

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА С КРУГОВОЙ КАВЕРНОЙ

Название проекта/исследования

Моделируется сверхзвуковое обтекание тела с круговой каверной.

Авторы, место работы, e-mail

А.С. Шишаева¹, nsh@tesis.com.ru

А.А. Аксенов¹, andrey@tesis.com.ru

С.В. Гувернюк², guv@imec.msu.ru

¹ООО «ТЕСИС»

²МГУ имени Ломоносова

Аннотация к описанию проекта

Целью данного исследования являлось численное моделирование сверхзвукового турбулентного обтекания тела с кольцевой каверной. Различные типы течения при различных скоростях потока. Определяется область гистерезиса потока.

Описание проекта/исследования

Сверхзвуковые течения газа с локальными дозвуковыми областями в ряде случаев имеют неоднозначную структуру скачков уплотнения, волн разрежения и турбулентных сдвиговых слоев смешения, адекватное воспроизведение которых представляет собой сложную вычислительную задачу. На режимах с гистерезисом картину течения определяют не только физические и геометрические параметры, такие как число Рейнольдса, Маха, угол атаки, но и предыстория формирования течения, в частности начальные условия. В данной работе рассматривается сверхзвуковое турбулентное обтекание осесимметричного тела с кольцевой каверной под нулевым углом атаки.

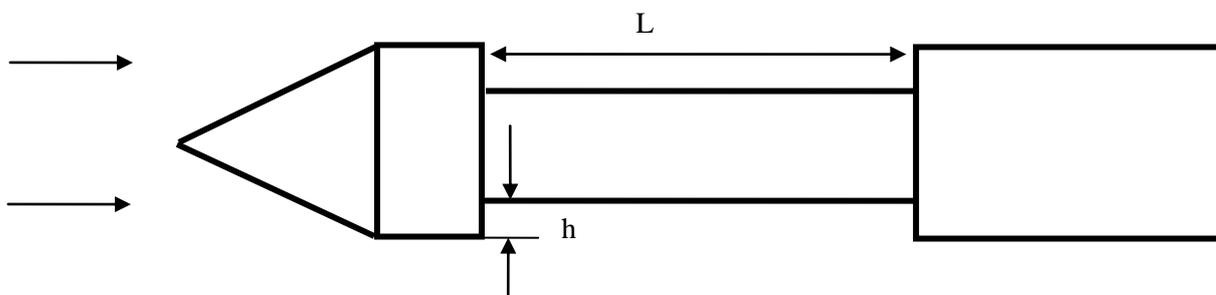
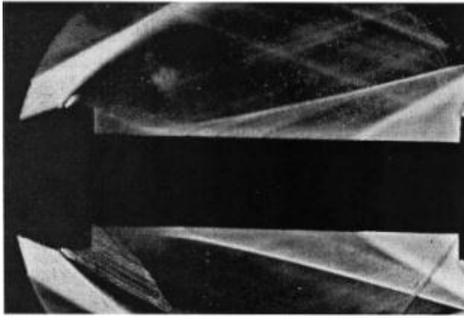
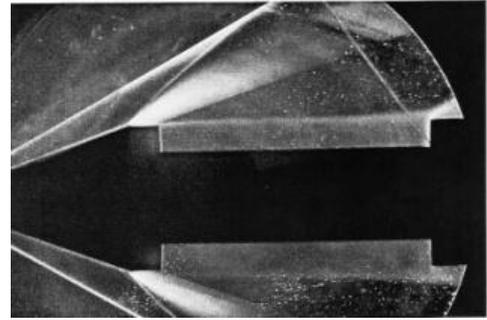


Рисунок 1 – Схема обтекаемого тела.

Моделируется сверхзвуковое турбулентное обтекание осесимметричного тела с кольцевой каверной под нулевым углом атаки (Рисунок 1). Передняя часть тела имеет форму конуса. Задняя часть тела имеет форму цилиндра с кольцевым вырезом. Рассматриваются различные длины каверны.



а



б

Рисунок 2 – Замкнутая (а) и открытая (б) схемы обтекания.

В зависимости от отношения длины выреза L к его глубине h течение в каверне может быть как открытым, так и замкнутым. Если соотношение L/h мало, то всюду в каверне течение дозвуковое. Оно отделено от внешнего сверхзвукового потока турбулентным слоем смешения, простирающимся от передней до задней кромок каверны («открытая каверна», Рисунок 2б). При больших L/h слой смешения над каверной разрушается. Внешний сверхзвуковой поток присоединяется к поверхности дна каверны, образуя две локальные области отрыва около переднего и заднего уступов («замкнутая каверна», Рисунок 2а). Сила сопротивления, действующая на тело, при замкнутой схеме обтекания, может в два или более раз превышать силу сопротивления при открытой схеме обтекания. При этом, при определенном диапазоне значений соотношения L/h возможно формирование как открытой так и замкнутой схемы обтекания. Если сначала получить замкнутое течение при большом соотношении L/h , а затем постепенно уменьшать L в процессе решения, то каверна остается замкнутой до значения $L = L_2$. Если же, напротив, сначала получить открытое течение при малом соотношении L/h , а затем постепенно увеличивать L , то течение становится замкнутым при $L = L_1$, причем, $L_2 < L_1$. Область $L_2 < L < L_1$ является областью гистерезиса.

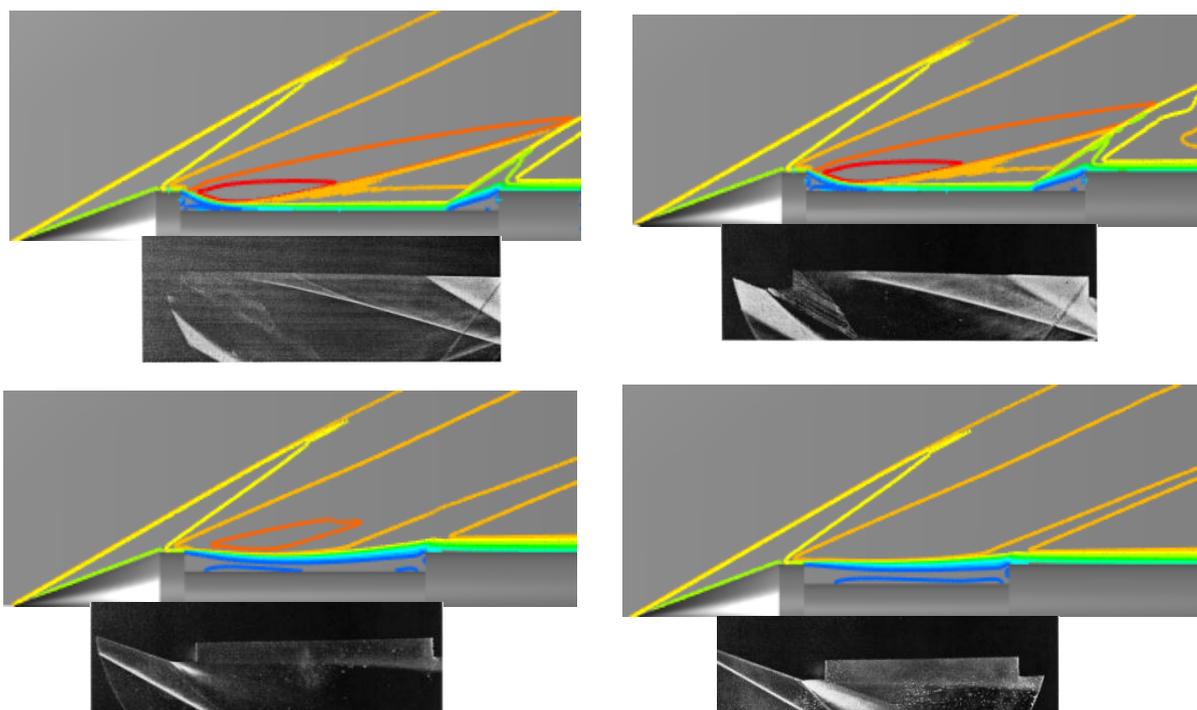


Рисунок 3 – Сравнение обтекания тела при различных соотношениях между длиной и глубиной каверны с экспериментом.

Исследование состоит из двух этапов. В рамках первого этапа исследования рассматривается обтекание тела при различных соотношениях длины и глубины каверны, проводится исследование сходимости по расчетной области, исследование сходимости по сетке, исследование влияния модели турбулентности, проводится качественное сопоставление картины течения, полученной при моделировании, с экспериментом (Рисунок 3).

Основные особенности расчета:

- Комбинация сверхзвукового и дозвукового турбулентного течения
- Значительные градиенты скорости, давления и температуры

На втором этапе проводится получение кривой гистерезиса. Исследования проводятся с использованием оптимальных счетных параметров, определенных на предыдущем этапе исследования. Задняя часть обтекаемого тела задается как независимое подвижное тело, способное двигаться в процессе расчета.

Основные особенности расчета:

- Комбинация сверхзвукового и дозвукового турбулентного течения
- Значительные градиенты скорости, давления и температуры
- Подвижные тела

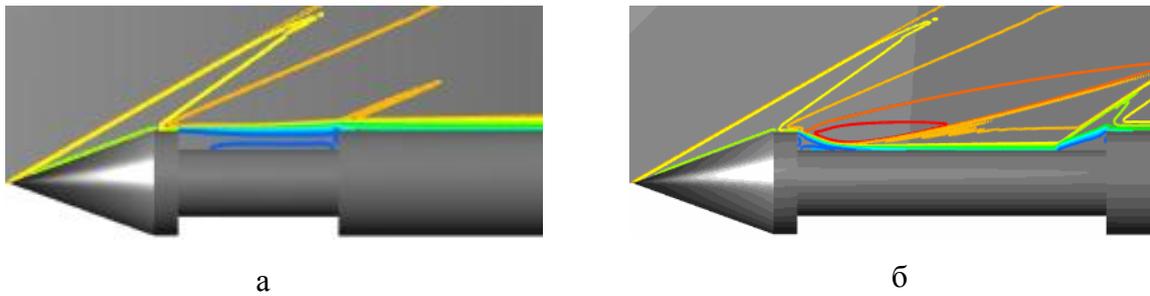


Рисунок 4 – Начальное приближение для исследования гистерезиса: $L/h = 7.9$ (а), $L/h = 16.25$ (б).

Проводится два предварительных расчета: в одном задается малая начальная длина каверны, обеспечивающая формирование открытой схемы обтекания ($L/h = 7.9$), в другом случае – большая начальная длина каверны, обеспечивающая формирование замкнутой каверны ($L/h = 16.25$) (Рисунок 4). Длина каверны при предварительных расчетах не изменяется.

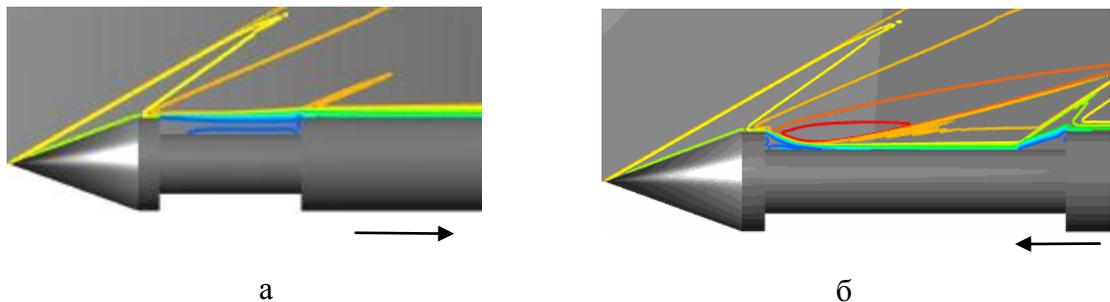
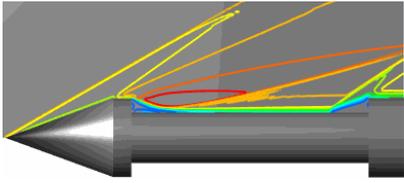


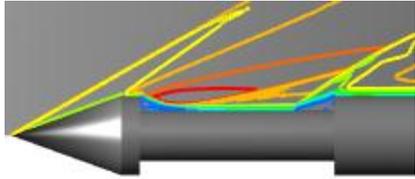
Рисунок 5 – Направление движения задней части тела при исследовании гистерезиса.

Затем, в проекте с малой каверны и сформированной открытой схемой обтекания задается скорость задней части тела вдоль потока (см. Рисунок 5а), а проекте с большой длиной каверны и сформированной замкнутой схемой обтекания скорость против потока (см. Рисунок 5б). Таким образом, в первом случае каверна увеличивается в процессе расчета, а во втором случае – уменьшается.

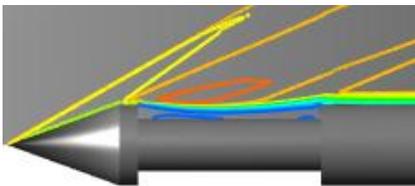
Движение вдоль потока



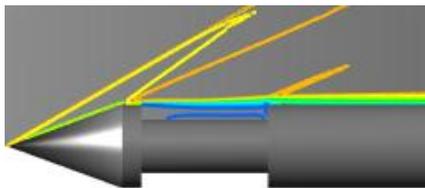
$L/h = 16.25$



$L/h = 13.25$



$L/h = 12.25$



$L/h = 8.25$

Движение против потока

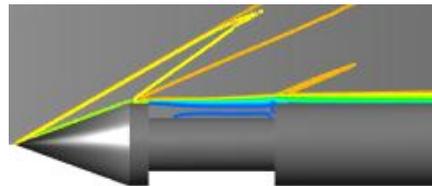
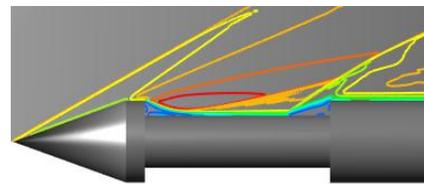
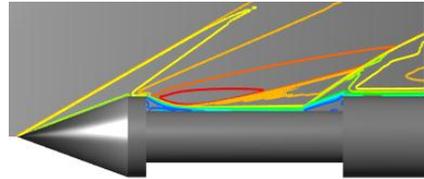
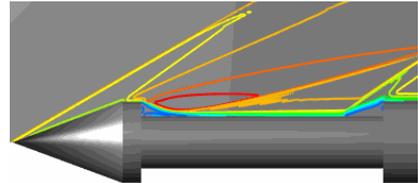


Рисунок 6 – Сравнительное распределение числа Маха при различных длинах каверны при движении задней части тела вдоль и против потока.

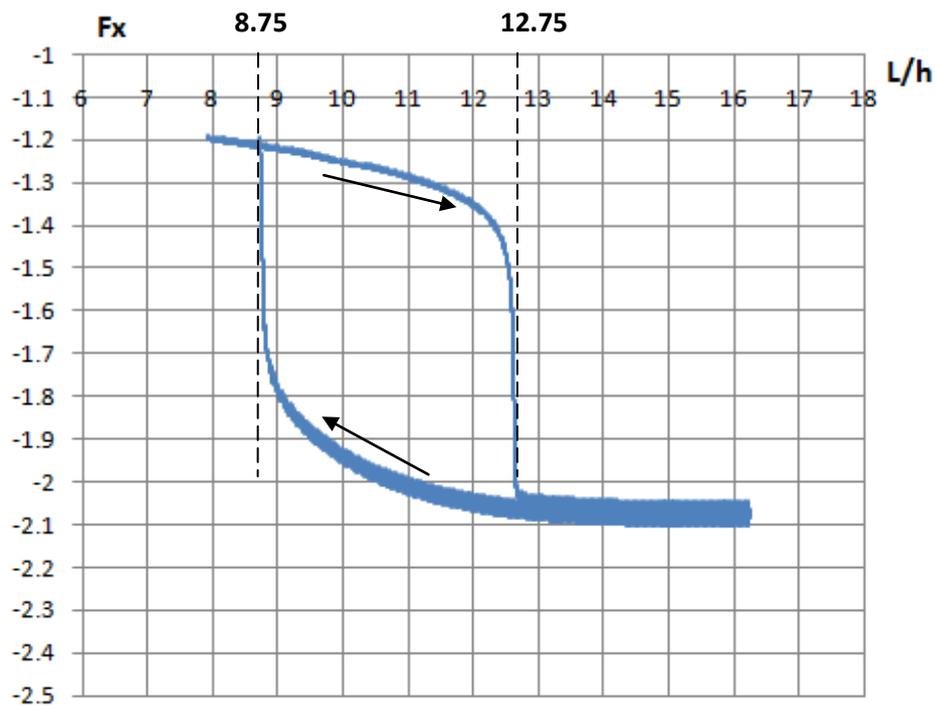


Рисунок 7. Зависимость силы, действующей на тело, от отношения длины каверны к высоте (L/h) при различном направлении движения задней части тела в процессе решения.

Получено, что при увеличении длины каверны переход от открытого течения к замкнутому происходит при $L/h = 12.75$, а при уменьшении переход от замкнутого к открытому – при $L/h = 8.75$ (см. Рисунок 6-Рисунок 7). На графике зависимости силы от отношения L/h наблюдается характерная петля гистерезиса (см. Рисунок 7).

Таким образом, проведенные расчеты позволяют:

- получить все необходимые данные для определения параметров сверхзвукового турбулентного обтекания плохообтекаемого тела с областями отрыва потока;
- определить область формирования гистерезиса;

В дальнейшем планируется провести исследование других методов получения гистерезиса, а также исследование влияния кратковременного нагрева на изменение картины течения в области гистерезиса и вне ее.