

# **Влияние величины угла сжатия на параметры динамического слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения**

*Трубицына Лукерья Петровна*

*II курс магистратуры НГУ, лаб. 10 ИТПМ СО РАН*

## **1. Введение**

При разработке гиперзвуковых летательных аппаратов, таких как космические корабли многоразового использования, необходимо учитывать силовые и тепловые нагрузки на поверхность аппарата. Особенности сверхзвукового течения (отрыв и присоединение потока, продольные вихревые структуры в зоне присоединения, взаимодействие ударных волн с пограничным слоем) могут являться причиной сильного локального нагрева и резкого роста давления на поверхности тела, что может привести к повреждению и разрушению летательного аппарата.

Угол сжатия является моделью многих частей конструкции летательных аппаратов, как, например, элементы механизации крыла. Структура сверхзвукового отрывного течения на угле сжатия и его особенностей хорошо представлена в литературе. Течение на угле сжатия традиционно описывается как двумерное, однако в реальности из-за конечных размеров угла сжатия происходит стекание газа со стенок модели и течение приобретает трёхмерную структуру, что влечёт за собой ряд особенностей. В работе [1] было обнаружено существование высоконапорного (динамического) слоя DL за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения на угле сжатия.

Динамический слой расположен над пограничным слоем и характеризуется высоким уровнем полного давления (до 0.95 давления торможения набегающего потока). Высоконапорный динамический слой изменяет характеристики устойчивости течения в данной области за счёт резкого роста полного давления в нём. Кроме того, за счёт образования в динамическом слое трёхмерных вихревых структур [2] растут тепловые нагрузки на поверхность модели. Для получения точной картины трёхмерного течения на угле сжатия необходимо исследование параметров и условий возникновения динамического слоя.

Целью работы является определение диапазона значений угла сжатия, в котором существует динамический слой, и установление зависимости характеристик динамического слоя от величины угла сжатия. Для этого было проведено экспериментальное исследование течения для величины угла сжатия  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $50^\circ$ . Для модели угла сжатия  $40^\circ$  также выполнен трёхмерный численный расчёт течения и проведено сравнение полученных данных с результатами экспериментов.

## **2. Методика численного расчёта**

Расчёт выполнен в пакете ANSYS Fluent с использованием вычислительных ресурсов ИВЦ НГУ. Решались трёхмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса в ламинарной постановке. Расчетная среда – вязкий совершенный

теплопроводный газ. Термодинамическое состояние газа описывается уравнением Менделеева–Клапейрона. Теплоемкость газа считается постоянной. Зависимость коэффициента динамической вязкости газа от температуры описывается формулой Сазерленда. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры рассчитывается по кинетической теории газов в соответствии с формулой Эйкена.

Расчётная область содержала около 8,4 млн ячеек для модели угла сжатия  $40^\circ$ . Было сделано сгущение сетки по направлению поверхности модели (50 слоёв на область пограничного слоя), а также сгущение сетки в области отрыва и присоединения потока для лучшего разрешения отрывной области, динамического слоя и продольных вихревых структур в области присоединения (рис.). Размеры сеток совпадали с размерами соответствующих экспериментальных моделей. Толщина передней кромки пластины выбрана 5 мкм для модели угла сжатия  $20^\circ$  и 15 мкм для модели угла сжатия  $40^\circ$ , на толщину передней кромки приходится 20 и 5 слоёв сетки соответственно. В трансверсальном направлении сетка равномерная, всего на ширину модели приходится 200 ячеек.

Параметры набегающего потока были заданы в соответствии с условиями экспериментов: число Маха  $M = 6.03$ , статическое давление 602 Па, температура в свободном потоке 47,5 К; температура торможения потока 393 К.

### 3. Полученные результаты

Проведено трёхмерное численное исследование сверхзвукового течения на угле сжатия для модели и  $40^\circ$ . На рисунке 1 приведено распределение давления Пито в потоке. Можно видеть, что за линией присоединения потока наблюдается резкое локальное повышение давления Пито, соответствующее высоконапорному динамическому слою.

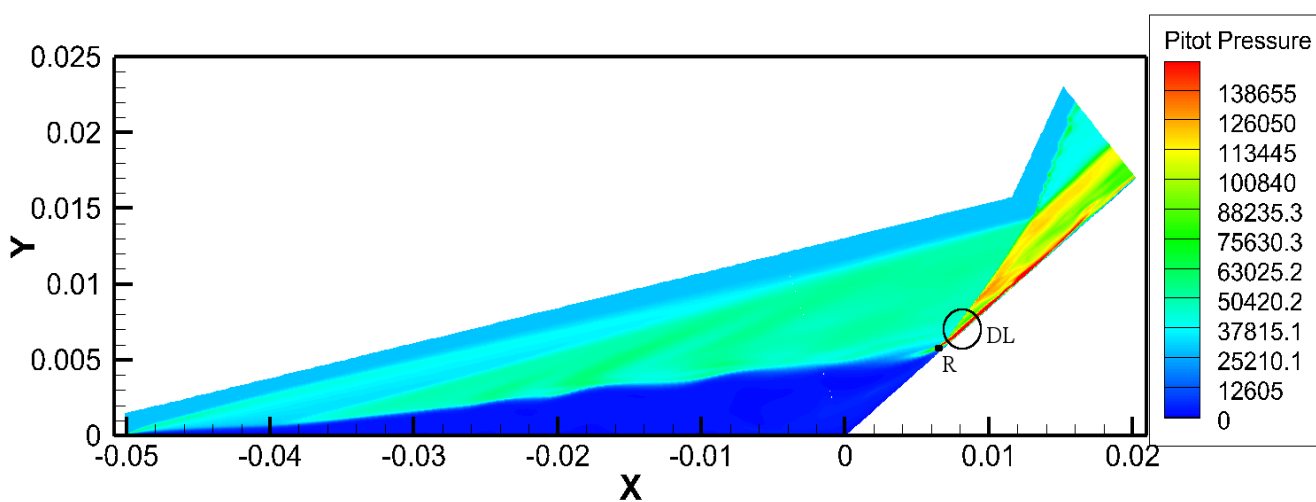


Рис. 1: Расчётная картина течения для модели  $40^\circ$

Распределение давления Пито по нормали к поверхности модели представлены на рисунке 2. Профиль построены для сечения  $L = 19$  мм, где  $L$  –

расстояние от начала уступа. На графике виден узкий локальный пик давления Пито на расстоянии  $r/L = 0.005 - 0.01$ , подтверждающий присутствие динамического слоя.

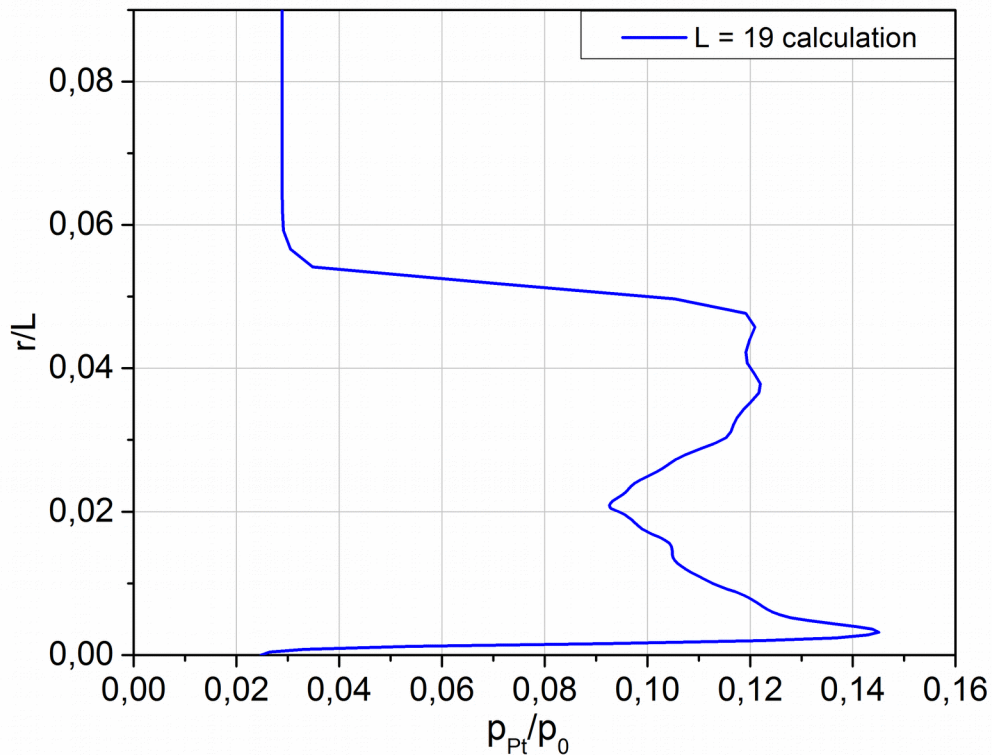


Рис. 2: Расчётное распределение давления Пито для модели  $40^\circ$

Также рассматривалось поперечное сечение потока за линией присоединения. На рисунках 3 и 4 представлена картина течения для модели угла сжатия  $40^\circ$  в сечении  $L = 19$  мм. Во внешней части пограничного слоя присутствуют продольные вихревые структуры.

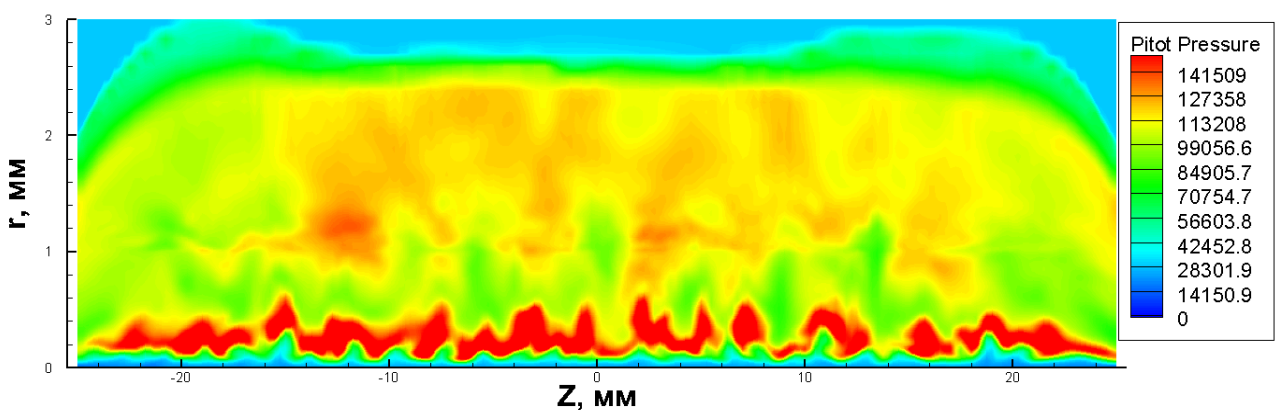


Рис. 3: Трансверсальная картина течения для модели угла сжатия  $40^\circ$ : общий вид

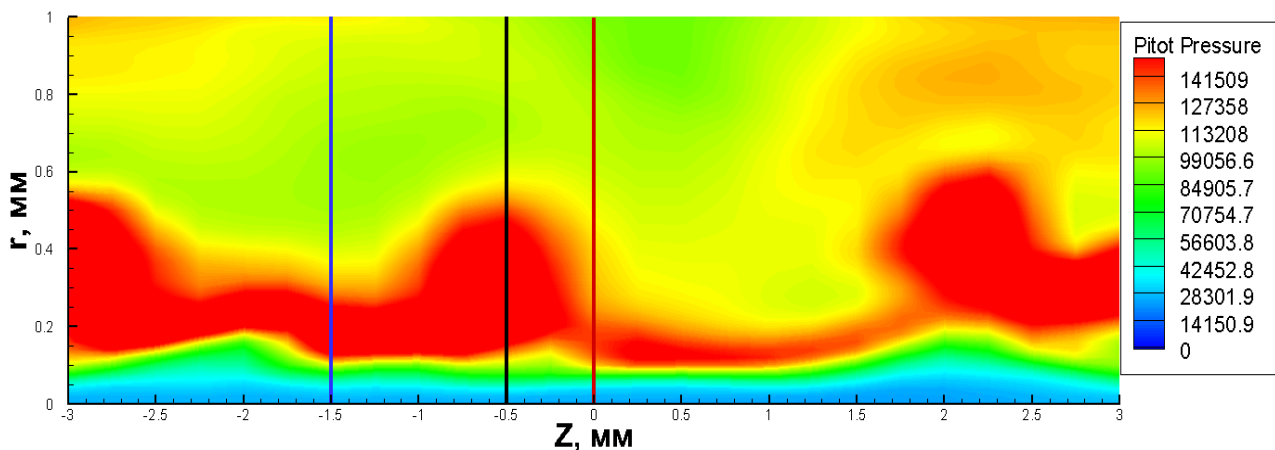


Рис. 4: Трансверсальная картина течения для модели угла сжатия  $40^\circ$ : продольные вихревые структуры в пограничном слое.

Распределения давления Пито для сечений  $z = 0$  мм,  $z = -0.5$  мм и  $z = -1.5$  мм представлены на рисунке 5. Сечения обозначены на рис. вертикальными линиями. Можно видеть, что пик давления Пито, характерный для динамического слоя, присутствует для всех профилей, однако форма профиля существенно различается в зависимости от состояния вихревых структур в данном сечении.

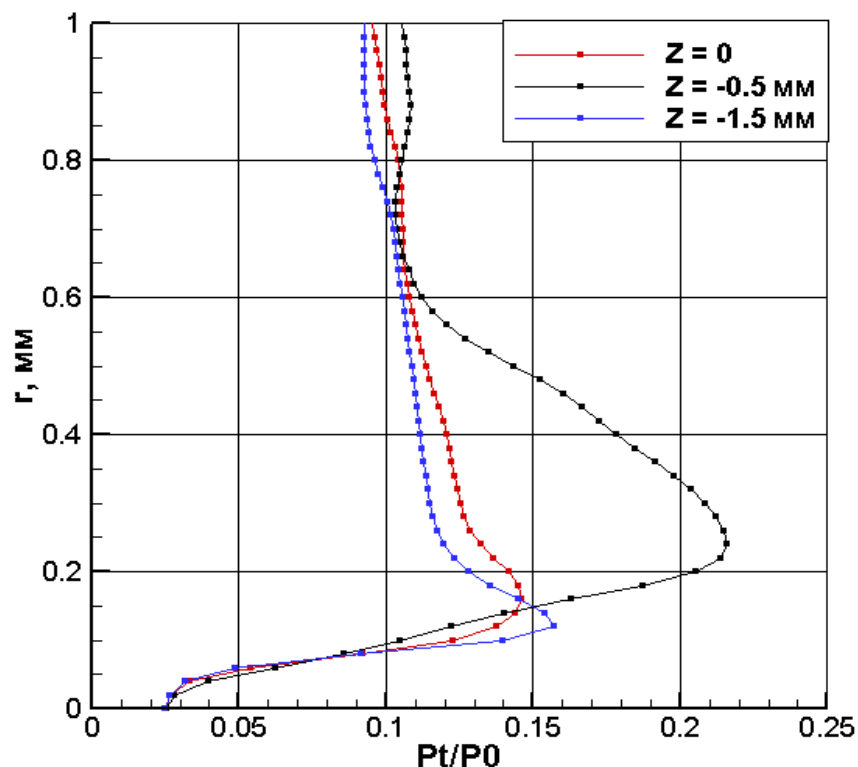


Рис. 5: Расчётное распределение давления Пито для модели угла сжатия  $40^\circ$  в сечениях  $z = 0$  мм,  $z = -0.5$  мм и  $z = -1.5$  мм

На рисунке 6 показано сравнение экспериментальных и расчётных профилей давления Пито для модели угла сжатия  $40^\circ$ . Наблюдается

качественное совпадение результатов численного расчёта с экспериментом. Несовпадение скачков уплотнения объясняется расхождением толщины передней кромки численной и экспериментальной модели.

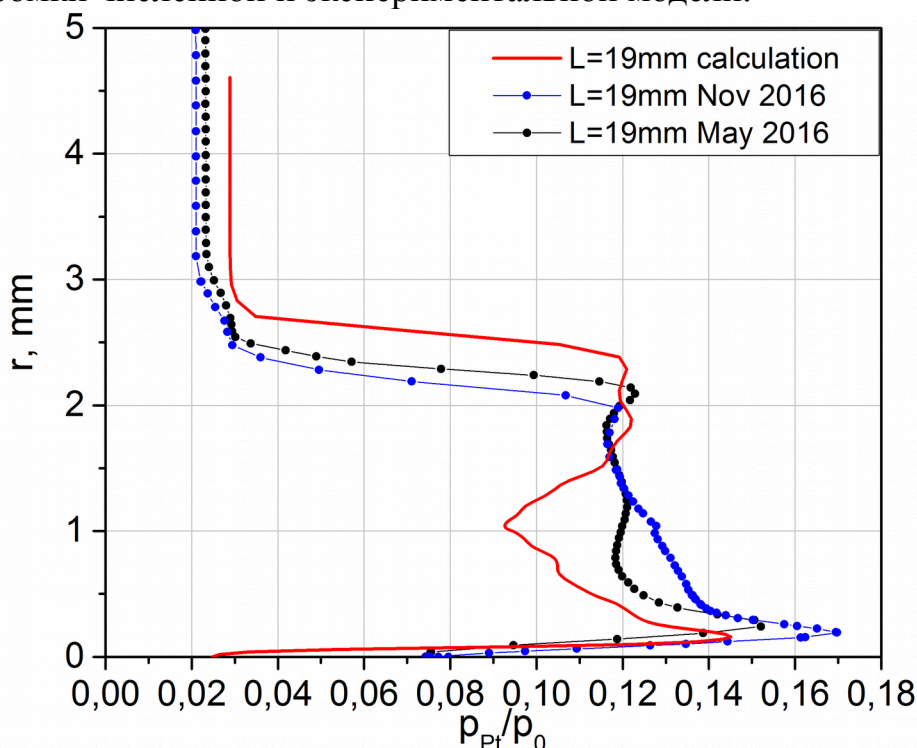


Рис. 6: Распределение давления Пито для модели 40°: экспериментальные и численные данные

Данные результаты опубликованы в работе:

Трубицына Л. П. Влияние величины угла сжатия на параметры динамического слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – 106 с.

#### Список литературы:

1. В.И. Запрягаев, И. Н. Кавун, И. И. Липатов Возникновение высоконапорного слоя в угле сжатия при сверхзвуковой скорости потока. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, №6, 2014, с 149-158
2. В.И. Запрягаев, И. Н. Кавун. Механизм формирования продольных вихрей за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия // Учёные записки ЦАГИ, 2016, т. XLVII, №3, с.27-36