УДК 533

ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ОТРЫВА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

Голуб В.В.[1], Савельев А.С.[2]

[1]*Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

АННОТАЦИЯ

В работе проведены скоростная шлирен-визуализация и измерение распределения скорости методом particle image velocimetry (PIV) затопленной сверхзвуковой струи с числом Маха M=2, истекающей из сопла, работающего в режиме перерасширения. Разработана параллельная программа обработки полученных цифровых изображений, позволяющая исследовать процесс формирования несимметричного отрывного течения за соплом. С помощью цифровой видеорегистрации теплерограмм, цифровой регистрации давлений и цифровой обработки снятых изображений получена зависимость между относительной величиной боковых нагрузок (к тяге сопла) от величины перерасширения.

ВВЕДЕНИЕ

Сопло ракетоносителя на низких высотах функционирует в режиме перерасширения, часто приводящим к отрыву потока в сопле [1]. При этом на старте ракеты реализуется режим с максимальным значением перерасширения, поскольку вблизи поверхности Земли атмосферное давление максимально. Перерасширенный режим истечения характеризуется наличием двух косых скачков уплотнения, сходящих с кромок сопла. При определенном значении соотношения атмосферного давления к статическому давлению струи реализуется нерегулярное взаимодействие этих скачков друг с другом с образованием мостообразной структуры, в которой присутствует прямой скачок уплотнения, находящийся на оси сопла. Кроме того, такое нерегулярное взаимодействие приводит к заходу всей структуры скачков внутрь сопла ракеты. Взаимодействие скачка с развитым пограничным слоем вблизи кромок сопла приводит к его отрыву. Отрыв пограничного слоя приводит к развитию несимметричного нестационарного развитого отрыва потока, а значит к непостоянной по времени боковой нагрузке на сопло. Хотя современные ракетные сопла имеют высокую продольную жесткость, они не рассчитаны на высокие боковые нагрузки. С проблемой высокочастотных боковых нагрузок столкнулись при испытаниях двигателя Вулкан ракетоносителя Ариан-5 [2], [3], [4]. В ходе исследований было показано, что при перерасширенном режиме истечения реализуется две картины течения струи за соплом, т.н. свободный (Free Shock Separation, FSS) и ограниченный (Restricted Shock Separation, RSS) отрывы, при этом боковые нагрузки возникают в обоих случаях [5].

Современные средства визуализации позволяют проводить съемку методом Теплера со скоростью несколько тысяч кадров в секунду в течение секунд. При этом современные вычислительные машины позволяют проводить обработку большого количества полученных цифровых изображений и проводить прямое измерение положения точки отрыва. В данной работе проведены цифровые скоростная шлирен-визуализация и обработка полученных теплерограмм в случае перерасширенного сверхзвукового истечения из сопла при реализации свободного отрыва FSS.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на сверхзвуковой атмосферно-вакуумной трубе СТ-4 (рис.1, 1 – пневмозадвижка, 2 – ресивер, 3 – сопло, 4 – рабочая камера, 5 – окно для визуализации, 6 – диффузор, 7 – вакуумный затвор, 8 – газгольдеры) с соплом Лаваля, формирующим струю с числом Маха M = 2 и значением статического давления p_{st} = 0.15 атм. В рабочую камеру 4 из сопла 3 с диаметром выходного сечения D=110 мм истекает сверхзвуковая струя воздуха с числом Маха M=2. Далее воздух через диффузор 6 и газовую линию наполнял заранее откачанные газгольдеры 8. Общий объем газгольдеров составляет величину V=240 м^3. Через оптические стекла 5 проводилась визуализация течения. На рис.2 представлена схема оптической визуализации течения за выходным сечением сопла: 1 – сопло, 2 – система косых скачков, 3 – рабочая камера, 4 – вход в диффузор, 5 – теневой прибор, 6 – подсветка, 7 – видеокамера, 8 – датчики давления, 9 – АЦП, 10 – регистрирующий компьютер.

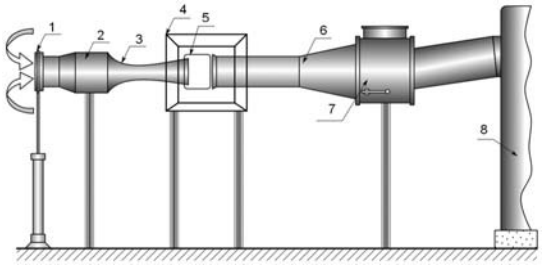

Рис.1 Сверхзвуковая атмосферно-вакуумная труба СТ-4.

Затопленная сверхзвуковая струя визуализировалась с помощью цифрового шлирен-фотографирования методом ножа и щели, методом Теплера. Оптическая система состояла из теневого прибора ИАБ-451 [6], дуговой ксеноновой лампы XBO 150W/1 в качестве подсветки, скоростной цифровой видеокамеры Photron FASTCAM SA4, позволяющей регистрировать в течение двух секунд 20000 кадров с цифровой экспозицией 1 мкс, разрешением кадра 0.25 Мпикс.

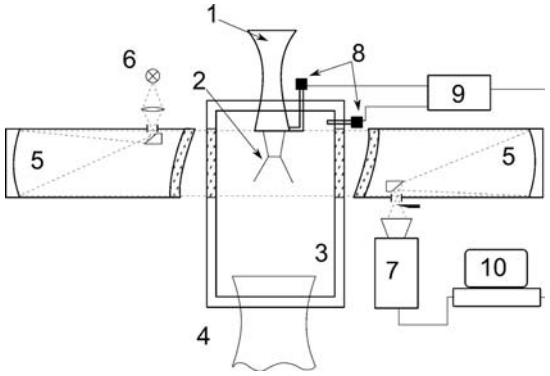

Рис.2 Схема шлирен-физуализации течения с отрывом струи от стенок сопла.

Вся память видеокамеры разбивалась на десять частей, причем каждая часть заполнялась по команде экспериментатора. Процесс фоторегистрации синхронизовался с регистрацией статического давления в выходном сечении сопла и давления в рабочей камере (окружающее давление).

Эксперимент показал, что характерная частота нестационарного процесса формирования асимметричного отрыва составляет 1-2 кГц, что на порядок меньше скорости скоростной видеосъемки. Это обстоятельство позволило получить детальную динамику изменения положений точек отрыва вблизи верхней и нижней кромок сопла. Каждый кадр из одной серии, т.е. соответствующей одному значению перерасширения, обрабатывался с помощью разработанного параллельного алгоритма, реализованного на командном языке пакета LaVision DaVis 7.2, который по синтаксису схож с языком программирования C++.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результат основных шагов алгоритма представлен на рис.3: слева направо – результат наложения линейного фильтра Лаплас-1 (обострение фронта ударных волн), результат нормализации изображения, приближение скачков прямыми линиями. На представленных цифровых фотографиях сверхзвуковой поток распространяется справа налево.

Первый шаг обработки изображений заключается в наложении линейного фильтра Лаплас-1, обостряющего фронт ударных волн. Затем проводилась нормализация изображения, то есть сигнал каждого пикселя находился в диапазоне [0; 1], что позволяло выделить пиксели, находящиеся на фронте ударной волны. Полученные координаты этих пикселей методом ми-

нимизации среднеквадратичного отклонения аппроксимировались прямой.

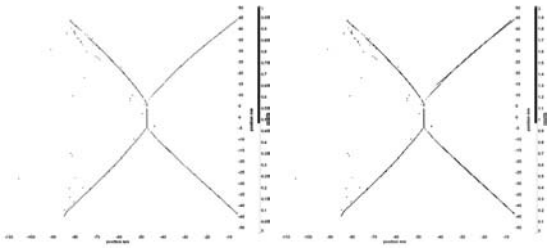

Рис.3 Цифровая обработка теплерограмм.

Поскольку уравнение внутренней поверхности сопла известно, а также координаты пикселя привязаны к координатам внутри рабочей камеры, то нахождение точки пересечения скачка уплотнения с поверхностью сопла дает положение точки отрыва потока от стенок момент времени, соответствующий времени экспозиции кадра. Данный алгоритм применялся последовательно ко всем кадрам серии (т.е. к серии теплерограмм, полученным при одном значении перерасширения), затем ко всем сериям (около 10 серий за один эксперимент).

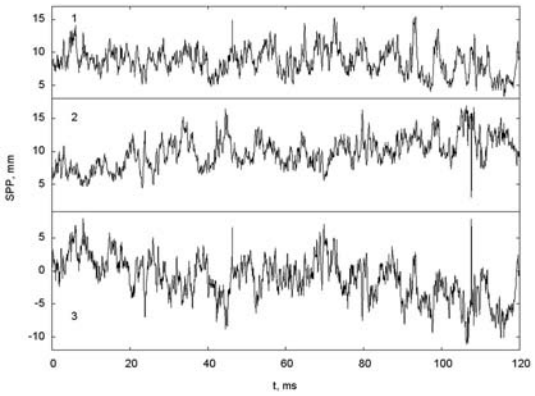

Рис.4 Результат цифровой обработки теплерограмм для значения величины перерасширения n=0.68.

В результате получается динамика разности положений верхней и нижней точек (Δx) отрыва в течение времени порядка сотен миллисекунд (на рис.4 представлена экспериментально полученная зависимость положений точек отрыва SPP в зависимости от времени, 1 – положение верхнего отрыва, 2 – положение нижнего отрыва, 3 – разница в положениях отрыва сверху и снизу). Среднеквадратичное отклонение этой величины пропорционально амплитуде боковой силы. Величина боковой силы F_{SL} расчитывается по формуле (1):

$$F_{SL} = \pi < \Delta x > D\left(p_p - p_{st}\right) \qquad (1)$$

где <Δx> – средняя величина Δx, p_{st} – статическое давление струи внутри сопла, где отрыв не происходит, D – диаметр выходного сечения сопла. Посколько выходная часть сопла является практически цилиндрической, и параметры потока (M, p_{st}) в этой области практически остаются постоянными вдоль оси сопла, формула явлляется применимой в данном случае. Значение pst зависит от атмосферного давления p0 и находится в диапазоне 14 кПа - 15 кПа.

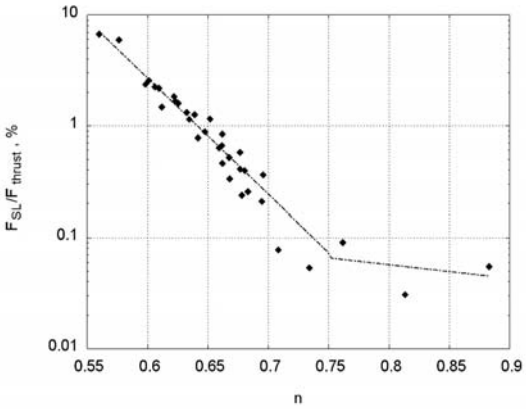

Рис.5 Результат обработки теплерограмм, полученных при различных значениях перерасширения n.

На рис.5 представлены результаты цифровой обработки шлирен-кинограмм, полученных при различных значениях перерасширения n. Из полученной зависимости можно заключить, что несимметричный отрыв в сопле начинается при достижении величины перерасширения n=0.70-0.75. Удобно сравнить величину боковых нагрузок F_{SL} с величиной тяги сопла F_{thrust}. Величина тяги может быть расчитана в предположении об изоэнтропичности потока по формуле:

$$F_{thrust} = \frac{dp}{dt} = v\frac{dm}{dt} \qquad (2)$$

где v=520 м/с (M=2), dm/dt=1.3 кг/с, и эти параметры зависят лишь от M, p_0 и величины площади критического сечения сопла S_{cr}. Расчетная величина скорости v оказалась в хорошем соответствии с результатами измерений методом PIV, полученными при расчетном режиме истечения.

Для установления режима истечения с отрывом (FSS или RSS) с помощью метода PIV было проведено измерение двумерного распределения скорости в сверхзвуковой струе. Для этого лазерный нож направлялся в рабочую камеру установки таким образом, чтобы его плоскость содержала ось сопла. Измерения проводились одновременно с регистрацией давлений на стенке сопла вблизи выходного сечения и в рабочей камере для того, чтобы его плоскость содержала ось сопла. PIV-измерения, полученные при значениях перерасширения n в диапазоне 0.55-0.90, показали, что в этом диапазоне n реализуется режим истечения со свободным отрывом (FSS). На рис.6 представлен пример PIV-измерения при значении n=0.65, совмещенного с изображением рассеянного на частицах лазерного излучения.

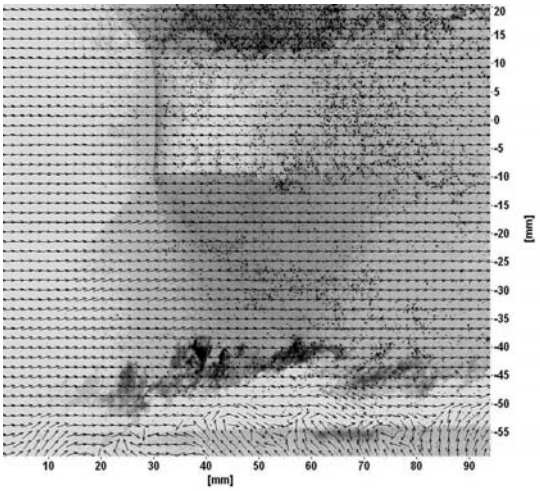

Рис.6 Пример измерения двумерного распределения скорости потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Выполнен обзор современного состояния исследований отрыва в соплах, критериях отрыва и методах его предотвращения.
- Разработана экспериментальная методика определения динамики изменения положения точки отрыва потока от стенки сопла при различных значениях перерасширения.
- Получено критическое значение перерасширения, при котором боковые нагрузки на стенки сопла существенно возрастают
- Методом PIV определен режим течения с отрывом – свободный отрыв
- Получена зависимость величины боковых нагрузок от степени перерасширения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное моделирование отрывных течений в соплах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. Т.9, 2010. СС. 1-8.
2. Frey M., Hagemann G. Status of flow separation prediction in rocket nozzles. AIAA Paper 98-3619, 1998.
3. Frey M., Hagemann G. Flow separation and side loads in rocket nozzles. AIAA Paper 99-2815, 1999.
4. Hagemann G., Frey M., Koschel W. Appearance of restricted scock separation in rocket nozzles // J. Propulsion and power, 18, 3, 2002, 577-584.
5. Frey, M. et al. European cooperation on flow separation control // proc. of 4th International Conference on Launcher Technology ”Space Launcher Liquid Propulsion”, 2002, pp. 1-10.
6. Васильев Л.А., Теневые методы, М.:Наука, 1968.