



Моделирование недорасширенной сверхзвуковой струи: ударно-волновые структуры и турбулентность

Широков И.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

Разработка и валидация методов компьютерного моделирования струйных течений представляется важной задачей, поскольку подобные течения широко распространены. В работе приведены результаты применения численного алгоритма, основанного на регуляризованных, или квазигазодинамических (КГД) уравнениях к моделированию ударно-волновых структур, возникающих в недорасширенной сверхзвуковой газовой струе, при этом моделирование проводится в трехмерной постановке.

В работе [1] приведены экспериментальные результаты, полученные в лабораторных условиях при исследовании истечения воздушных струй в область неподвижного воздуха. Полученные в этих работах осевые профили давления и числа Маха могут служить эталонными данными при валидации методов компьютерного моделирования. В экспериментах наблюдается порядка 10 ударно-волновых структур («бочек»), возникающих при струйных течениях на нерасчетных режимах. Разностные алгоритмы часто не позволяют в нестационарном течении разрешить наблюдаемое в эксперименте число «бочек». Примененный в данной работе КГД алгоритм позволяет приблизить численный расчет к данным эксперимента. Кроме того, КГД алгоритм позволяет проводить прямое моделирование турбулентных областей, возникающих при втекании струи в область неподвижного газа.

Основой для постановки задачи в настоящей работе является один из вариантов эксперимен-

тальной постановки из [1]. Струя круглого сечения втекает в область, имеющую форму прямоугольного параллелепипеда, заполненную неподвижным газом при нормальных условиях. Диаметр струи на входе $D = 0.0508$ м. Газ считаем совершенным, постоянная адиабаты $\gamma = 1.4$, газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кг·К), число Прандтля $Pr = 0.737$.

Согласно [1], число Маха на срезе сопла составляет $Ma = 2$, число Маха полностью расширенной струи $Ma_j = 2.236$. Используя изоэнтропические формулы, можно рассчитать параметры газа на срезе сопла: давление $p_0 = 146495$ Па, плотность $\rho_0 = 3.13418$ кг/м³, температура $T_0 = 162.861$ К. В неподвижной области давление $p_1 = 101325$ Па, плотность $\rho_1 = 1.20433$ кг/м³, температура $T_1 = 293.15$ К. Степень нерасчетности струи $p_0/p_1 = 1.46$. Число Рейнольдса, вычисленное по начальной вязкости μ_0 , размеру сопла D и начальной скорости $Ma \cdot c_0$, составляет $Re = 7 \cdot 10^6$.

В качестве математической модели используем КГД уравнения [2], реализованные на равномерной кубической сетке. На диаметр струи на входе приходится от 10 до 30 ячеек сетки. Использу-

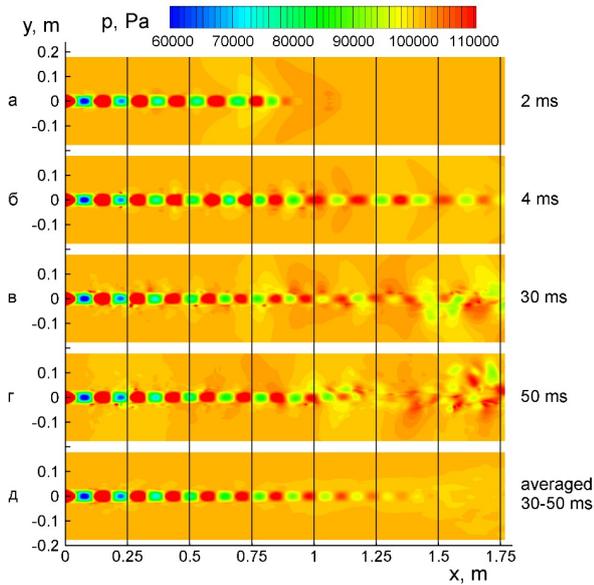


Рис. 1. Мгновенные (а–г) и осредненные от 30 до 50 мс (д) уровни давления в осевом сечении

ем явную схему с центральными разностями по пространству. На равномерной пространственной сетке аппроксимация будет иметь второй порядок точности, по времени схема имеет первый порядок точности. В зависимости от варианта расчета, машинное время составляет от 30 мин до 20 часов, при использовании от 96 до 128 процессорных ядер комплекса К-100 [3] (реализованы параллельные вычисления на основе стандарта MPI).

На Рис. 1 показаны рассчитанные мгновенные уровни давления в сечении $z = 0$ для моментов времени 2, 4, 30, 50 мс, и осредненные от 30 до 50 мс уровни давления, полученные при 10 ячейках

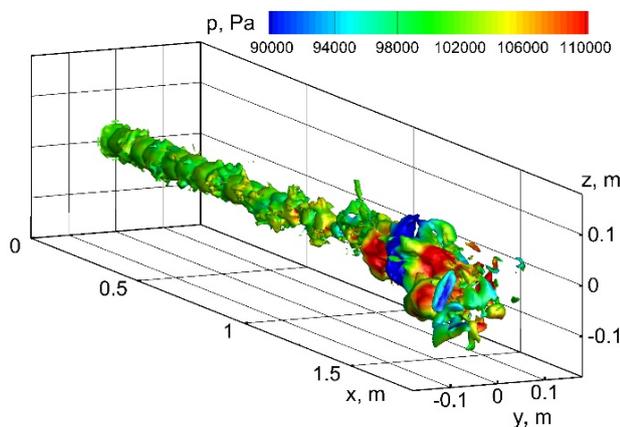


Рис. 2. Мгновенные (слева) и осредненные от 30 до 44 мс (справа) уровни давления, нанесенные на изоповерхности модуля градиента давления при 44 мс

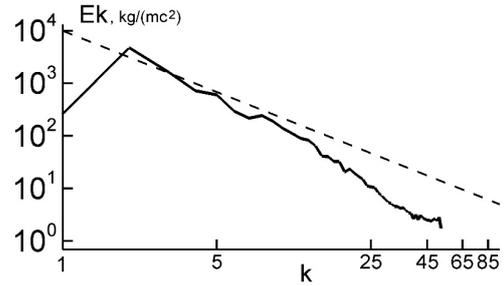


Рис. 3. Энергетический спектр удельной кинетической энергии турбулентной зоны струи при 44 мс (сплошная кривая), прямая с угловым коэффициентом $-5/3$ (пунктир)

на диаметр струи. На Рис. 2 приведены уровни давления, нанесенные на изоповерхности градиента давления при 44 мс в неосредненном виде.

На Рис. 3 сплошной линией показан спектр удельной кинетической энергии нестационарного участка струи, соответствующего Рис. 2. Видно, что применяемый в настоящей работе численный метод позволяет моделировать спектр пульсаций на части инерционного интервала. На Рис. 4 приведены осевые профили осредненного давления: экспериментальные данные [1] и результаты моделирования на основе КГД алгоритма на различных сетках. Результаты на более подробных сетках (кривые 3 и 4) показывают достаточно хорошее соответствие эксперименту.

Автор выражает благодарность профессору Т.Г. Елизаровой за большую помощь в постановке задачи.

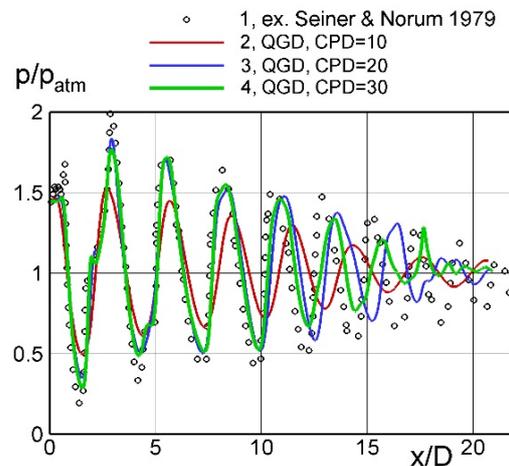


Рис. 4. Осевые профили осредненного нормированного давления, символы 1: эксперимент [1], кривые 2–4: расчеты

Список литературы

- [1] *Seiner J.M., Norum T.D.* Experiments of shock associated noise on supersonic jets // AIAA 12th fluid and plasma dynamic conference. July 23-25, 1979. <https://doi.org/10.2514/6.1979-1526>
- [2] *Елизарова Т.Г., Широков И.А.* Регуляризованные уравнения и примеры их использования при моделировании газодинамических течений. М.: МАКС Пресс, 2017. 136 с.
- [3] K-100 System, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow; Available at <https://www.kiam.ru/MVS/resources/k100.htm>