

УДК 629.33+621.8.033

КРАМСКОЙ А.В., к.т.н., с.н.с., ХНАДУ

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Розглянуто основні залежності та принципи побудови програмного комплексу для моделювання тривимірних просторових течій у проточних порожнинах пневмоапаратів транспортних засобів. Запропоновані основні принципи розподілення обчислень та особливості їх реалізації. Показано, що моделювання з обмежувачами дозволяє більш точно описувати характеристики потоку.

Введение. При разработке перспективных конструкций пневмоаппаратов и модификации существующих ведущие фирмы Азии, Европы и США выполняют численное моделирование переходных процессов в расчётных полостях. Специально для таких целей разработаны некоторые программные комплексы, например, ANSYS, STAR-CD, Nastran, Cosmos, позволяющие выполнять анализ изделий на прочность, термонагруженность; решение контактных задач, анализ аэродинамической формы и прочее.

Анализ последних достижений и публикаций. В настоящее время имеется тенденция по разработке программного обеспечения для расчёта пространственных вязких нестационарных течений газа с учётом теплообмена на параллельных системах. Одним из недостатков современных программных комплексов для расчёта пространственных течений является то, что они в большей части разработаны для блочно неструктурированных сеток, что значительно увеличивает время для создания самой сетки. Возможность выполнения расчётов на полностью неструктурированных сетках позволяет в значительной степени автоматизировать процесс расчёта [1,2].

Цель и постановка задачи. Целью работы является разработка программного комплекса, позволяющего моделировать переходные процессы в полостях пневмоаппаратов; определение основных закономерностей и особенностей расчёта на параллельных и распределённых системах.

Задачами исследования являются:

- определение основных зависимостей и структуры программного комплекса;
- рассмотрение особенностей распределения вычислений между множеством расчётных процессов;
- выполнение расчёта сверхзвукового течения с первым порядком аппроксимации и MUSCL-реконструкцией параметров в ячейке.

Основные зависимости динамики движения сжатого воздуха и особенности распределения вычислений. Временную дискретизацию уравнений газовой динамики можно представить в следующем виде [1,3]

$$Q_{i,j,k}^0 = Q_{i,j,k}^n,$$

$$Q_{i,j,k}^m = Q_{i,j,k}^n + \alpha_m \Delta \tau \left[R(Q_{i,j,k}^m) - \frac{(1+\theta)(Q_{i,j,k}^m - Q_{i,j,k}^n) - \theta(Q_{i,j,k}^n - Q_{i,j,k}^{n-1})}{\Delta t} \right], \quad (1)$$

$$Q_{i,j,k}^0 = Q_{i,j,k}^m,$$

где m - индекс, определяющий текущий шаг многошаговой схемы Рунге-Кутта, $m = \overline{1, N}$; N - количество шагов по многошаговой схеме. В процессе исследований количество шагов ограничивалось $N_{\max} = 5$; $R(Q_{i,j,k}^m)$ - вектор невязки; Δt - физический шаг по времени, с; $\Delta \tau$ - псевдошаг по времени, с; α_m - коэффициенты схемы Рунге-Кутта.

Определение конвективных потоков на гранях, выполняется по разностной схеме, сформулированной в "примитивных" переменных, являющейся модификацией линеаризованного решения задачи Римана [4].

Для получения безосцилляционных решений применяется метод обеспечивающий невозрастание полной вариации решения по времени (TVD-метод), что в свою очередь способствует уменьшению численной диффузии при решении вязких турбулентных задач [5].

В общем случае, функция $\phi(r)$, учитывающая применение антидиффузионного члена, для TVD-подхода в формулировке Колгана [5] записывается в следующем виде

$$\phi(r) = \max[0, \min(1, r)], \quad (2)$$

где $r = \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Phi_{i+1} - \Phi_i}$ - параметр ограничителя;

Φ_i - сеточные переменные, определяемые в центре ячейки i .

Общий вид применяемых TVD ограничителей приведен в таблице 1.

Программный комплекс структурно состоит из следующих компонентов: модуль импорта твердотельной модели и генерации сетки; модуль определения теплофизических свойств газа; модуль решения задачи течения газа в расчётной полости.

Способ реализации расчётных методов для решения задач газовой динамики в виде программного кода является важным для использования программного комплекса, как в учебном процессе, так и в научной работе. В данном случае в качестве языка программирования применялся C++. В качестве компилятора для генерации исполнительного кода применялся gcc v.3.4.2. Интерфейс программного комплекса для Windows был реализован с использованием функций Win32API.

Для распределения вычислений применяется схема с распределением вычислений между процессами, что в общем случае позволяет адресовать каждому из них большее количество оперативной памяти, в отличие от схемы с параллельными потоками (рис. 1).

Таблица 1 – Ограничители разностных схем

Название ограничителя	$\phi(r)$	$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi(r)$
VANALB	$\frac{r^2 + r}{r^2 + 1}$	1
TVD (симметричная формулировка)	$\max[0, \min(1, r)]$	1
OSHER	$\max[0, \min(r, \beta)]$, где $1 \leq \beta \leq 2$	β
SWEBY	$\max[0, \min(\beta r, 1), (r, \beta)]$	β
OSPRE	$\frac{1,5(r^2 + r)}{(r^2 + r + 1)}$	1.5
VANLH	$\frac{r + r }{1 + r}$	2
MUSCL	$\max[0, \min(2r, 0.5(1 + r), 2)]$	2
SMART	$\max[0, \min(2r, (0.25 + 0.75r), 4)]$	2
UMIST	$\max[0, \min(2r, (0.25 + 0.75r), (0.75 + 0.25r), 2)]$	2
SUPERBEE	$\max[0, \min(2r, 1), \min(r, 2)]$	2
KOREN	$\max[0, \min(2r, (1 + 2r)/3, 2)]$	2
HCUS	$\frac{1,5(r + r)}{(r + 2)}$	3
CHARM	$\frac{r(3r + 1)}{(r + 2)^2}$	3
HQUICK	$\frac{2(r + r)}{(r + 3)}$	4

Основной задачей при распределении вычислений является декомпозиция расчётной области на отдельные процессы. В этом случае сеточная модель представляется в виде взвешенного графа $G^0 = (V, E)$, $V = \{v_i\}$, $|V| = n$, вершины v_i и рёбра e_{ij} которого имеют веса $w(v_i)$ и $w(v_i, v_j)$ соответственно, причём $w(v_i, v_j) = 0$. Для разбиения графа применяется методы огрубления исходного графа и бисекции [6]. При этом топологией распределённой расчётной модели является структура типа звезды (с расчётным сервером и хостами). Программная реализация параллельной и распределённой версий решателей выполнена с использованием технологии рассылки сообщений MPI [7].

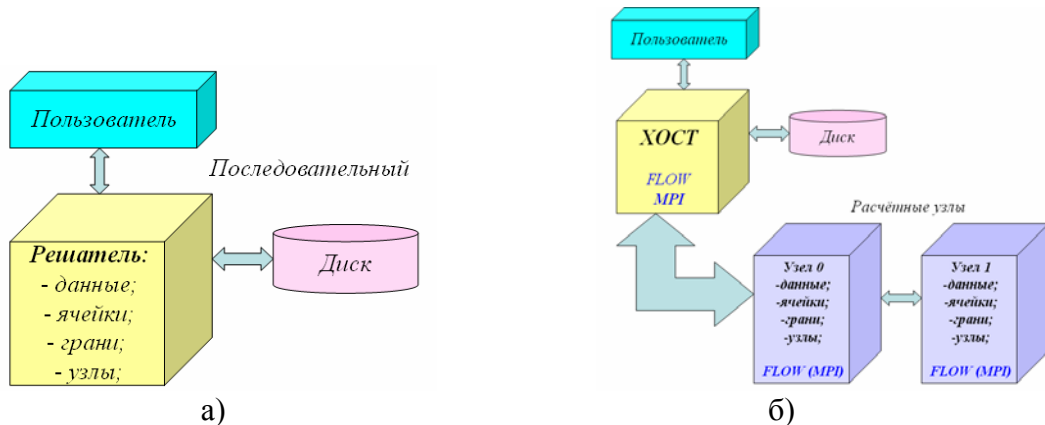


Рисунок 1 – Структурные схемы решателей: а) – структура последовательного солвера; б) – структура параллельного и распределённого солверов

Результаты моделирования. Пневматические системы транспортных средств работают при большом перепаде давлений (до 0,85 МПа) и имеют сложную форму, состоящую из множества закруглений, сужений, расширений и пр. Поэтому в качестве примера выполнено моделирование течения воздуха около клина (как одного из элементов проточной полости пневмоаппарата). Полное относительное давление на входе составляет 0,6 МПа; статическая температура 300 К; на выходе статическое относительное давление 0 Па. Сеточная модель представляет собой симметричную часть обтекаемой области и состоит из 52374 гексаэдров и 4 граничных слоёв.

Для сравнения выполнены расчёты с первым порядком аппроксимации и MUSCL-реконструкцией параметров в ячейке (рис. 2).

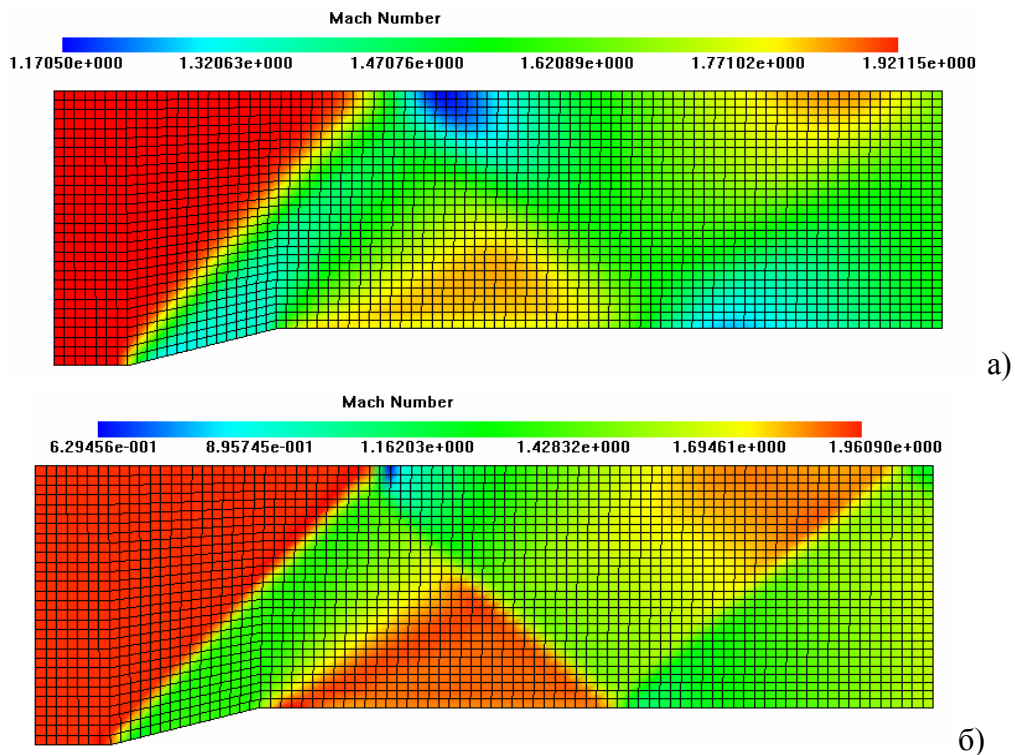


Рисунок 2 – Результаты расчёта сверхзвукового обтекания клина: а) первый порядок аппроксимации; б) третий порядок (MUSCL реконструкция)

По результатам моделирования можно сделать вывод, что разностная схема третьего порядка аппроксимации позволяет с большей точностью получать результаты, чем схема первого порядка, что связано с уменьшением "размазывания" контактных разрывов.

Выводы

Представленные зависимости и основные особенности программного комплекса позволяют автоматизировать процесс прогнозирования характеристик пневматических аппаратов. С целью повышения точности вычислений необходимо применять разностные схемы с повышенными порядками аппроксимации как по времени, так по пространству. При этом при распараллеливании процесса расчёта целесообразно использовать свободно распространяемое программное обеспечение (например, MPI), а топологическую вычислительную конструкцию определить по схеме звезды.

Список литературы: 1. <http://www.flowvision.ru>. 2. *Клименко В.И., Крамской А.В., Чебан А.А.* Моделирование переходных процессов в пневмоаппаратах транспортных средств // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2008. – №7(125), Частина 2. – С.53-57. 3. *Крамской А.В., Лесь А.Н.* Особенности реализации методов с распределёнными параметрами для моделирования переходных процессов пневматического тормозного привода автомобиля // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 2007. – Вип. 60. – С.184-191. 4. *Крамський О.В., Богомолов С.В.* Комп'ютерна програма „Програма моделювання нестационарних тривимірних течій стислого газу”. №24233 від 22.04.2008 р. Держ. департамент інтелектуальної власності. 5. *Ильин С.А., Тимофеев Е.В.* Сравнение квазимонотонных разностных схем сквозного счёта на задаче Коши для одномерного линейного уравнения переноса // Математическое моделирование, 1992. – т.4. - №3. – С.62-75. 6. *Attiya H., Welch J.* Distributed computing. 2nd edition. Canada. – 2004. 416 p. 7. <http://www.mpiforum.org>.