

Тема работы:

Численное моделирование развития неустойчивостей и перехода к турбулентности в высокоскоростных сдвиговых течениях.

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 №18-11-00246-П «Численное исследование возникновения и развития неустойчивостей в течениях разреженных газов», рук. А.Н. Кудрявцев, 2021-2022.

Аннотация.

На основе численного решения уравнений Навье–Стокса проводится исследование развития неустойчивостей в сверхзвуковых изобарических струях, истекающих из сопел квадратного и прямоугольного сечения в спутный поток. Моделирование проводится при различных значениях чисел Маха струи и спутного потока. Результаты численных расчетов позволяют выявить качественные и количественные различия в развитии неустойчивости в случаях со сверхзвуковым и дозвуковым спутным потоком, а также характерные особенности течения для прямоугольных струй.

Научное содержание работы.

1. Постановка задачи.

С помощью численного решения нестационарных уравнений Навье–Стокса проводится трехмерное моделирование истечения струи из сопла прямоугольной формы в спутный поток с разрешением вихревой структуры течения. Статические давления в струе p_j и внешнем спутном потоке p_a предполагаются равными $p_j = p_a$, что соответствует случаю идеально расширенной струи. Статические температуры потоков также полагались равными $T_j = T_a$. Для струи квадратного сечения на входной границе $x = 0$ расчетной области задается кусочно-постоянный «ударный» профиль основного течения для продольной компоненты скорости. На основное течение накладывается нестационарное возмущение нормальных компонент скорости в виде волны, распространяющейся по продольной координате x . Волновые параметры используемых возмущений выбирались следующим образом. Длина волны основного возмущения $\lambda = 2\pi/\alpha$ полагалась равной калибру струи $\lambda = h$, фазовая скорость – полусумме скоростей потоков $c = 0.5 (U_j + U_a)$. Рассматривались случаи с нулевым сдвигом фаз $\varphi = 0$, а также со сдвигом фазы трансверсальной компоненты скорости w на $\varphi = \pi/2$. В ряде расчетов в дополнение к возмущению на основной частоте ω задавались его первая гармоника с частотой 2ω и субгармоника с частотой $\omega/2$. В расчетах использовались достаточно большие начальные амплитуды возмущений $A = 0,01$.

2. Современное состояние проблемы.

В настоящее время в мире накоплен большой объем данных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований сжимаемых струйных течений. В последние десятилетия достигнут также значительный прогресс в использовании численного моделирования с разрешением вихревой структуры течения для предсказания характеристик

и поиска путей управления струйными течениями. Важнейшими прикладными задачами для современных численных методов и комплексов расчетных программ являются предсказание уровня шума струй двигателей летательных аппаратов, проверка способов снижения уровня шума с помощью различных методов пассивного и активного управления течением. Ключевая роль в решении этих проблем при больших числах Рейнольдса, соответствующих реальным полетным условиям, принадлежит численным подходам, основанным на методе крупных вихрей (LES). В этой области накоплен большой опыт эффективного использования численного моделирования, особенно для осесимметричных струй.

Интересным объектом исследования являются неосесимметричные трехмерные струйные течения. Со времен пионерской работы [1] растет понимание того, что неосесимметричные конфигурации струй имеют существенные преимущества по сравнению с их круглыми аналогами в определенных отношениях. В частности, они могут увеличить перемешивание с окружающей жидкостью. Из-за наличия режимов неустойчивости более высокого порядка неосесимметричные струи более неустойчивы, чем круглые конфигурации. Таким образом, неосесимметричные сопла могут быть эффективным средством пассивного управления потоком для улучшения крупномасштабного и мелкомасштабного перемешивания. Они также могут снизить уровень шума по сравнению со своими круглыми аналогами, что справедливо для дозвуковых и сверхзвуковых случаев. Неазимутальная кривизна вихревых колец приводит к важному явлению переключения осей. Это означает, что поперечное сечение развивающейся струи принимает форму, аналогичную форме струйного сопла, но с осями, повернутыми относительно исходного сопла. Подробные обзоры накопленных данных и результатов для сопел различной формы даны в [2-4]. В расчетно-экспериментальной работе [5] было проведено исследование истечения квадратных струй, в работах [6,7] проведено численное исследование струй прямоугольного сечения. Задачей данной работы является исследование динамики сверхзвуковых струй, истекающих в спутный поток из сопел квадратного и прямоугольного сечения при небольших числах Рейнольдса на начальном участке развития струи.

1. Sforza, P. M., Steiger, M. H., Trentacoste, N. Studies on three-dimensional viscous jets // AIAA J. 4 (5), 1966, 800–805.
2. Gutmark, E. J., Schadow, K. C., Yu, K. H. Mixing enhancement in supersonic free shear flows // Annu. Rev. Fluid Mech. 27, 1995, 375–417.
3. Gutmark, E. J. & Grinstein, F. F. 1999 Flow control with noncircular jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 31, 1999, 239–272.
4. Zaman, K. B. M. Q. Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries // J. Fluid Mech. 383, 1999, 197–228.
5. Grinstein, F. F., Gutmark, E., Parr, T. Near field dynamics of subsonic free square jets. A computational and experimental study. Phys. Fluids 7 (6), 1995, 1483–1497.
6. Grinstein, F. F. Vortex dynamics and entrainment in rectangular free jets. J. Fluid Mech., 437, 2001. 69–101.
7. B. Rembold. Direct and large-eddy simulation of compressible rectangular jet flow, Dissertation ETH No. 15081, 2003.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Численное моделирование проводится с помощью расчетного кода NuCFS, разработанного в Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН. Вычислительный код NuCFS предназначен для проведения численного моделирования на основе решения полных нестационарных уравнений Навье–Стокса сжимаемого теплопроводного газа с помощью современных WENO схем сквозного счета на гибридных вычислительных кластерах с графическими сопроцессорами (GPU). В NuCFS используется многоуровневая стратегия распараллеливания: полная вычислительная задача разбивается на достаточно крупные блоки, которые запускаются на различных вычислительных узлах, связанных сетью. Обмены между узлами производятся с помощью средств MPI (Message

Passing Interface). На каждом вычислительном узле используются нитевая параллелизация средствами OpenMP, центральные процессорные ядра (CPU) и общая память узла. Параллелизация на каждом GPU осуществляется средствами программной платформы CUDA с использованием процессора и памяти GPU. Использование такого подхода позволяет добиться высоких показателей параллельной эффективности и масштабируемости параллельной вычислительной задачи и в полной мере использовать возможности современных вычислительных кластеров гибридной архитектуры. Для пространственной дискретизации конвективных членов используется конечно-разностная WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) схема 5-го порядка точности. Диффузионные члены уравнений Навье–Стокса аппроксимируются с помощью центрально-разностных формул 2-го порядка. Численный алгоритм является явным, для интегрирования численного решения по времени используется алгоритм Рунге–Кутты–Гилла 4-го порядка точности. Шаг по времени автоматически выбирается в процессе численного расчета из условия устойчивости интегрирования по времени. Используемый численный код ранее с успехом использовался при моделировании развития неустойчивости и перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое.

4. Полученные результаты.

Результаты проведенного численного моделирования показывают, что во всех рассмотренных случаях неустойчивость быстро развивается на границе струи, и затем распространяется на всю струю. Неустойчивость при более низком числе Рейнольдса развивается более медленно, но особенное различие наблюдается между случаями со сверхзвуковым и дозвуковым спутным потоком. В первом случае, рис. 1а, возмущения сохраняют достаточно регулярную структуру вплоть до выходной границы расчетной области, расположенной на расстоянии $40h$. В случае дозвукового спутного потока, рис. 1б, неустойчивость развивается заметно быстрее, и, начиная с некоторого сечения, происходит интенсивное вихреобразование, что интенсифицирует перемешивание с окружающим газом. Развитие течения внутри ядра струи иллюстрируется в нескольких сечениях вдоль продольной координаты на рис. 2. Интересной особенностью течения является интенсивное излучение звуковых волн в спутный поток, хорошо заметных на полях плотности.

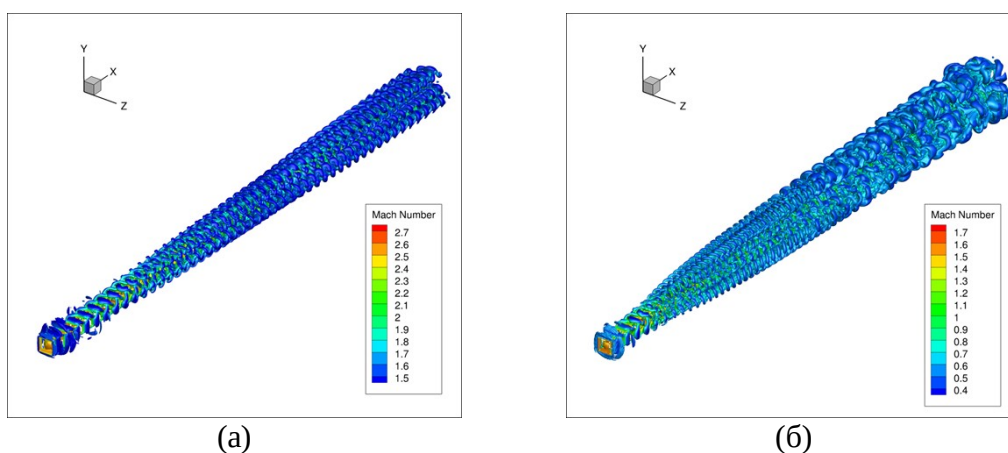


Рис. 1. Визуализация Q-критерия мгновенного трехмерного поля течения для $M_j = 2.5$, $M_a = 1.5$ (а) и $M_j = 1.5$, $M_a = 0.5$ (б).

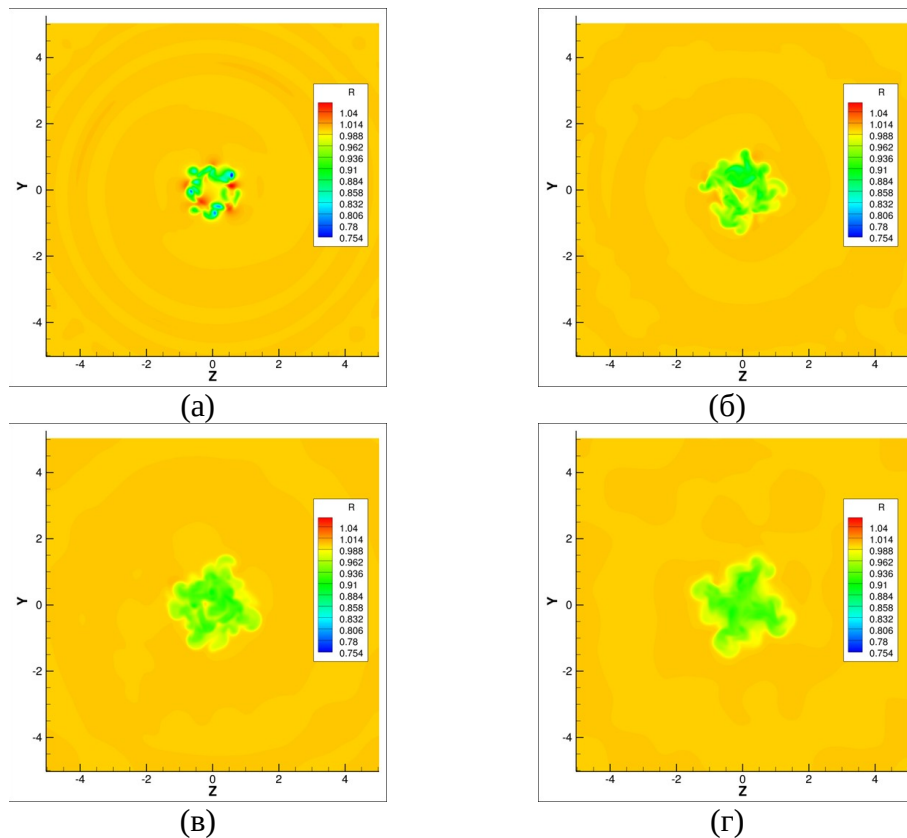


Рис. 2. Мгновенные поля плотности в нескольких сечениях для $M_j = 2.5$, $M_a = 1.5$: $x = 10$ (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г).

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. Кудрявцев А.Н., Хотяновский Д.В. Нелинейное развитие возмущений и излучение звука в сверхзвуковом слое смещения // Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике : VIII Всерос. конф. (Геленджик, 20-25 сент. 2021 г.).
2. Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N. Numerical study of rectangular jet instabilities // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2022) (Novosibirsk, 8-14 Aug. 2022) : Abstr. Pt.I. -Novosibirsk: SB RAS, 2022. -P. 76-77. DOI: 10.53954/9785604788967_76.
3. Д.В. Хотяновский, А.А. Шершнева, А.Н. Кудрявцев. Численное исследование развития неустойчивостей в сверхзвуковых струях прямоугольного сечения. (Принята для публикации в журнале «Теплофизика и Аэромеханика»)