

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА В РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Введение

В настоящей статье представлены возможности технологической цепочки численного эксперимента вида «модель → численный метод → средства программной реализации» на основе разработанной газотермодинамической модели [1].

Исследование различных конфигураций зарядов ТРТ

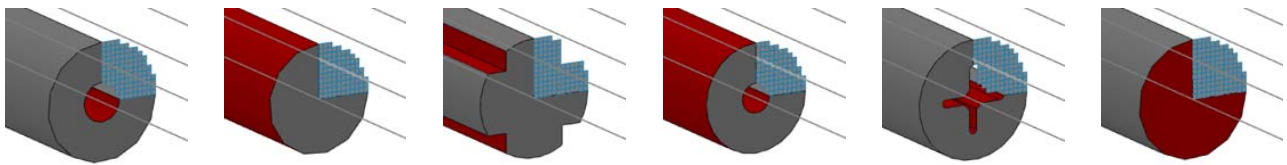
Пространственная модель [1] предоставляет широкие возможности по номенклатуре исследуемой геометрии зарядов ТРТ. С учетом свойств симметрии исследуемых твердотопливных зарядов краевая задача решалась для $\frac{1}{4}$ геометрической подобласти. Моделирование рабочего процесса для каждого из вариантов геометрии заряда ТРТ (рис. 1) проводилось на вычислительном кластере многоядерной ПЭВМ класса Pentium 4 с тактовой частотой процессора 2,2 ГГц. Для получения каждого варианта циклограммы РДТТ требуется 36-38 часов машинного времени на расчетной сетке мощностью $30 \times 30 \times 230$ ячеек с пространственным шагом 5 мм. Расчетный цикл ограничивался моментом полного выгорания заряда ТРТ.

В рамках решения задачи выбора наиболее целесообразной формы заряда ТРТ одинакового химического состава условие эквивалентности состояло в равенстве площадей горения, идентичной начальной температуре шашки и давлении срабатывания технологической заглушки (рис. 1).

Анализ результатов

На рис. 2 а и б в виде цветowych карт показаны образцы фазовых срезов физических полей, образующих рабочий процесс в РДТТ – давления, температуры, концентрации продуктов сгорания и изолиний числа Маха. Аналоговое представление результатов исследования в виде изменяющихся во времени пространственных цветowych карт задействует привычные для восприятия человека категории – 3D координаты (X_k , $k = 1...3$) и время (t).

На рис. 3-6 показаны циклограммы интегральных характеристик РДТТ, служащие основанием для принятия проектных решений на этапе формирования облика (в соответствии со спецификацией на рис. 1).



а б в г д е
Рисунок 1 – Варианты конфигураций исследуемых зарядов РДТ:

а – внутренний цилиндрический канал; б – горение по наружной цилиндрической поверхности; в – крестовидный заряд наружного горения; г – всестороннее горение по боковой поверхности; д – равнолучевая четырехконечная звезда; е – торцевое горение

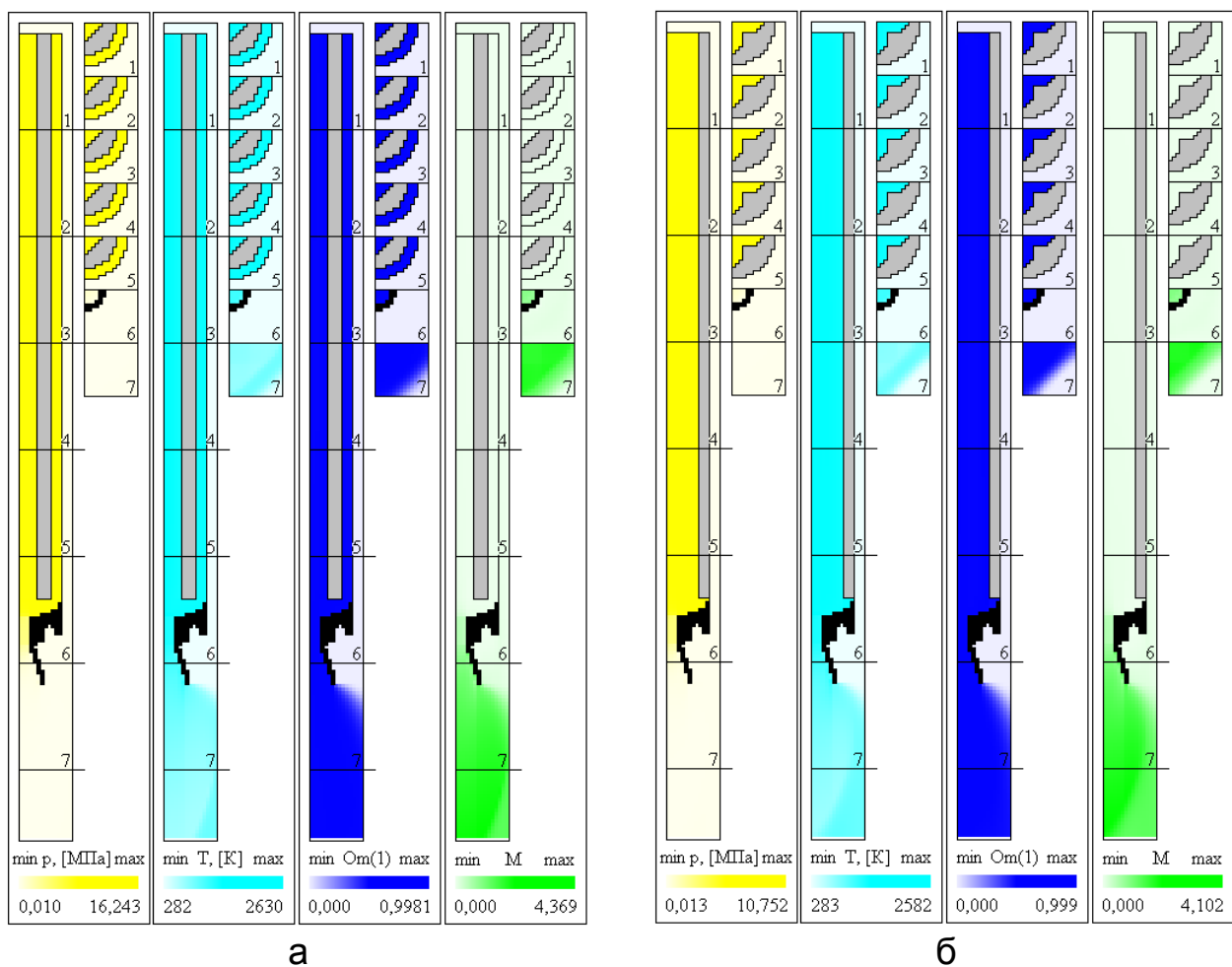


Рисунок 2 – 3D физические поля параметров РДТТ в момент времени 1,25 с на примере шашки бокового горения (а) и заряда с центральным четырехлучевым каналом (б)

Форма канала шашки незначительно сказывается на характере асимметрии струи в момент запуска двигателя. По мере установления течения происходит вырождение незначительной асимметрии струи (рис. 2 а, б). Модель демонстрирует появление ромбовидных структур в струях, идентичных результатам, полученным другими авторами [2, 3 и

др.], что говорит о способности отображения моделью струйных эффектов и возможности их отдельного исследования.

Однородный подход к расчету основных параметров рабочего процесса РДТТ [1] позволяет абстрагироваться от искусственного деления процесса изменения давления в КС на три периода [4, 5]: выхода на режим, основного участка работы и периода падения давления после сгорания заряда, что дает возможность учитывать нестационарность работы двигателя на протяжении всего времени его работы (рис. 3).

Формула для расчета силы тяги РДТТ по причине учета нестационарности только на первом и третьем режимах работы, в общепринятых методах расчета не носит универсального характера и отличается наличием локальной производной от количества движения газа внутри КС [4]. В данной модели измерение тяговых характеристик носит принципиально иной характер: мгновенное значение тяги определяется как среднеинтегральная разность между параметрами внешнего и внутреннего силового воздействия среды на работающий двигатель в осевом направлении (рис. 4).

Таким образом, лежащий в основе модели однородный подход к представлению основных режимов работы РДТТ позволяет получить значительно уточненные характеристики рабочего процесса.

Пространственная нестационарная модель позволяет выявить пиковые забросы температуры в произвольной точке КС (например, рис. 5, г). Подобный подход обеспечивает более корректный расчет характера распределения и толщины теплозащитного покрытия наиболее температуронапряженных элементов конструкции.

Континуальный характер модели дает возможность определить скорость движения частиц в интересующем сечении тракта РДТТ (например, на срезе сопла, рис. 6). Изомахи могут быть применены для более детального изучения влияния скорости обдува на различные параметры работы РДТТ: эрозионного горения, уноса аблирующего покрытия, определения коэффициентов конвективного теплообмена и т.д.

Заключение

Представленные выше примеры не исчерпывают многообразия потенциальных возможностей технологии ЧЭ, среди которых можно выделить:

- 1) учет влияния элементов конструкции РДТТ (центральное тело) и пусковой установки (газоотражательный щит);
- 2) совместное решение задач внутренней баллистики и внешнего обтекания;

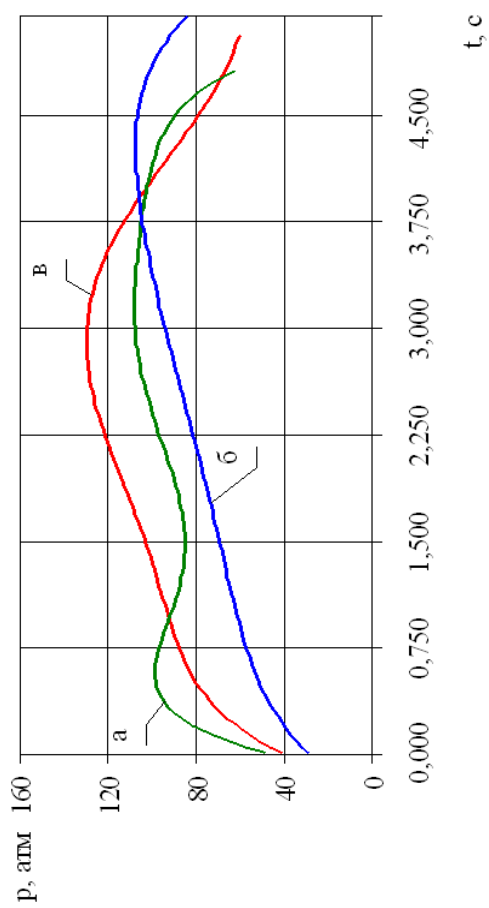
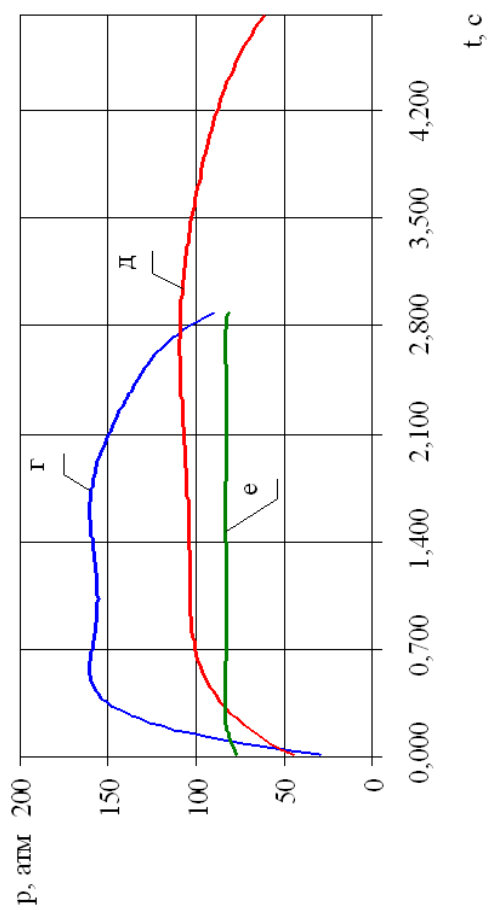


Рисунок 3 – Среднеинтегральное давление в КС РДТТ

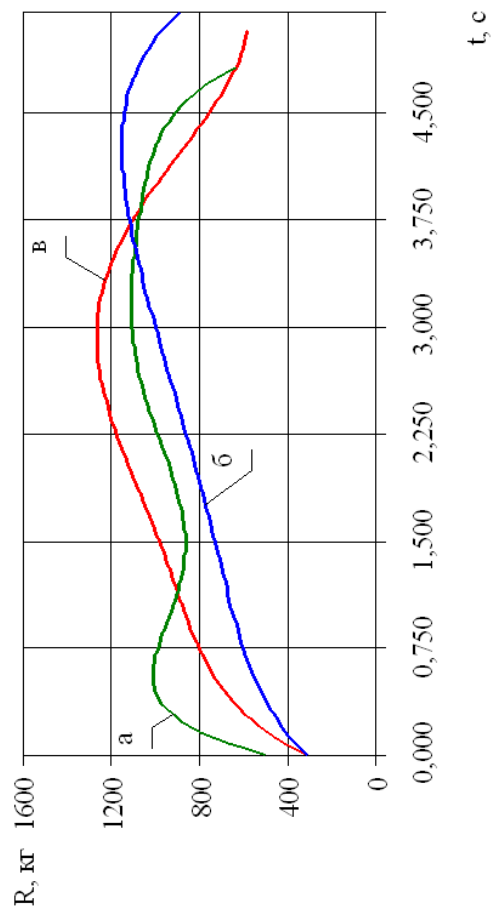
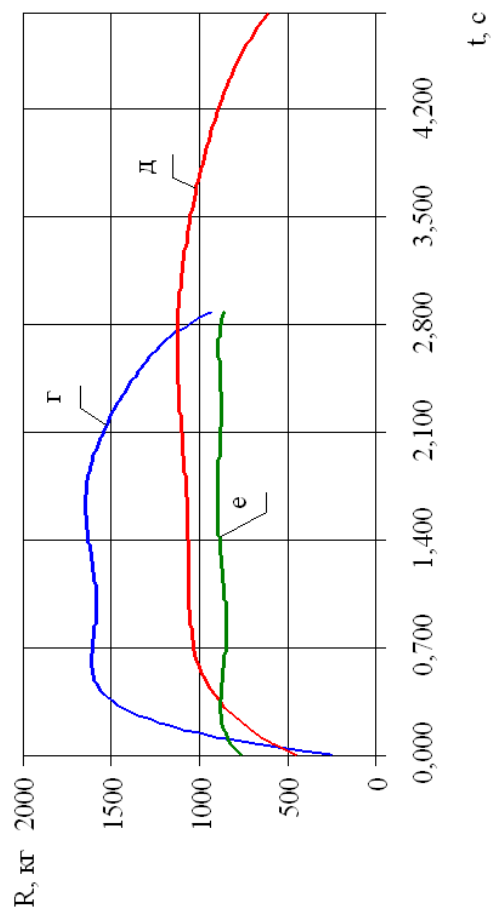


Рисунок 4 – Циклограмма тяги РДТТ

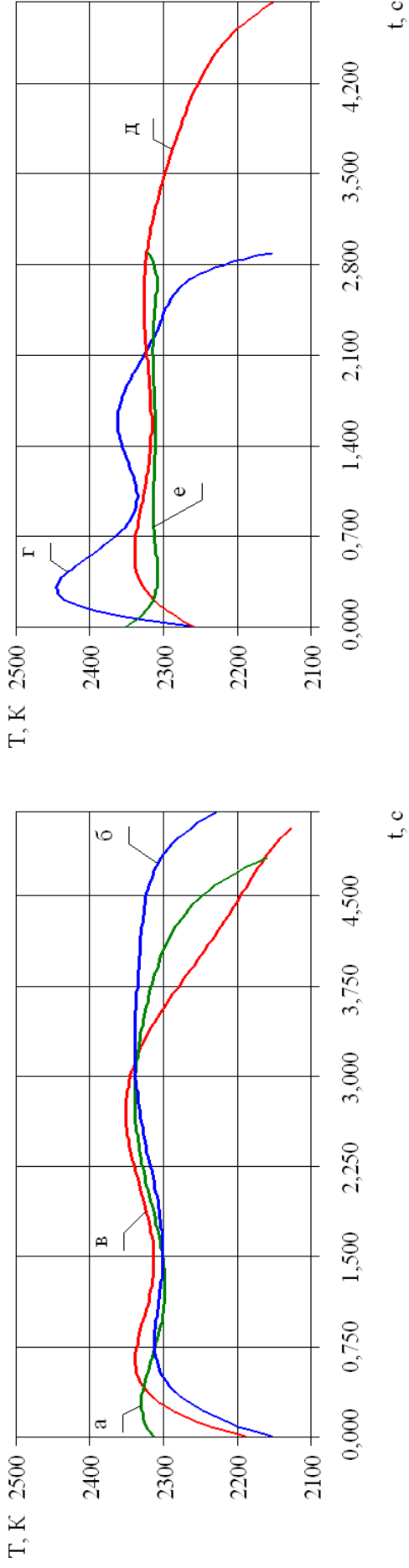


Рисунок 5 – Температура в критическом сечении сопла

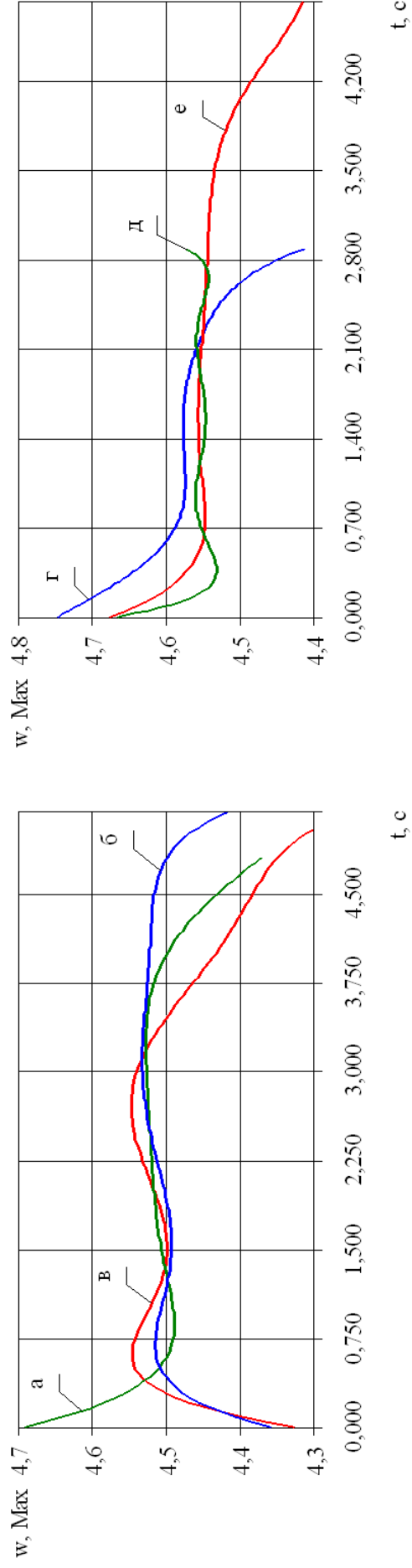


Рисунок 6 – Скорость истечения газов на срезе сопла

- 3) возможна последующая интеграция в модели систем более высокого уровня иерархии, например, летательных аппаратов с добавлением соответствующих уравнений динамики;
- 4) отдельные исследования структуры реактивной струи;
- 5) проведение опережающего численного эксперимента в интересах разработки испытательных стендов РДТТ;
- 6) определение параметров нестационарного течения в любой произвольной точке КС и по полученным значениям расчет течения в пограничном слое, что позволяет отслеживать выгорание шашки в масштабах отдельно взятой ячейки и предотвращать явления неравномерного горения, которые могут привести к пиковым забросам давления;
- 7) исследование процессов регулирования вектора тяги РДТТ.

Список использованных источников

1. Амброжевич М.В. Газотермодинамическая модель ракетного двигателя твердого топлива / М.В. Амброжевич, В.А. Середа // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Х., 2011. – № 1 (65). – С. 88-96.
2. Акимов Г.А. Численное исследование сверхзвуковых струй сложной пространственной конфигурации / Г.А. Акимов, Д.О. Вавилов, А.В. Клочкин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rbase.new-factoria.ru>.
3. Полные траекторные модели двухступенчатых ракет / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, А.С. Карташев, В.А. Середа // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 3 (60). – С. 28–32.
4. Орлов Б.В. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе / Б.В. Орлов, Г.Ю. Мазинг. – М.: Машиностроение, 1964. – 406 с.
5. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование ракетных двигателей твердого топлива: учебник для втузов / Б.Т. Ерохин. – М.: Машиностроение, – 1991. – 560 с.

Поступила в редакцию 04.04.2011 г.

*Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*