

Тема работы:

Численное моделирование эффектов шероховатости поверхности на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое на затупленном конусе.

Состав коллектива:

Хотяновский Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с. ИТПМ СО РАН, с.н.с. Лаборатории неравновесных течений и аэротермодинамики космических аппаратов НИЧ НГУ;

Кудрявцев Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., с.н.с. ИТПМ СО РАН, с.н.с. Лаборатории неравновесных течений и аэротермодинамики космических аппаратов НИЧ НГУ, доцент Кафедры аэрофизики и газовой динамики НГУ.

Информация о гранте:

РНФ №14-11-00490 «Влияние шероховатости на ламинарно-турбулентный переход в гиперзвуковом пограничном слое на затупленных телах», рук. А.А. Маслов, 2014-2016, 2017-2018.

Аннотация.

На основе прямого численного моделирования исследуется влияние поверхностной шероховатости на развитие неустойчивости и переход к турбулентности в пограничном слое на затупленном конусе. Рассмотрены случаи распределенной шероховатости, одиночных элементов шероховатости двух различных форм и группы взаимодействующих элементов шероховатости. Показано, что наличие шероховатости приводит к искажению среднего течения, образованию зон рециркуляции вблизи элементов шероховатости, формированию интенсивных долгоживущих продольных вихрей в следах за крупными элементами, появлению и росту нестационарных пульсаций в областях, занятых этими вихрями, и в конечном итоге к взрывному росту мелкомасштабных трехмерных пульсаций, сопровождающемуся разрушением вихрей и переходом к турбулентности. Течение за одиночным элементом шероховатости значительно более устойчивое по сравнению со случаем распределенной шероховатости или случаем группы элементов. Это позволяет сделать вывод, что в процессе развития неустойчивости взаимодействие соседних вихревых следов и, возможно, формирование в результате этого взаимодействия неустойчивого поперечного течения имеет большое значение.

Научное содержание работы.

1. Постановка задачи.

В настоящем исследовании проводится прямое численное моделирование развития возмущений, генерируемых шероховатостью в сверхзвуковом пограничном слое на затупленном конусе. Рассматриваются случайная распределенная и одиночная шероховатости, а также взаимодействие группы элементов шероховатости. Параметры моделируемого течения и геометрия модели соответствовали условиям экспериментов, проведенных в ИТПМ СО РАН: число Маха набегающего потока $M=5.95$, единичное число Рейнольдса $Re_1 = 37,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, температура торможения $T_0 = 412,9 \text{ К}$; модель представляет собой круговой конус с углом полураствора 7° и сферически затупленным носиком (радиус затупления $R = 2 \text{ мм}$), расположенный под нулевым углом атаки. Моделируется течение в пограничном слое в трехмерной области на элементе поверхности конуса, вырезанной из предварительно выполненного осесимметричного расчета. Поверхностная шероховатость моделируется набором случайно расположенных элементов следующей формы:

$$h(\rho) = k \cos 2(\pi \rho / 2w), \text{ при } \rho < w.$$

Здесь k – высота элемента, h – локальное возвышение над поверхностью конуса, w – радиус элемента, ρ – расстояние от прямой, направленной по нормали к поверхности и проходящей

через самую высокую точку элемента. Высота и радиус элементов варьируются предельные значения параметров шероховатости $k_{\min} = 0.01 R = 20$ мкм, $k_{\max} = w_{\max} = 0.1 R = 200$ мкм.

2. Современное состояние проблемы.

Известно, что переход к турбулентности в пограничном слое сопровождается резким увеличением силы сопротивления и тепловых потоков на поверхности обтекаемого тела. Поэтому изучение основных механизмов управления ламинарно-турбулентным переходом имеет большое значение для создания новых скоростных летательных аппаратов. Затупленный конус является типичной модельной формой передней части скоростного летательного аппарата. Поэтому процесс ламинарно-турбулентного перехода на таких телах является предметом интенсивных исследований (см. например, обзор Schneider, S. P., Progress Aerospace Sci, 2004, V.40.). При достаточно больших радиусах затупления тела переход к турбулентности происходит значительно раньше, чем это предсказывается линейной теорией. Такой аномально ранний переход, часто наблюдающийся в дозвуковой части течения при наличии большого отрицательного градиента давления, получил название парадокса затупленного тела. Одним из механизмов раннего перехода может быть влияние шероховатости поверхности модели. Известно, что шероховатость является одним из наиболее важных факторов, влияющих на возникновение и развитие турбулентности в пограничном слое. Влияние шероховатости может быть наиболее существенным вблизи носика или передних кромок, где размер элементов шероховатости сравним с толщиной пограничного слоя. В связи с этим, исследование влияния шероховатости на возникновение возмущений и ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое стало объектом интенсивных исследований во всем мире.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Прямое численное моделирование проводится на основе численного решения трехмерных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого теплопроводного газа. Численные расчеты выполняются с помощью явного по времени численного кода CFS3D. В настоящей работе для вычисления конвективных потоков в коде CFS3D используется TVD-схема третьего порядка MUSCL с ограничителем *minmod* и приближенным решением задачи о распаде разрыва на гранях между ячейками сетки с помощью солвера HLLC. Диффузионные члены аппроксимируются центральными разностями второго порядка, для интегрирования по времени применяется явная схема Рунге — Кутты третьего порядка, расчеты проводятся на структурированной криволинейной согласованной с границей расчетной области сетке из гексаэдральных ячеек. Код распараллелен с помощью геометрической декомпозиции расчетной области, обмен данными между процессорами организован с помощью библиотеки MPI. Для трехмерных расчетов использовалось до 96 процессоров. В численном моделировании использовались расчетные сетки, сгущенные непосредственно вблизи пластины и обеспечивающие разрешение пристенного пограничного слоя. Полная расчетная сетка в трехмерной области содержала от 15 до 73 миллионов ячеек. Расчеты проводились с использованием до 96 процессорных ядер.

4. Полученные результаты.

Проведено прямое численное моделирование для 50 случайно распределенных элементов шероховатости. Непосредственно перед элементами, на поверхности конуса был расположен источник периодических возмущений типа вдув/отсос с амплитудой нормальной компоненты скорости $A = 0.05$ и частотой, соответствующей наиболее неустойчивому возмущению второй моды. Результаты расчетов показывают, что вблизи элементов шероховатости возникают сильные локальные искажения течения в виде подковообразных стационарных возмущений, в то время как в следе за элементами образуются продольные вихревые структуры. Основной вклад в формирование трехмерного вихревого движения, приводящего к появлению заметных нормальной и азимутальной компонент скорости и

высоким градиентам параметров течения, вносят самые большие элементы, с размером близким к k_{\max} . Именно за ними возникают интенсивные долгоживущие продольные вихри, сохраняющиеся вплоть до конца расчетной области – см. рис. 1. Приблизительно при $x = 84 R$ этот след начинает быстро расширяться в азимутальном направлении, одновременно резко возрастает коэффициент трения, что является свидетельством начала ламинарно-турбулентного перехода.

Как показали результаты расчетов, в развитии неустойчивости интенсивных долгоживущих вихревых следов, формирующихся только за достаточно большими элементами шероховатости, существенную роль играет взаимодействие с возмущениями, порождаемыми соседними элементами. Относительное положение элементов также может иметь большое значение. Для проверки этих предположений было проведено моделирование для группы взаимодействующих элементов. Группа состояла из шести элементов, расположение которых показано на рис. 2,а: центры элементов передней пары находятся в центральной плоскости $\varphi = 0^\circ$, две другие пары в азимутальных плоскостях $\varphi = \pm 6^\circ$ сдвинуты вниз по потоку относительно первой пары на расстояние, равное R . В каждой из трех пар передний элемент имел размер $k = w = 0,15 R$, задний — $0,3 R$, расстояние между центрами двух элементов составляло $0,4 R$, радиус затупления конуса равен $R = 2$ мм. Течение возбуждалось нестационарным вдувом (отсосом), осуществлявшимся через отверстие, находившееся непосредственно перед первой парой элементов. На рис. 2,а видно, что при выбранных размере и положении элементов перед, за и между элементами каждой пары появляются зоны рециркуляции, которые могут быть источником нестационарных флуктуаций. Взаимодействие элементов вызывает появление растущих нестационарных колебаний в вихревых следах. Ниже по потоку взаимодействие соседних вихрей вызывает интенсивный рост трехмерных флуктуаций, постепенно распространяющихся на всю расчетную область, и началу ламинарно-турбулентного перехода.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

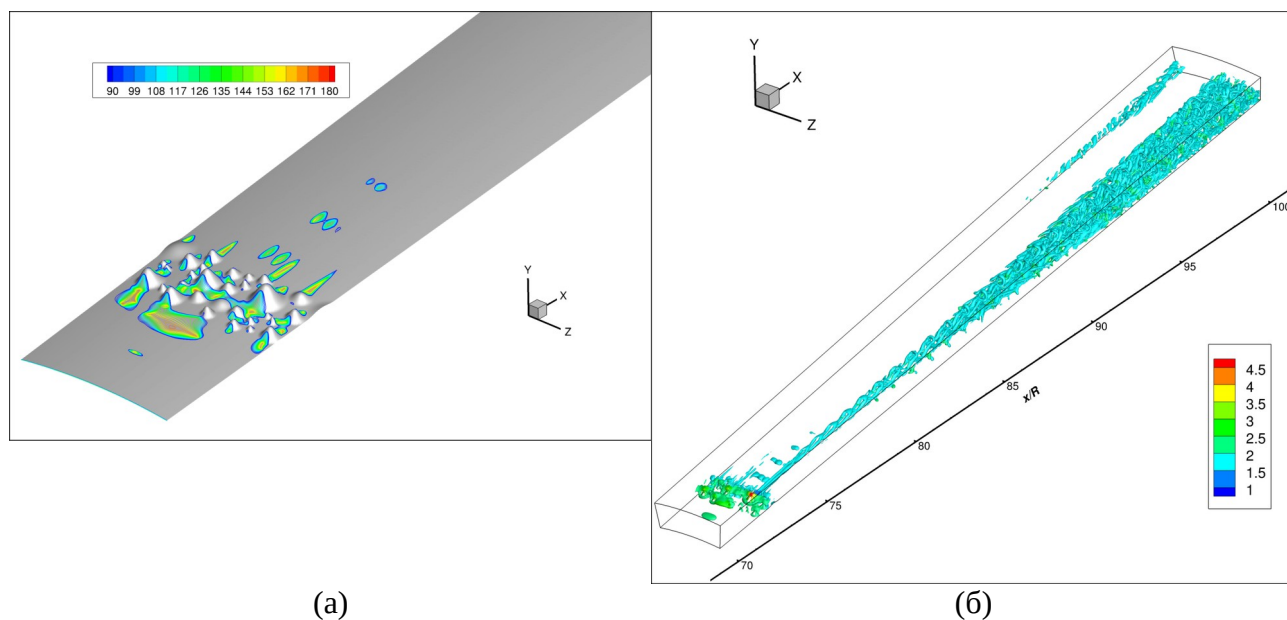


Рис. 1. Мгновенные направления течения вблизи поверхности конуса (а) и изо-поверхность Q-критерия при различных значениях локальной величины давления (б) для случайно распределенной шероховатости.

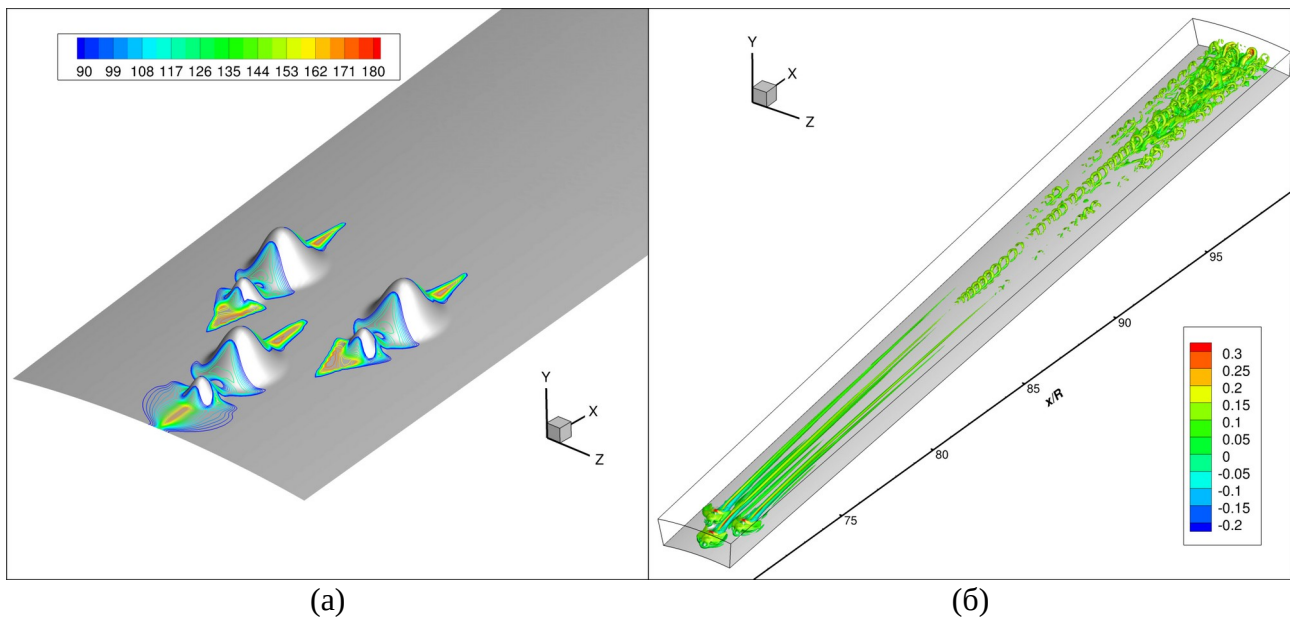


Рис. 2. Мгновенные направления течения вблизи поверхности конуса (а) и изо-поверхность Q-критерия при различных значениях локальной величины давления (б) для группы взаимодействующих элементов шероховатости.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Проведение численного моделирования с использованием десятков миллионов расчетных ячеек на обычных рабочих станциях невозможно как вследствие большого объема требуемой памяти, так и по времени счета. Поэтому использование кластера является определяющим для успешного достижения целей работы.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Д. В. Хотяновский, С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская, А. Н. Кудрявцев. Численное исследование развития возмущений, генерируемых элементами шероховатости в сверхзвуковом пограничном слое на затупленном конусе // Прикладная механика и техническая физика, 2019, № 3, С. 45–59. doi:10.15372/PMTF20190305.

Английский перевод:

D.V. Khotyanovsky, S.V. Kirilovskiy, T.V. Poplavskaya, A.N. Kudryavtsev. Numerical Study of the Evolution of Disturbances Generated by Roughness Elements in a Supersonic Boundary Layer on a Blunted Cone. J. Applied Mech. Tech. Phys., 2019, Vol. 60, No. 3, pp. 438-450.

doi:10.1134/S0021894419030052

Импакт-фактор журнала 0.669 (five year impact factor 2019).

2. D. Khotyanovsky, A. Kudryavtsev. Numerical study of surface roughness effects in the boundary layer of a blunted cone in a supersonic flow. AIP Conference Proceedings 2027, 030116 (2018); doi: 10.1063/1.5065210.