

## Суперкомпьютерное моделирование процессов горения зарядов и движения продуктов сгорания в рабочих трактах РДТТ\*

Ю.И. Димитриенко, А.А. Захаров, М.Н. Коряков, А.С. Строганов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ) широко используются в технике ведущих стран мира в качестве маршевых двигателей, стартовых ускорителей и разгонных блоков, а также двигателей вспомогательного назначения (системы управления, разделения, торможения). Основная тенденция развития численного моделирования в приложении к задачам внутрикамерной газодинамики РДТТ состоит в комплексном подходе, учитывающем взаимосвязь и взаимовлияние различных процессов, сопровождающих работу двигателя. В задачах выхода двигателя на режим, где существенными являются процессы подключения поверхности и распространения пламени по заряду, требуется использовать детализированные модели горения, требующие сопряжения газодинамической части задачи с задачей прогрева, воспламенения и горения топлива. Динамические режимы работы РДТТ изучены сравнительно мало, что объясняется сложностью горения твердого топлива, течения продуктов сгорания и волновых процессов в объеме камеры сгорания. Лабораторные или стендовые испытания не в состоянии дать информацию по всему полю течения. Таким образом, проблема разработки методов численного моделирования нестационарных внутрикамерных процессов горения твердых топлив и течений продуктов сгорания чрезвычайно важна для проектирования перспективных двигателей и аэрокосмических систем.

В работе планируется осуществить разработку численных методов и высокопроизводительных кодов для трёхмерного моделирования нестационарных сопряжённых процессов горения комбинированных твердотопливных зарядов и внутреннего газодинамического неравновесного потока продуктов сгорания в рабочих трактах РДТТ. За основу будет взят разработанный в научном коллективе программно-вычислительный комплекс SIGMA, который применяется для моделирования многомерных нестационарных турбулентных химически-реагирующих до-, транс-, сверх- и гиперзвуковых газовых потоков в областях сложной криволинейной почти регулярной формы с учётом внутреннего и внешнего течения [1]. Программный комплекс SIGMA включает в себя модули: трёхмерного геометрического моделирования, генератор адаптивной сетки и расчётный модуль. Имеются модули, осуществляющие расчёт течения газа как на основе методов конечных разностей, так и на основе методов конечных объёмов. Процедуры генерации сеток и расчётного модуля имеют параллельную реализацию под различные архитектуры суперкомпьютеров.

Процесс горения твёрдого топлива рассматривается в модели мгновенного протекания химических реакций на поверхности раздела топливо-газ, скорость горения топлива существенно меньше скорости протекания газодинамических процессов в канале, поэтому существуют два различных временных масштаба: масштаб установления газового потока и масштаб движения поверхности горения. Поэтому возможно ввести цикл по «медленному» времени, соответствующему процессу горения заряда. Внутри этого цикла вводится «быстрое» время. Для каждого момента медленного времени система газодинамических уравнений решается методом установления при фиксированной форме канала. Поверхность горения топлива моделируется поверхностью вдува смеси газа и частиц, параметры которых известны. По результатам расчета газодинамической задачи на каждом шаге медленного времени пересчитывается скорость горения топлива в зависимости от давления в газовом

---

\*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-3007.2015.8. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [2].

потоке.

Планируется разработать и интегрировать в программный комплекс SIGMA алгоритмы расчета изменения формы поверхности горения. Моделирование изменения формы сложной многосвязной поверхности горения планируется осуществить с помощью технологий перестраиваемых почти регулярных сеток на базе теории сплайнов и поверхностей Кунса. Нерегулярные формы поверхностей планируется представлять в виде сшивки заплат, представляющих собой куски регулярных поверхностей и специальной маркировки границ сшивки для корректной стыковки получающейся поверхностной сетки узлов.

На рис. 1 приводятся результаты суперкомпьютерного моделирования газодинамики факела ракетного двигателя и оценка эффективности её распараллеливания. Параметры спутного потока соответствовали высоте ( $H = 10$  км), скорость движения аппарата соответствовала числу Маха ( $M = 3$ ). Эффективность распараллеливания измерялась при использовании библиотеки MPI на суперкомпьютере МГУ «Чебышев». Было просчитано 5 000 временных слоев на конечно-разностной сетке с 16 млн. узлов. Эффективность, близкая к линейной, сохраняется до 256 ядер, далее она начинает снижаться.

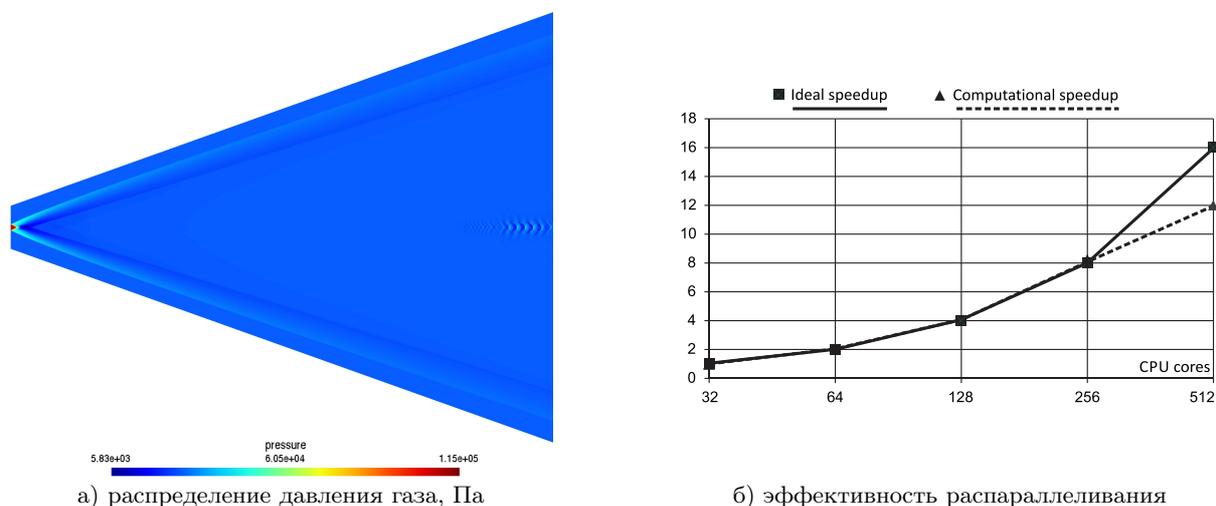


Рис. 1: Результаты суперкомпьютерного моделирования газодинамики факела ракетного двигателя и оценка эффективности её распараллеливания

Планируется проведение многовариантного суперкомпьютерного моделирования и комплексного анализа нестационарных трёхмерных процессов горения и течения продуктов сгорания в камерах сгорания РДТТ на различных стадиях: стадии заполнения камеры сгорания, стадии развития горения и стадии истечения продуктов сгорания из сопла с учётом прогнозируемого изменения геометрии камеры при выгорании заряда.

## Литература

1. Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А. Разработка программного комплекса SIGMA для суперкомпьютерного моделирования сопряжённых аэродинамических и термомеханических процессов в композитных конструкциях высокоскоростных летательных аппаратов // Труды Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России». М., 2015. С. 399–410.
2. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. / М.: Издательский дом «Открытые системы». 2012. № 7. С. 36–39.