

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

Казакова Е.И., ДонНТУ,
Рудов Ю.М., СевНТУ

Предложен новый подход в управлении параметрами, влияющими на качественные и количественные характеристики сверхзвуковых струйных течений. Теоретически определены и экспериментально подтверждены их оптимальные параметры. Даны рекомендации по использованию сопловых устройств.

Экспериментальные исследования показали, что при натекании струй на преграды формируется сложный поток с разветвленной системой скачков уплотнения, содержащей области местного дозвукового течения, контактные разрывы, циркуляционные зоны и участки течения с большими градиентами параметров. Указанная сложность потока создает и определенные трудности при управлении.

Под управлением понимается получение физической картины изучаемых течений; построение волновой структуры, границ растекающегося потока, выделение характерных линий, точек, областей; определение профилей давлений и скоростей; получение линий постоянных давлений, чисел Маха и температур.

В ходе численных расчетов оценивалось влияние большого комплекса начальных параметров на качественные и количественные характеристики исследуемых течений.

Для решения поставленной задачи пользовались моделью идеального совершенного газа, описываемой уравнениями Эйлера, которые являются математическим выражением законов сохранения массы, импульса, энергии

$$\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial r} = -\frac{f}{r},$$

где

$$a = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{Bmatrix}; \quad b = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ \rho u^2 + p \\ (e + p)v \end{Bmatrix}; \quad f = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Система уравнений замыкалась уравнением состояния

$$e = \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2), \quad (2)$$

На границах расчетной области ставились обычные для идеального газа граничные условия:

- условия непротекания на поверхности преграды;
- условие сверхзвукового входа на срезе сопла;
- условие на свободной границе.

Обтекание образца, представляющего собой затупленное тело, расширяющимся потоком происходит при испытании головных частей летательных аппаратов в наземных условиях с помощью сильно недорасширенных сверхзвуковых струй из профилированного сопла или при обтекании тела струей из конусного сопла. Особенность такого обтекания заключается в наличии отошедшей ударной волны перед головной частью и существенно неравномерным набегающим потоком. При этом обычно задается режим в форкамере сопловой установки стенда, а течение на срезе сопла – установившееся течение задачи о запуске сопла.

Натекание потока на поверхность тела, температура которого отлична от температуры потока, сопровождается теплообменом. При этом скорость набегающего потока U_n зависит от продольной координаты x . В большинстве практических задач теплообмена изменение U_n по поперечной координате y во внешнем потоке мало по сравнению с изменением U по y в пристенной области. Эта область называется динамическим пограничным слоем и здесь x -составляющая скорости возрастает от нуля на стенке до предельной величины, равной U_n . Обычно за толщину пограничного слоя принимается значение y , при котором достигает $0,995U_n$.

Таким образом, задача управления обтеканием образца разбивается на два этапа. Первый этап заключается в управлении внешнего набегающего потока, второй – в решении задачи переноса количества движения и тепла вблизи поверхности тела. Последняя задача описывается уравнением пограничного слоя.

В свою очередь задача управления внешним набегающим потоком разбивается естественным образом на две задачи. Первая задача состоит в управлении внутренним течением от форкамеры до среза сопла, вторая – в управлении внешнего набегающего потока.

Течение в осесимметричном сопле предполагает невязким и изоэнтропическим. Пусть внутри сопла не возникают скачки уплотнения или они достаточно слабы. Этого добиваются специальным профилированием околосзвуковой частей сопла.

Рассматриваемый метод исключает особенность в расчете параметров потока газа на звуковой линии и, кроме задания энтальпии и энтропии на входе, не требуется дополнительных условий. Значения энтальпии и энтропии находятся из уравнения Бернулли и условия изоэнтропичности.

Газодинамические параметры v, p, ρ , нормированы на величины $v_*, p_* V_*^2, \rho$ соответственно, где символом «*» обозначены значения параметров в критическом сечении. Геометрические параметры нормированы на L_* – радиус критического сечения сопла.

С целью спрямления расчетной области выбираем криволинейную систему координат (ξ, η) ,

где $\eta = \eta(x, y)$ – уравнение линии тока,

$\xi = \xi(x, y)$ – расстояние вдоль линии тока.

Новые независимые переменные ξ, η определяются из решения системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \xi} = \cos \theta, \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} = \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$x(\xi = 0, \eta) = 0, \quad y(\xi = 0, \eta) = \sqrt{\eta}.$$

В системе новых независимых переменных (ξ, η) уравнение неразрывности и условие безвихревого течения запишутся в виде

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho v y \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \cos \theta - \frac{\partial x}{\partial \eta} \sin \theta \right) \right) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(v \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \cos \theta + \frac{\partial y}{\partial \eta} \sin \theta \right) \right) - \frac{\partial v}{\partial \eta} = 0, \quad (5)$$

где (x, y) – независимые переменные исходной системы координат;
 (ξ, η) – новые независимые переменные криволинейной системы координат;

v – модуль вектора скорости;

θ – угол вектора скорости, отсчитываемый от направления оси Ox .

Уравнение неразрывности (4) аналогично уравнению для трубки тока

$$\rho v s = l(\eta) \quad (6)$$

где $s(\xi, \eta) = y \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \cos \theta - \frac{\partial x}{\partial \eta} \sin \theta \right)$ – эквивалент площади поперечного сечения трубки тока,
 $\eta = const.$

Вдоль каждой линии тока $\eta = const.$ точка звуковой скорости соответствует условию

$$l(\eta) = s_*(\eta) = \min s(\xi, \eta),$$

где $v = v_*, \rho = \rho_*$.

Исключая из уравнения (6) ρ , с помощью уравнения Бернулли получим нелинейное уравнение для определения модуля скорости v в каждой точке линии тока:

$$v^{\gamma-1}(\xi, \eta) - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} v^{\gamma+1}(\xi, \eta) = \frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{s_*(\eta)}{s(\xi, \eta)} \right)^{\gamma-1}. \quad (7)$$

Направление вектора скорости в каждой точке определяется интегрированием уравнения (5), которое запишем в виде

$$v \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \cos \theta + \frac{\partial y}{\partial \eta} \sin \theta \right) = \int_0^{\xi} \frac{\partial v}{\partial \eta} d\xi \quad (8)$$

В переменных ξ, η расчетная область представляет собой полосу $G = \{0 \leq \eta \leq 1, 0 \leq \xi \leq H\}$. Разобьем прямоугольную область G равномерной сеткой с шагом h_1 вдоль направления ξ и с шагом h_2 вдоль направления η . Зададим начальное поле направлений вектора скорости θ_{ij} ($i = 0, 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, 2, \dots, n$) в узлах сетки с учетом условия симметрии $\theta_{i0} = 0$ на оси сопла и условия непроницаемости $\text{tg} \theta_{ij} = f(x)$ на его стенке, где $y = f(x)$ – уравнение образующей сопла.

Из (3) получим разностные уравнения для определения значений координат x, y в узлах сетки:

$$\begin{cases} x_{i+1,j} = x_{i,j} + 0,5(\cos \theta_{i+1,j} + \cos \theta_{i,j}) h_1; \\ y_{i+1,j} = y_{i,j} + 0,5(\sin \theta_{i+1,j} + \sin \theta_{i,j}) h_1; \end{cases} \quad (9)$$

для $i = 0, \dots, m-1; j = 1, \dots, n-1$ и $x_{0,j} = 0; y_{0,j} = \sqrt{j} h_2$.

Разностный аналог уравнения (7) запишется в виде

$$\left(v_{i,j+1/2} \right)^{\gamma-1} - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \left(v_{i,j+1/2} \right)^{\gamma+1} = \frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{s_{*(j+1)}}{s_{i,j+1/2}} \right)^{\gamma-1} \quad (10)$$

Решение уравнения (10) определяет модуль скорости на вертикальных сторонах разностных ячеек. Для определения $s_{i,j+1/2}$ и $s_{*(j+1)}$ запишем соотношение

$$s_{i,j+1/2} = y_{i,j+1/2} \left(\cos \theta_{i,j+1/2} \frac{y_{i,j+1} - y_{i,j}}{h_2} - \sin \theta_{i,j+1/2} \frac{x_{i,j+1} - x_{i,j}}{h_2} \right) \quad (11)$$

где

$$y_{i,j+1/2} = \frac{y_{i,j} + y_{i,j+1}}{2}, \quad \theta_{i,j+1/2} = \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i,j+1}}{2}.$$

Критическое значение $i = i_*$ для каждой трубки тока $\eta_j \leq \eta \leq \eta_{i+1}$ соответствует $\min s_{i,j+1/2}$.

Уточнение поля направлений $\theta_{i,j}$ по найденным значениям $v_{i,j+1/2}$ осуществляется с помощью условия безвихревого характера течения (8). Для этого из (8) получим разностное трансцендентное уравнение

$$A \cos \theta_{i,j} + B \sin \theta_{i,j} = C, \tag{12}$$

где

$$\begin{aligned} A &= 0,5(v_{i,j+1/2} + v_{i,j-1/2}) \frac{x_{i,j+1} - x_{i,j-1}}{2h_2}; \\ B &= 0,5(v_{i,j+1/2} + v_{i,j-1/2}) \frac{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}}{2h_2}; \\ C &= \frac{h_1}{6} \left(\frac{v_{0,j+1/2} - v_{0,j-1/2}}{h_2} - \frac{v_{i,j+1/2} - v_{i,j-1/2}}{h_2} + \right. \\ &+ 2 \sum_{k=1}^i \frac{v_{k,j+1/2} - v_{k,j-1/2} + v_{k-1,j+1/2} - v_{k-1,j-1/2}}{h_2} + \\ &\left. + 2 \sum_{k=1}^i \frac{v_{k,j+1/2} - v_{k,j-1/2}}{h_2} \right). \end{aligned}$$

Проведенные исследования позволили дать классификацию различных режимов взаимодействия струй с преградами, построить ударно-волновую структуру течения, определить газодинамические и геометрические характеристики.

Для решения задач взаимодействия газовых струй с различными преградами, особенно в случае симметричного течения, когда оси струи и преграды совпадают, прежде всего, необходимо знать газодинамические параметры на оси. Для начального участка недорасширенных и перерасширенных струй разработаны приближенные методы расчета давлений и чисел Маха, которые нами в расчетах были использованы.

За пределами начального газодинамического участка ударно-волновая структура носит периодический характер, что в свою очередь, влияет на форму струи, делая ее похожей на состыкованные «бочки». В каждой такой «бочке» существует ударная волна, пересекающая ось (под произвольным или прямым углом), что обуславливает скачкообразное изменение чисел Маха и статических давлений на оси.

Результаты расчетов подтверждаются опытными данными, полученными на газодинамической трубе. Эксперименты были проведены для чисел Маха

$$M_a = 1 \div 3;$$

нерасчетность истечения струй

$$n = 0,5 \div 12,8;$$

в качестве преград применялись плита, сфера, конус.

Для создания математической модели сверхзвуковых струйных течений необходимо знать их физическую природу. Представляет практический интерес описать ударно-волновую структуру газовых струй, которая является весьма чуткой к малейшему изменению начальных газодинамических параметров внутри сопел и их геометрических характеристик.

Для указанных целей нами широко была использована кинофотосъемка сверхзвуковых течений через оптический прибор ИАБ-451. Известно, что при определенных параметрах возникают неустойчивые течения, сопровождающиеся акустическими эффектами и интенсивными колебаниями волновой структуры. Применение скоростной киносъемки позволяет разобраться в физическом механизме таких режимов и указать диапазон параметров их существования.

При истечении струй из связки сопел, а также при взаимодействии их с различными конструкциями образуются достаточно интенсивные возвратные течения газа. Для их исследования использованы специальные зонды для измерения силовых и векторных характеристик таких потоков.

Наглядную физическую картину возвратных течений дает широко используемый газодинамический метод обмазки исследуемых

конструкцій вязко-красящимися речовинами. Нами удосконавлено даний метод: запропоновано спеціальні моделі, спрощаючі експеримент і дозволяючі отримати картини ліній току во внутрішніх областях. Для вимірювання газодинамічних параметрів нами створено ряд насадок спеціальної конструкції, якими можна отримати профілі повного і статистического тиску в труднодоступних внутрішніх областях течія.

Вказані методи застосовуються для експериментального дослідження течій газу: в вільних односоплових і багато соплових струях; при взаємодії таких струй з перегородками; при істеченні струй в надзвуковому спутному потоці. Спільне використання результатів кінофотозйомки, масляних картин растекания газу і вимірювань параметрів дозволяє описати фізичну картину тривимірних струйних течій газу.

Відомо, що при істеченні високонапорного газу з сопел Лавалю утворюються надзвукові струї, які мають розвинуту ударно-хвильову структуру. Такі струї є дуже інтенсивними, дальнобійними, а при певних початкових газодинамічних параметрах їх характеристики є пульсуючими. Відомі властивості повітряних струй дозволяють їх застосовувати не тільки в традиційних областях – авіаційної і ракетної техніки, – але і в різних пристроях для очищення, обдування і розпилення.

Соплові пристрої рекомендується використовувати:

- для очищення і обдування від налипання вязких і сыпучих речовин на різні поверхності, наприклад, кузов автомобіля, залізнична платформа, стрічка транспортера;
- для очищення залізничних рейок;
- для очищення від різних нальотів внутрішньої поверхності труб;
- для очищення корпусів морських судів (наприклад, від ракушечника);
- для очищення різних конструкцій від снігу і льоду;
- для санітарної обробки в цілях дезінфекції тваринницьких приміщень і інших сільськогосподарських об'єктів;
- для промислового опрыскивания садів, теплиц і виноградників;

- для интенсификации процессов в металлургии и нефтегазодобывающей промышленности;
- для бурения скважин.

В перечисленных приложениях следует использовать микросопла, чтобы работать на достаточно приемлемых давлениях, получаемых промышленными компрессорами.

Расчетами обосновано и экспериментально подтверждено, что оптимальными параметрами являются: давление в камере сопла 6-9 атмосфер; число Маха на срезе сопла 1,6-2,2.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Воронцов А.Г., Донецкий национальный технический университет

Измерительные каналы (ИК) систем высокочастотной вибродиагностики (ВВД) функционируют в условиях действия интенсивных шумов и помех. Это сказывается на качестве диагностики и в ряде случаев, как, например, при диагностике тихоходных роторных машин, может существенно снизить достоверность выносимых диагнозов. Объективная оценка свойств ИК в составе системы ВВД требует определения его метрологических характеристик с учетом влияния вышеуказанных факторов. Существующие методики метрологической аттестации каналов информационно – измерительных систем (ИИС), предназначенных для определения параметров вибросигналов, не учитывают влияние вибрации от посторонних источников на результат измерений [1]. Известные рекомендации [2] по учету влияния внешних воздействий на метрологические характеристики и показатели каналов могут быть распространены на измерительные каналы систем ВВД, однако получаемые при этом результаты определяются не только свойствами каналов, но и условиями, в которых осуществлялась их метрологическая аттестация. Поэтому они не могут быть использованы для оценки свойств собственно каналов.