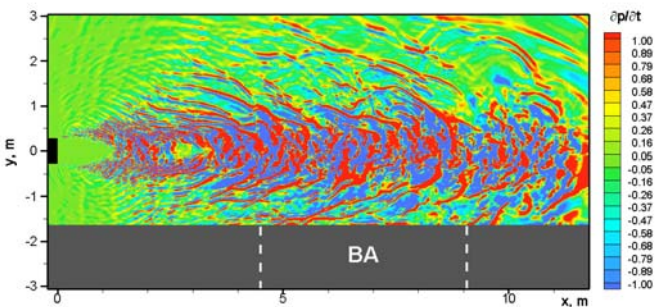
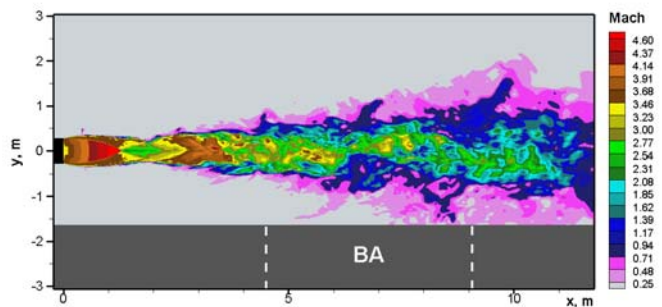
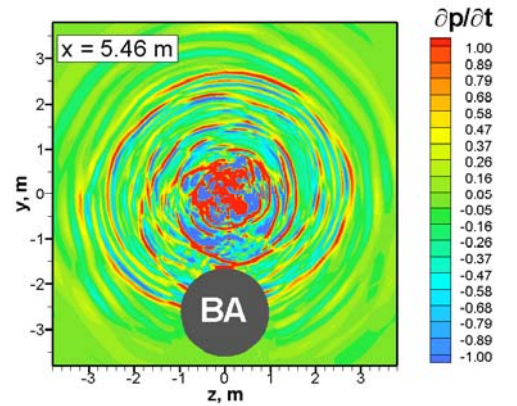
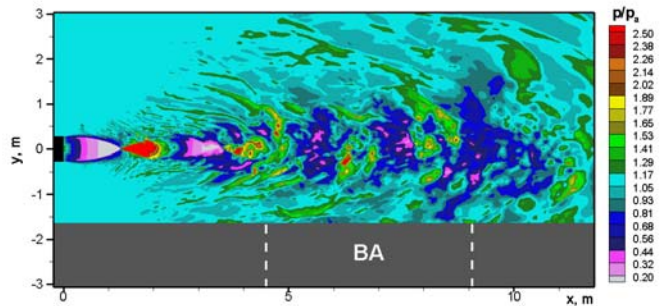
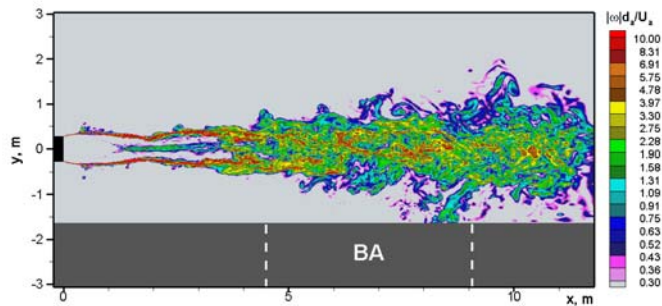
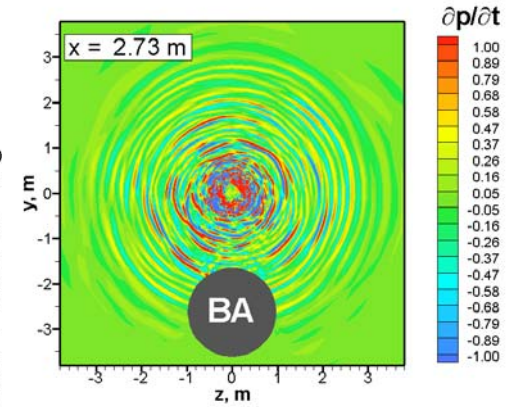
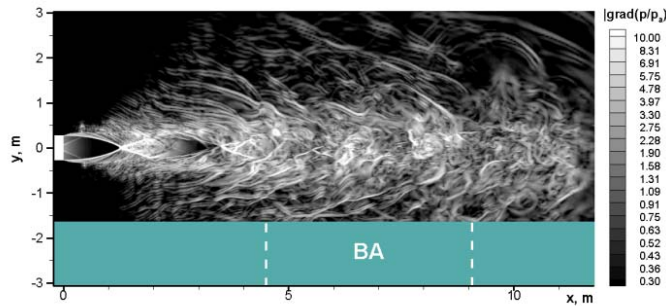
4. Расчет акустического воздействия работающих сопел РБАС



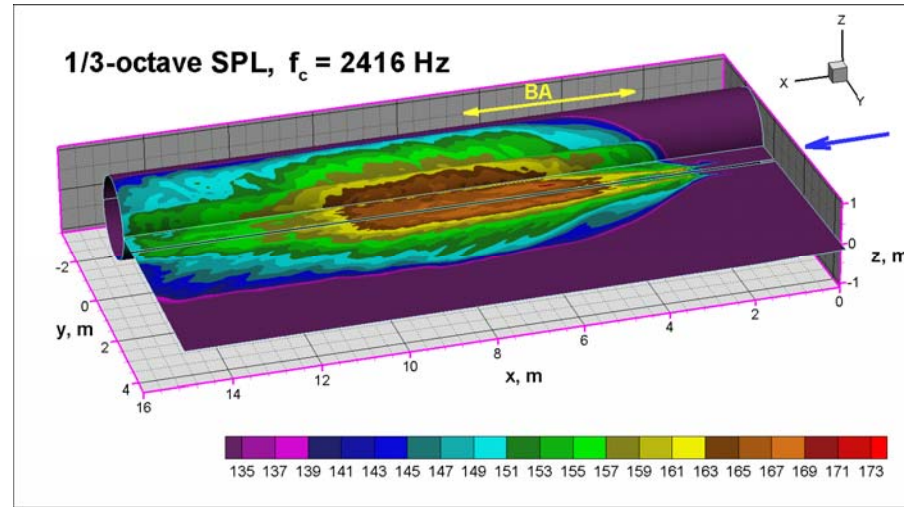
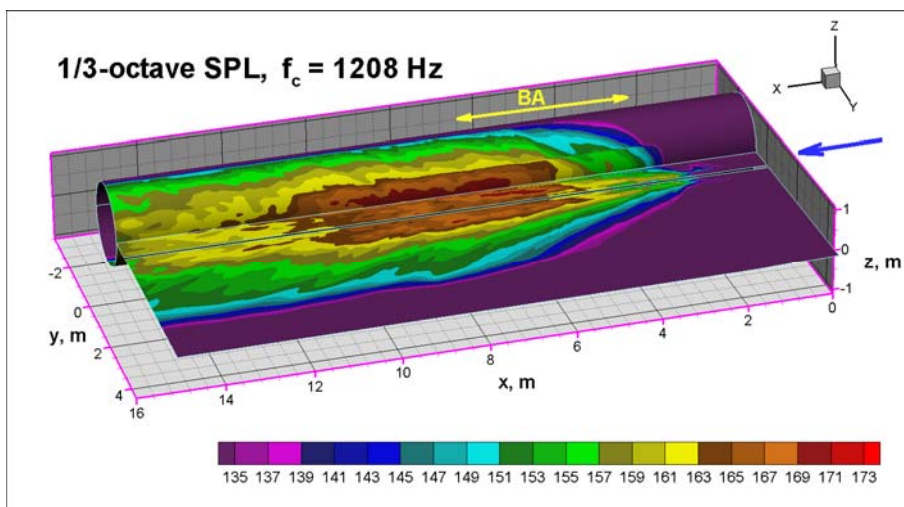
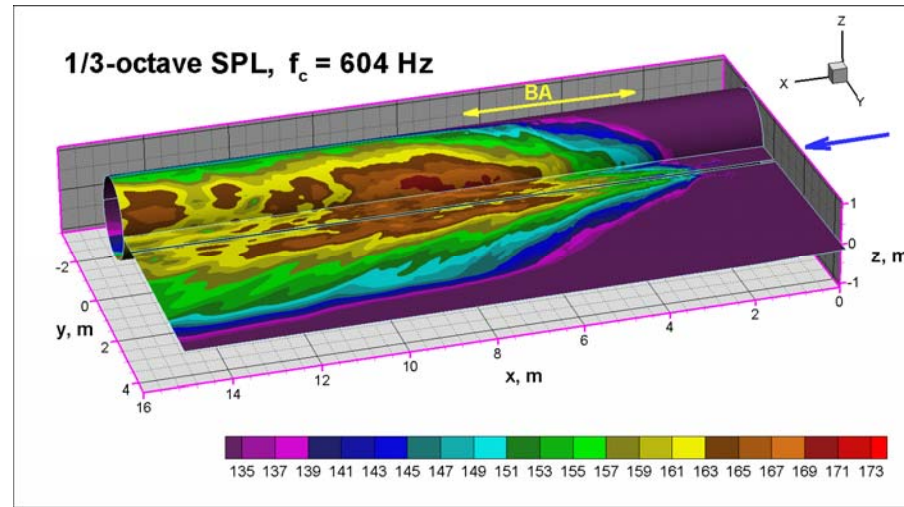
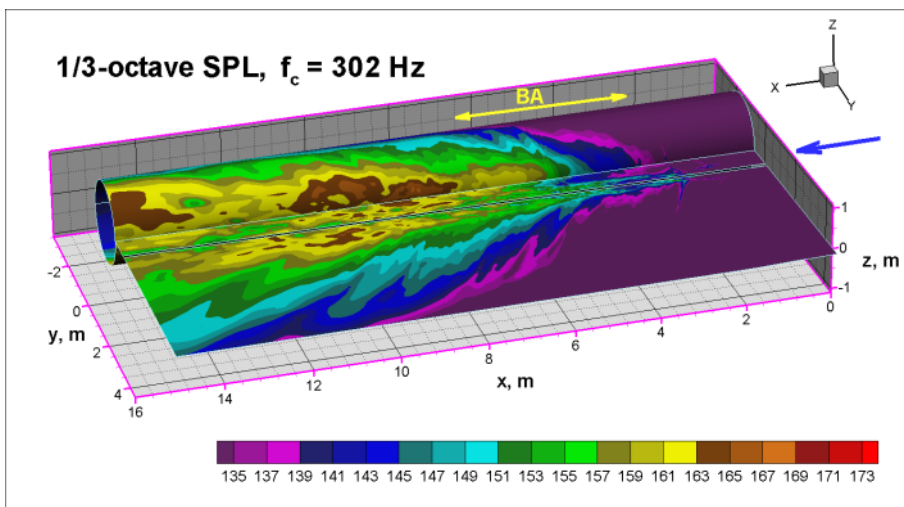
Для упрощения задачи поверхность ВА заменена цилиндром

Картина течения

Возмущения от нестационарной турбулентной струи сильно воздействуют на поверхность ВА



Акустическая нагрузка на поверхность ВА на различных частотах



Спасибо за внимание

