

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 532.526

**СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ  
И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ НА ТЕЛЕ  
КОНУС — ЦИЛИНДР В ПРИСУТСТВИИ  
ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ**

**Т.В. ПОПЛАВСКАЯ, А.А. МАСЛОВ, В.Н. ВЕТЛУЦКИЙ**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
Новосибирск*

Проведены расчеты сжимаемого пограничного слоя на теле конус — цилиндр в присутствии локального источника энергии на оси симметрии перед телом. В рамках линейной теории исследуется устойчивость этого пограничного слоя при числе Маха  $M_\infty = 2$ . Показано влияние подвода энергии на характеристики пограничного слоя и устойчивости.

Изучение течений с внешним подводом энергии важно для решения ряда актуальных проблем: снижение лобового сопротивления и тепловых потоков, эффективное управление аэродинамическими характеристиками при полете с большими скоростями, стабилизация возмущений и управление переходом ламинарного течения в турбулентное.

В данной работе рассматривается обтекание конфигурации конус — цилиндр в присутствии локального источника энергии в форме тонкого цилиндра на оси симметрии перед телом. Угол полураствора конуса равен  $30^\circ$ , диаметр цилиндра  $D = 40$  мм. Набегающий поток обтекает тело под нулевым углом атаки при числе Маха  $M_\infty = 2$ . Источник энергии представляет собой область нагретого газа, температура в которой изменяется в радиальном направлении по закону Гаусса. Длина и радиус источника энергии составляют соответственно 0,3 и 0,05 длины тела [1]. При таких данных реализуется режим безотрывного обтекания.

Для расчета осесимметричного пограничного слоя на теле конус — цилиндр используется ранее созданная программа расчета трехмерного пограничного слоя на заостренном теле, подробно описанная в [2]. Начальное сечение  $x = x_0$  задано на коническом носике тела, и профили скорости и температуры берутся из автомодельного решения. Затем маршевым методом рассчитываются полные уравнения пограничного слоя на всей модели. На поверхности тела заданы обычные для вязкой жидкости условия прилипания и равенство температуры газа температуре стенки. На внешней границе пограничного слоя параметры потока скорость  $U_e$ , температура  $T_e$  и давление  $P_e$  берутся из решения для невязкого обтекания тела, полученного с помощью кодов уравнений Эйлера, разработанных в ИТПМ СО РАН [1].

Постановки задач о пограничном слое на конусе с цилиндром с источником энергии перед телом и без него одинаковы. Различны только данные на внешней границе пограничного слоя. На рис. 1 представлены значения местного радиуса  $R_n = R_n^*/D$  и распределения параметров  $P_e = P_e^*/\rho_\infty U_\infty^2$ ,

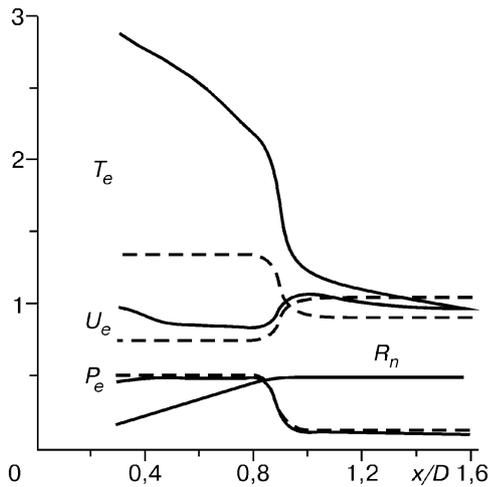


Рис. 1. Данные на внешней границе пограничного слоя.

Пунктирные линии — течение без источника энергии, сплошные линии — течение с источником энергии перед телом.

$U_e = U_e^*/U_\infty$  и  $T_e = T_e^*/T_\infty$  на внешней границе пограничного слоя для течений с источником энергии и без него (индекс\* соответствует размерным величинам, а  $\infty$  — параметрам набегающего потока). Расчет пограничного слоя для обоих вариантов был выполнен для числа Маха набегающего потока  $M_\infty = 2$ , угла атаки  $\alpha = 0$ , температурного фактора  $T_w/T_\infty = 2$  (здесь  $T_w$  — температура

поверхности) и числа Рейнольдса  $Re_D = Re_{\infty 1} D = 10^6$ , вычисленного по параметрам набегающего потока и диаметру цилиндра  $D$ .

При подводе энергии параметры потока на внешней границе пограничного слоя значительно изменились: на конической части тела давление  $P_e$  уменьшилось, а температура  $T_e$  и скорость  $U_e$  возросли, на цилиндрической же части значение  $T_e$  увеличилось, а  $U_e$  снизилось. При расчете пограничного слоя это привело к небольшому уменьшению коэффициентов напряжения трения и теплоотдачи.

На рис. 2 показаны профили скорости в разных поперечных сечениях тела конус — цилиндр в зависимости от координаты  $\zeta = y\sqrt{Re_D}/\sqrt{x}$ , где  $x$  — продольная координата,  $y$  — нормальная к поверхности тела координата. Видно, что все профили на конусе в потоке без подвода энергии практически одинаковы, т. е. течение автомодельно. В случае с подводом энергии профили скорости на конической части тела расслаиваются и течение становится существенно неавтомодельным. После перехода от конуса к цилиндру ( $x/D > 0,8$ ) течение ускоряется.

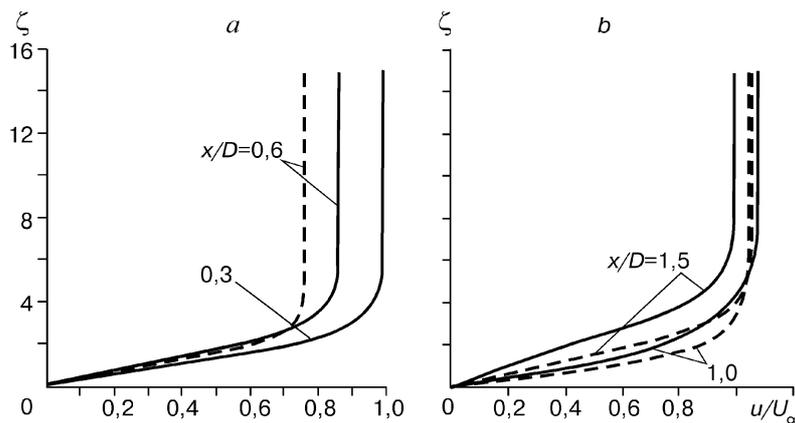


Рис. 2. Профили скорости на конусе (а) и на цилиндре (б).

Пунктирные линии — течение без источника энергии, сплошные линии — течение с источником энергии перед телом.

Для течений в пограничном слое характерным является то, что потеря устойчивости и переход ламинарного течения в турбулентное наблюдаются при высоких числах Рейнольдса. Наличие малого параметра  $1/Re$  позволяет рассматривать такие течения как близкие к параллельным. Поэтому в качестве первого шага анализ устойчивости проводился в рамках локально-параллельного приближения. Для этого использовалась система уравнений устойчивости Дана и Линя, которая сводилась к системе шести обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых методом Рунге — Кутты с привлечением метода ортогонализаций [3].

В результате решения задачи построена кривая нейтральной устойчивости для двумерных возмущений на конусе без источника энергии перед ним (пунктирная линия на рис. 3), рассчитанная в приближении автомодельного течения в пограничном слое конуса с профилем, соответствующим сечению  $x/D = 0,4$ . Далее была рассчитана устойчивость профилей осесимметричного пограничного слоя на модели конус — цилиндр без источника энергии перед телом (точки + на рис. 3). Как и в плоском случае [4], обнаружена сильная стабилизация течения в области разворота потока ( $0,9 \cdot 10^6 < Re_{\infty x} < 1,1 \cdot 10^6$ ). Расчет инкрементов волн в указанной области показал, что возмущения затухают для всех частот. Это приводит к разрыву кривой нейтральной устойчивости с образованием замкнутой кривой в области небольших чисел Рейнольдса (см. рис. 3). Для  $Re_{\infty x} > 1,1 \cdot 10^6$  кривая нейтральной устойчивости, отмеченная крестиками, соответствует пограничному слою на цилиндре.

Для  $Re_{\infty x} = 0,8 \cdot 10^6$  (соответствует концу конуса) и  $1,5 \cdot 10^6$  (соответствует концу цилиндра) были рассчитаны коэффициенты роста возмущений  $\alpha_i$  в зависимости от безразмерного частотного параметра  $F$ . Величина  $\alpha_i$  обезразмерена по толщине пограничного слоя  $\delta = \sqrt{\nu_e x / U_e}$ . Получено, что наиболее неустойчивым возмущениям на конусе соответствует частота  $F = 70 \cdot 10^6$ , а на цилиндре —  $F = 25 \cdot 10^6$ . Для этих частотных параметров были рассчитаны коэффициенты роста в зависимости от угла наклона волнового вектора  $\chi$ . Показано (рис. 4), что наиболее неустойчивы возмущения на конусе при  $\chi = 38^\circ$ , а на цилиндре при  $\chi = 62^\circ$ .

На рис. 3 также приведена нейтральная кривая для течения с источником (точки  $\Delta$ ). На конической части тела влияние источника энергии приводит к резкому уменьшению области неустойчивости, т. е. поток стабилизируется. На цилиндрической же части тела подвод энергии приводит как к увеличению области неустойчивости, так и к повышению коэффициентов роста. На конической части частота наиболее неустойчивых возмущений осталась прежней —  $F = 70 \cdot 10^6$ , а на цилиндрической части увеличилась с  $25 \cdot 10^6$  до  $65 \cdot 10^6$ . Для возмущений с этими частотами на теле с источником были также проведены расчеты по влиянию угла наклона  $\chi$ .

Сравнение коэффициентов роста на конической части для течений с источником энергии и без него приведены на рис. 4, а, а на цилиндрической части — на рис. 4, б. Угол наклона наиболее неустойчивых возмущений на конической части остался прежним:  $\chi = 38^\circ$ , а на

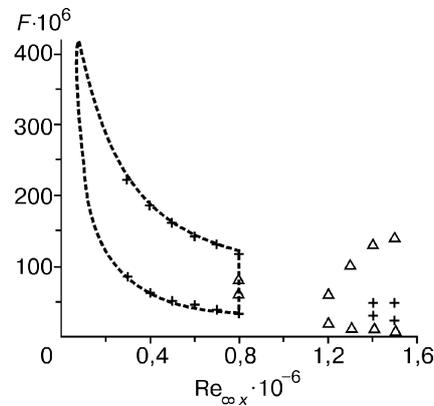


Рис. 3. Нейтральные кривые на модели конус — цилиндр при  $M_\infty = 2,0$ ,  $T_0 = 311$  К,  $T_w/T_\infty = 2,0$ ,  $\chi = 0$ .

+ — течение без источника энергии,  $\Delta$  — течение с источником.

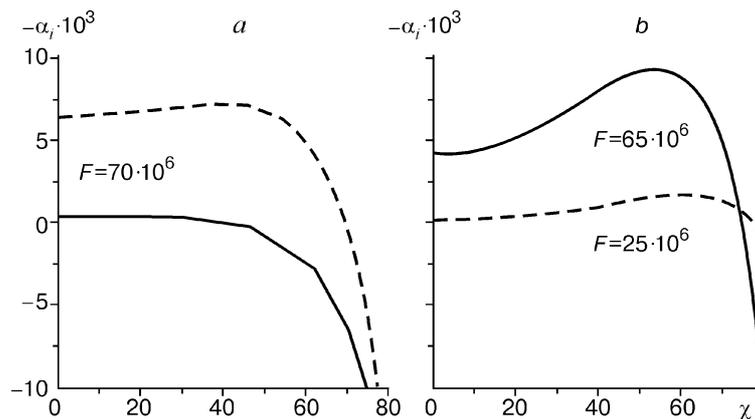


Рис. 4. Зависимость коэффициентов роста от угла  $\chi$  при  $Re_{x\chi} = 0,8 \cdot 10^6$  (а) и  $1,5 \cdot 10^6$  (б).  
Пунктирная линия — течение без источника энергии, сплошная линия — течение с источником энергии перед телом.

цилиндрической части уменьшился с  $62$  до  $54^\circ$ .

Полученные данные по исследованию пограничного слоя и его устойчивости можно рассматривать как предварительные. Они показывают, что источник энергии перед телом оказывает стабилизирующее действие на возмущения в пограничном слое на конической части модели. Для выяснения более полной картины необходимы параметрические исследования.

Авторы выражают благодарность А.П. Шашкину и Т.А. Коротаевой за предоставленные данные по невязкому обтеканию, Б.В. Смородскому — за полезные обсуждения и консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке фирмы Boeing, Rockwell (контракт № В8Х413840) и РФФИ (Грант № 98-01-00735).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаева Т.А., Фомин В.М., Шашкин А.П. Пространственное сверхзвуковое обтекание заостренного тела при подводе энергии перед ним // ПМТФ. — 1998. — № 5. — С. 116 – 121.
2. Ветлужкая Л.М., Ветлужкий В.Н. К расчету пространственного сжимаемого пограничного слоя на заостренном теле // Численные методы механики сплошной среды. Т. 17, № 5. — Новосибирск: Изд. ИТПМ СО АН СССР, 1986. — С. 25 – 42.
3. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980.
4. Гапонов С.А., Петров Г.В. Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя при повороте течения // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1987. — № 18, вып. 5. — С. 25 – 29.

Статья поступила в редакцию 16 марта 1999 г.