

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ

О.С. Ванькова, Ю.В. Захарова, М.А. Гольдфельд, Н.Н. Федорова

*Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН
630090, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Россия*

Интерес к исследованию воспламенения водорода в высокоскоростных потоках связан с развитием гиперзвуковых летательных аппаратов и их основного элемента – гиперзвукового воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД). Определяющую роль в решении этой задачи играют экспериментальные методы, вместе с этим комплексное использование численного моделирования и экспериментальных методов позволяет существенно расширить возможности исследования сложных сверхзвуковых течений в канале с массоподводом и химическими реакциями.

В работе представлены результаты численного моделирования сверхзвукового течения в канале камеры сгорания с учетом нестационарных граничных условий. Расчеты выполнены для условий импульсной аэродинамической установки ИТ-302М [1], особенностью которой являются падающие в ходе эксперимента параметры (давление и температура). Основной целью данных исследований являлась оценка влияния нестационарных условий, заданных на входе в расчетную область, на структуру и параметры течения в рассматриваемом канале.

Численное моделирование было проведено с помощью коммерческого пакета ANSYS CFD Fluent [2] на основе решения полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных $k-\omega$ SST моделью турбулентности.

Расчетная область задачи, схема которой представлена на рис. 1, включала профилированное сопло, изолятор и канал камеры сгорания, состоящий из секции постоянного сечения и расширяющейся секции. На верхней и нижней стенках секции постоянного сечения был расположен обратный уступ. Расчеты выполнены в плоской двумерной постановке с учетом симметрии канала.

Входное сечение расчетной области совпадало с критическим сечением сопла. На входе в канал задавались полное, статическое давление и температура. На стенках канала ставились условия прилипания для скорости и условия постоянной температуры ($T_w = 300$ К), что соответствовало экспериментальным условиям. Выходное сечение расчетной области находилось в сверхзвуковой области течения. В расчетах использовалась структурированная сетка с четырехугольными ячейками, сгущающаяся к стенкам канала.

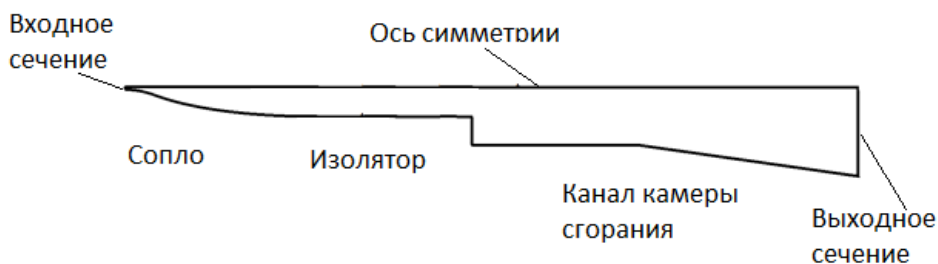


Рис.1. Геометрия расчетной области

Нестационарные условия на входе в расчетную область моделировались с помощью пользовательской функции (UDF), описывающей поведение экспериментальных распределений полного, статического давления (рис. 2) и полной температуры.

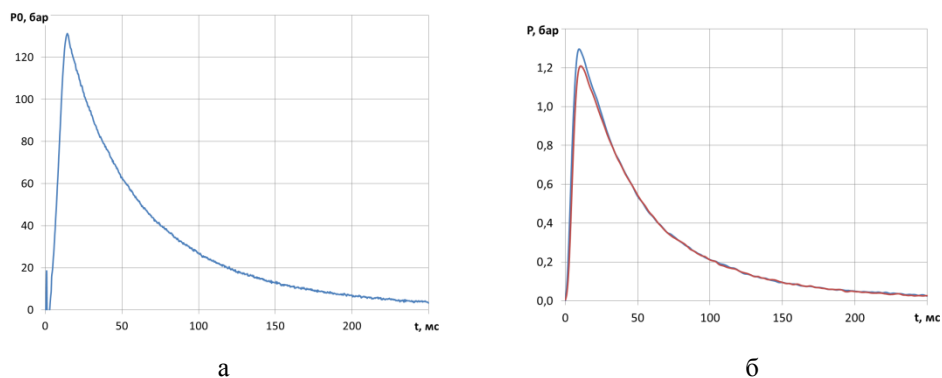


Рис.2. Экспериментальные данные: давление торможения в форкамере (а), статическое давление на стенках канала перед уступом (б).

В результате расчетов было получено, что среднее число Маха в ядре потока на выходе из сопла составляет $M = 3.84 \pm 0.05$. На стенках канала развивается пограничный слой, толщина которого в сечении перед уступом достигает 7 мм. Из-за сужения эффективного сечения канала, связанного с ростом толщины пограничного слоя, в канале наблюдается последовательность слабых волн сжатия. За уступом реализуется типичная волновая картина, включающая веер волн разрежения на кромке, отрывную зону за уступом с замыкающим скачком уплотнения. Отражаясь от стенок и оси симметрии, волны сжатия и разрежения распространяются вниз по каналу, формируя характерное пилообразное распределение статического давления и тепловых потоков на стенках.

Полученные численные результаты позволили детально проанализировать волновую картину течения в рассматриваемом канале и оценить влияние нестационарности входных условий. Результаты расчетов сопоставлены с данными экспериментальных измерений статического давления в датчиках, расположенных в плоскости симметрии канала, получено удовлетворительное совпадение. Дальнейшая работа связана с реализацией трехмерных расчетов с учетом массоподвода и химических реакций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузырёв Л.Н., Ярославцев М.И. Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.-1990. Вып. 5. – С. 135-140.
2. www.ansys.com