

## 0.1 Разработка метода ленточных адаптивных сеток для численного моделирования газовых потоков в сверхзвуковых воздухозаборниках

УДК 53.084.823

### Разработка метода ленточных адаптивных сеток для численного моделирования газовых потоков в сверхзвуковых воздухозаборниках

**А.А. Захаров** (e-mail: anzakhar@mail.ru)

Ассистент, кафедра «Вычислительная математика и математическая физика».

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика», кафедра ФН-11, Ю.И. Димитриенко

*Предложен численный алгоритм решения многомерных нестационарных задач газовой динамики в криволинейных областях, использующий адаптивные сетки с ленточной структурой. Выполнена проверка работы алгоритма на тестовых задачах. Проведено численное моделирование течения идеального совершенного газа в канале сверхзвукового воздухозаборника(ВЗ). Показано, что при некоторых режимах работы ВЗ характер течения становится существенно нестационарным. Показано влияние пилонов в канале ВЗ на картину течения.*

Преобразование сверхзвукового потока в дозвуковой является одной из важнейших и актуальнейших задач сверхзвуковой газовой динамики. В частности, данная задача возникает при проектировании входных частей ВЗ сверхзвуковых летательных аппаратов.

ВЗ обеспечивают сжатие проходящего через них воздуха, преобразуя кинетическую энергию набегающего потока в статическое давление. Для этого их специальным образом профилируют, создавая для сверхзвуковых ВЗ канал с изменяющимися регулируемым сечениями и системой организации скачков уплотнения.

Традиционно профилирование осуществляется при помощи экспериментальных методов. Однако достаточная сложность и высокая стоимость таких методов не позволяют провести тестирование большого числа новых моделей. Кроме того, экспериментальные данные не всегда позволяют выявить полную и точную картину течения всех физических параметров в будущем изделии.

Математическое моделирование, несмотря на неточность любых математических моделей и численных методов расчёта, может дать важную информацию о физических параметрах потока.

Течения газа в каналах ВЗ являются многомерными и нестационарными, а при некоторых режимах работы ВЗ и неустойчивыми. Эти факторы требуют разработки специальных эффективных алгоритмов численного моделирования таких течений.

В данной работе предлагается численный алгоритм решения многомерных нестационарных задач газовой динамики, основанный на адаптивных регулярных сетках с ленточной структурой. Он позволяет эффективно решать задачи аэродинамики ЛА для геометрически сложных многомерных криволинейных областей [1].

Разработка алгоритма включает в себя следующие основные этапы: 1) построение области решения задачи с помощью криволинейных блоков-примитивов; 2) генерация адаптивной разностной сетки с ленточной структурой; 3) модификация конечно-разностных методов для адаптивных сеток и численное решение задачи. С помощью предложенного алгоритма моделируются двумерные и трехмерные течения идеального совершенного газа в сверхзвуковых ВЗ.

Рассмотрим вкратце постановку задачи и суть основных этапов численного алгоритма.

Набегающий сверхзвуковой поток, проходя по каналу ВЗ, затормаживается, при этом его плотность, температура и статическое давление повышаются. Требуется определить данные параметры течения на входе и внутри канала ВЗ.

Математическая постановка задачи представляет собой систему уравнений Эйлера, записанную в ортогональной криволинейной (физической) системе координат, в качестве которой выбирается цилиндрическая система координат. На границе области, представляющей собой твердую непроницаемую стенку, к системе присоединяется граничное условие непротекания; на границе входа потока задаются значения всех параметров набегающего потока; на границе сверхзвукового выхода не задаются никаких граничных условий, а на границе дозвукового выхода задается значение одного из параметров; на границе симметрии задаются условия нулевых градиентов параметров в направлении границы. Также к системе добавляются начальные условия.

На первом этапе алгоритма вводится геометрия расчетной области. Предполагается, что расчетная область допускает разбиение на криволинейные блоки, гомеоморфные квадрату или кубу. При этом гомеоморфизм позволяет перейти от исходных физических координат к некоторым произвольным криволинейным координатам, которые будем называть адаптивными. В основу метода «компьютерного построения» криволинейной области положен «обратный способ», когда область изначально задается в адаптивных координатах в виде совокупности прямолинейных блоков, а затем данные блоки деформируются в расчетную область в физических координатах. Деформирование блоков осуществляется на основе перемещения опорных точек на

их границах. При этом криволинейные границы блоков интерполируются кубическими сплайнами. С каждым блоком можно связать тип начального условия в области, охватываемой блоком, и типы граничных условий на его границах.

На втором этапе осуществляется генерация регулярной адаптивной сетки. В адаптивной системе координат сетка для области вводится тривиальным образом. При этом объединение локальных сеток блоков осуществляется при помощи технологии ленточных адаптивных сеток (ЛАС) [2–3]. Суть ее заключается во введении одного индекса для нумерации всех узлов сетки и введении формата сетки в виде списка, в котором для каждого узла хранится его уникальный номер, координаты в адаптивной и физической системах координат, номера соседних узлов, данные о типе начального и граничного условия в узле, прочие геометрические параметры. Предложенная технология подобна технологии глобальной нумерации узлов в методе конечных элементов. Построение гомеоморфизма для нахождения физических координат узлов сетки производится алгебраическими методами с помощью лагранжевых граничных интерполяций [4].

На третьем этапе производится численное решение системы уравнений. Для использования конечно-разностных методов на построенной ЛАС требуется произвести определённые модификации системы уравнений, а также выбранной конечно-разностной схемы и численной аппроксимации граничных условий. Эти модификации заключаются в записи исходной системы уравнений, граничных и начальных условий в адаптивной системе координат; использовании новой одноиндексной нумерации узлов при записи разностных аппроксимаций производных в конечно-разностной схеме и при численной аппроксимации граничных условий. В данной работе был выбран конечно-разностный метод Мак-Кормака, состоявший из шагов предиктор, корректор, шагов учета правой части и искусственной вязкости. Аппроксимация граничных условий производилась с помощью метода «фиктивных ячеек».

#### Литература:

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. Годунова С.К. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
2. Дмитриенко Ю.И., Захаров А.А. Разработка метода ленточных адаптивных сеток для решения трехмерных задач течения газов в воздухозаборниках // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Сер. Естественные науки. – 2006. – №3. – С. 44-56.
3. Дмитриенко Ю.И., Захаров А.А. Метод ленточных адаптивных сеток в газовой динамике. – М.: Изд-во НТЦ Университетский, 2008. – 175 с.

4. Лисейкин В.Д. Метод алгебраической адаптации // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т.3. – №10. – С. 1692-1709.