

**Реализация современных схем повышенного порядка точности типа TVD для сквозного счета гиперзвуковых течений на нерегулярных сетках**

А.Л. Железнякова

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Создание и совершенствование вычислительных методов аэротермодинамики гиперзвуковых течений является важнейшим направлением развития авиационной и ракетно-космической промышленности. Моделирование гиперзвукового обтекания, при котором реализуется сложная картина ударно-волнового взаимодействия – нетривиальная математическая задача, требующая расчета разрывных решений. В настоящее время наиболее популярными методами решения подобных задач являются TVD (Total Variation Diminishing) схемы. С целью повышения точности создаваемых в ИПМех РАН трехмерных компьютерных моделей аэротермодинамики интегральных компоновок перспективных летательных аппаратов произвольной геометрии [1] рассматриваются современные численные схемы приближенного решения задачи о распаде разрыва (методы расщепления вектора потока и методы типа Годунова [2]) в рамках TVD концепции. Сквозной счет ведется без предварительного выделения поверхностей разрывов с помощью модифицированного метода расщепления по физическим процессам. В работе исследуется эффективность двух противопоточных TVD схем: TVD версии метода взвешенного усредненного потока TVD-WAF (Weighted Average Flux) и MUSCL метода (Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws). При этом применяются различные функции-ограничители потоков и наклонов, такие как SUPERBEE, MINBEE (MINMOD), ограничители ван-Лиры и ван-Альбады [3]. Рассмотренные подходы используют решение задачи распада разрыва, могут эффективно применяться с любым приближенным римановским решателем [2], обеспечивают повышенный порядок точности (второй и выше), не порождают нефизические осцилляции решения вблизи газодинамических разрывов и зон больших градиентов параметров. Рассмотренные численные методы адаптированы к использованию на нерегулярных сетках. Интегрирование полной системы трехмерных нестационарных уравнений газовой динамики проводится на основе расчета распада произвольного разрыва на грани ячейки в направлении ее внешней нормали.

Реализованные численные TVD-схемы повышенного порядка аппроксимации апробированы на ряде тестовых задач (рис. 1). На рисунке представлены некоторые результаты применения TVD-WAF и MUSCL методов совместно с приближенным римановским решателем Хартена–Лакса–ван-Лиры HLLC [2] и функциями-ограничителями

MINMOD и SUPERBEE. Для рассмотренных вариантов проведено сравнение с точным решением задачи Римана, полученным с использованием классической схемы Годунова, а также результатами расчета традиционным HLLC методом [2].

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ № МК-5324.2014.1 для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук.

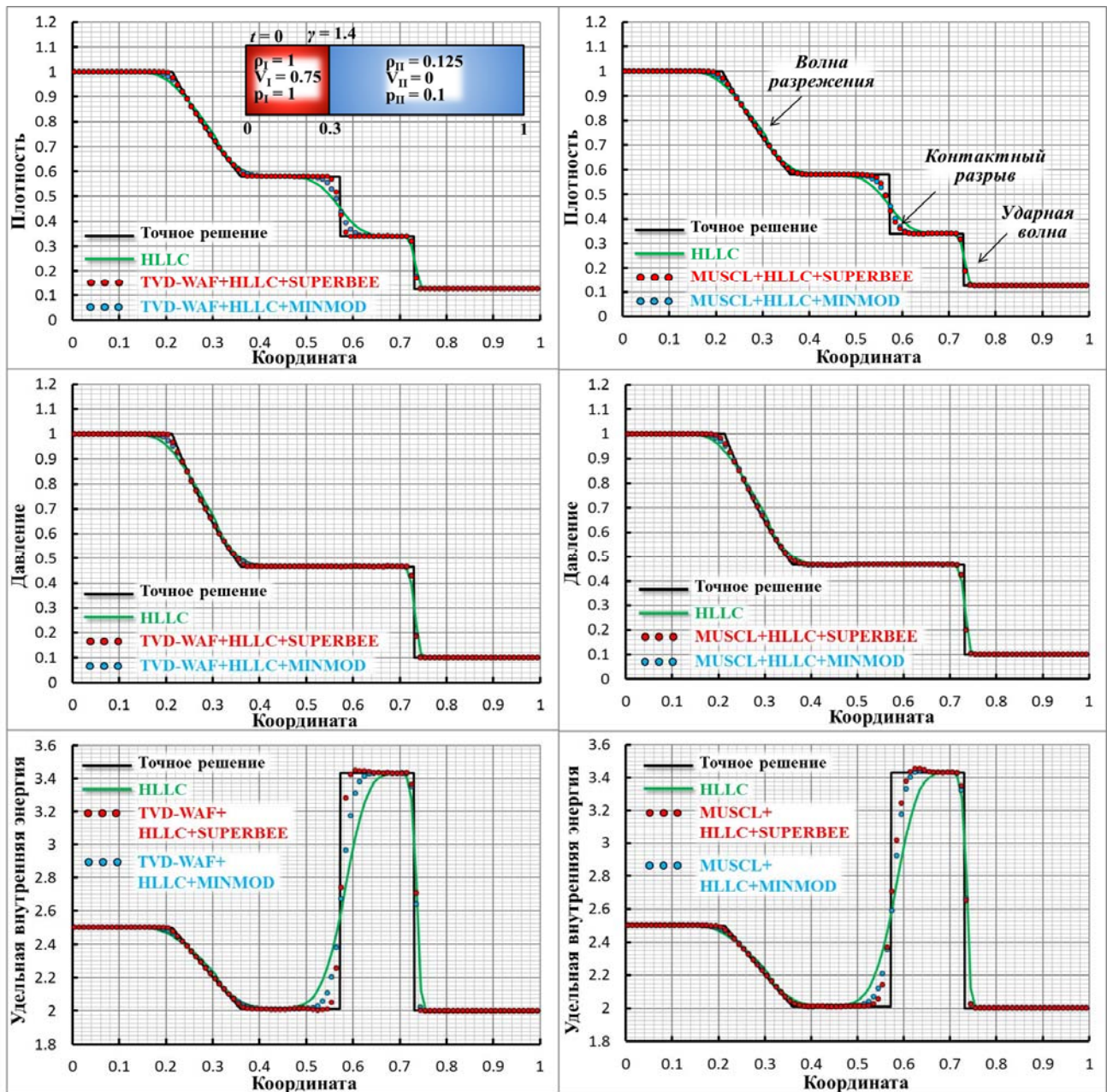


Рис. 1. Результаты тестирования реализованных численных схем на решении одномерной задачи Сода. Графики плотности, давления и удельной внутренней энергии для числа расчетных ячеек  $N = 100$  в момент времени  $t = 0.2$

## Литература

1. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. На пути к созданию модели виртуального ГЛА. I. – М.: ИПМех РАН, 2013. – 160 с.
2. Железнякова А.Л. Анализ эффективности современных численных схем решения задачи о распаде произвольного разрыва в рамках метода расщепления по физическим процессам для расчета гиперзвуковых течений. – Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2014. – Том 15. – Вып.5. – 24 с.
3. Toro E.F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction. — Springer; 3rd edition, April 2009. – 724 p.