

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский

Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Новосибирск,

khotyanovsky@itam.nsc.ru

На основе модели Навье–Стокса–Фурье для сжимаемого совершенного газа проводится вихререзающее численное моделирование развития неустойчивостей в сверхзвуковых струях, истекающих из прямоугольных сопел. В данном случае представлены результаты моделирования для изобарической струи одноатомного газа (аргон), истекающей в спутный внешний поток из сопла квадратного сечения. Во входном сечении задается кусочно-постоянный (ударный) профиль струи со скоростью потока $U = U_j$, $|y|, |z| \leq h/2$ и $U = U_a$, $|y|, |z| > h/2$. Здесь U_j , U_a – соответственно скорости струи и спутного потока, h – размер поперечного сечения струи. Температура и давление двух потоков полагаются равными: $p_j = p_a$, $T_j = T_a$. Рассматриваются два случая: в первом спутный поток является сверхзвуковым, $M_j = 2.5$, $M_a = 1.5$, а во втором – дозвуковым, $M_j = 1.5$, $M_a = 0.5$. Числа Маха выбраны таким образом, чтобы конвективное число Маха $M_c = (U_j - U_a)/(a_j + a_a) = 0.5$ было одинаковым в обоих случаях (a_j , a_a – скорости звука в соответствующих потоках). Расчеты проводятся для двух существенно различных значений числа Рейнольдса $Re = U_j h/\nu = 5000$ и $Re = 1 \cdot 10^5$.

На основное течение во входном сечении накладываются нестационарные возмущения нормальной v и трансверсальной w компонент скорости в виде бегущих волн. Функции формы возмущений суть $\hat{v} = \hat{w} = 1/(\cosh(2y) \cdot \cosh(2z))$. Длина волны основного возмущения $\lambda = 2\pi/\alpha$ полагается равной ширине струи $\lambda = h$, фазовая скорость полагается равной полусумме скоростей струи и спутного потока $c = 0.5 (U_j + U_a)$. В некоторых расчетах, в дополнение к возмущению «фундаментальной» частоты $\omega = \alpha c$, задается также его первая гармоника с частотой 2ω и

субгармоника с частотой $\omega/2$. Начальные амплитуды возмущений задаются достаточно большими: $A = 0.01$. Рассматриваются различные фазовые сдвиги между возмущениями двух компонент скорости.

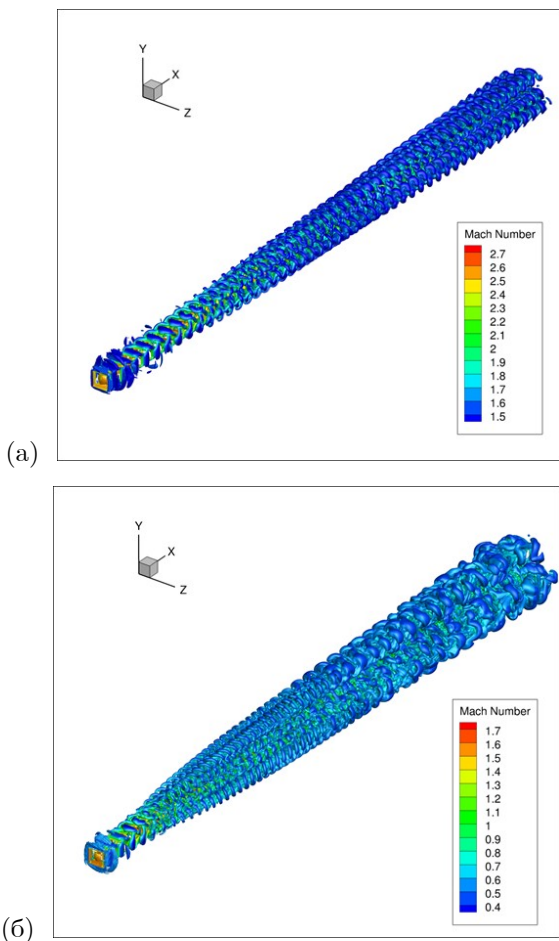


Рис. 1. Визуализация Q-критерия для мгновенного трехмерного поля течения при $M_j = 2.5$, $M_a = 1.5$ (а) и $M_j = 1.5$, $M_a = 0.5$ (б)

Вычислительная область имеет форму параллелепипеда с длиной $L_x = 40 h$, и размерами $L_y = 10 h$, $L_z = 10 h$ по нормальным осям. В некоторых расчетах используется удлиненная расчетная область с $L_x = 80 h$. Расчетная сетка сгущается в ядре и ближнем поле струи. Большая часть тестовых

расчетов выполняется на сетке с числом узлов $N_x = 768$, $N_y = 220$, $N_z = 220$ (37 млн). В некоторых расчетах используется более подробная сетка с числом узлов $N_x = 1152$, $N_y = 330$, $N_z = 330$ (125 млн). Расчеты проводились с помощью расчетного кода NuCFS, разработанного в ИТПМ СО РАН, на гибридном вычислительном сервере, оснащенный восемью графическими ускорителями.

Численные результаты 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 медленнее, 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 $40 h$. В случае дозвукового спутного потока, рис. 1б, неустойчивость развивается заметно быстрее, и, начиная с некоторого сечения, происходит активное вихреобразование, что интенсифицирует перемешивание с окружающим газом. Интересной особенностью течения является интенсивное излучение звуковых волн в спутный поток, хорошо заметных на полях плотности.

Работа поддержана РФФ, грант 18-11-00246-П.