

## Моделирование рабочих процессов в РДТТ<sup>1</sup>

В работе, на примере решения тестовых задач, рассматриваются возможности моделирования рабочего процесса в ракетном двигателе на твердом топливе (РДТТ) с использованием CFD-программы и программы LS-DYNA

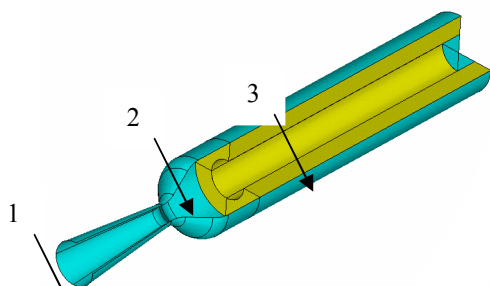


Рис. 1. Геометрическая модель РДТТ:  
1 – сопло; 2 – камера; 3 – заряд ТТ

Целью работы являлась оценка возможности моделирования рабочего процесса в РДТТ с использованием встроенных в указанные программы средств. Возможности пользовательского программирования не рассматривались.

Внимание было сосредоточено на описании:

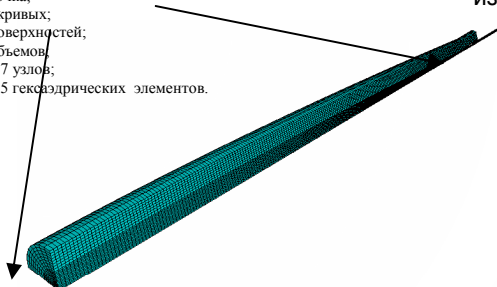
- трансзвукового течения нагретого газа через сопло;
- течения реагирующего газа в камере, сопле и «воздушном» пространстве;
- течения реагирующего газа в камере, сопле и «воздушном» пространстве с присутствием твердой дисперсной или жидкой дисперсной реагирующей фазы (капель).

Схема рассматриваемого РДТТ представлена на рис. 1. Задача решалась в упрощенной постановке:

- расчетная область ограничивалась соплом, соплом и объемом камеры, которая в данный момент времени не занята ТТ, или дополнительно рассматривалась и достаточно протяженная область «воздушного» пространства;
- считалось, что граничные условия на поверхности горения известны.

Характеристика КЭМ:

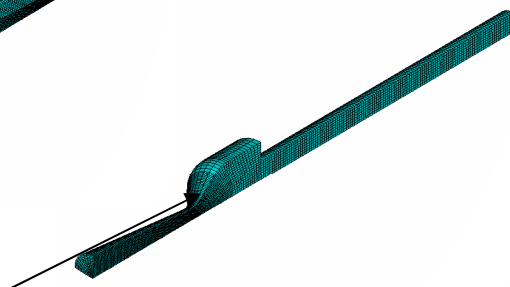
- 51 точка;
- 102 кривых;
- 69 поверхностей;
- 16 объемов;
- 69987 узлов;
- 59025 гексаэдрических элементов.



а

Характеристика КЭМ:

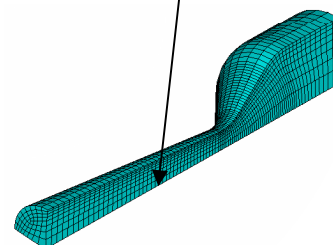
- 34 точки;
- 67 кривых;
- 46 поверхностей;
- 11 объемов;
- 25035 узлов;
- 25577 гексаэдрических элементов.



б

Характеристика КЭМ:

- 19 точек;
- 33 кривых;
- 21 поверхность;
- 5 объемов;
- 5677 узлов;
- 4417 гексаэдрических элементов.



в

Рис. 2. Конечно-элементные модели (КЭМ):  
а – камеры, сопла и «воздушного» пространства; б – камеры и сопла; в – сопла

Построенные в ANSYS/LS-DYNA конечно-элементные сетки, а также их характеристики показаны на рис. 2.

При моделировании течений в LS-DYNA использовались восьмиузловые объемные элементы (6-я и 7-я формулировки), 9-я модель материала (модель Null-материала) вместе с уравнения состояния первого типа (полиномиальное уравнение состояния).

Граничные условия на поверхности горения задавались с помощью ключевого слова \*BOUNDARY\_AMBIENT\_EOS. На «удаленных» поверхностях задавались граничные условия неотражения.

На рис. 3 представлены распределения модуля скорости и давления в камере и сопле в различные моменты времени.

Следует заметить, что используемый в LS-DYNA для описания взаимодействия структур с различными типами механического поведения (например, взаимодействие газа с деформируемым твердым телом) лагранжево-эйлеровый алгоритм пространственно-временной дискретизации позволяет сравнительно легко учесть взаимодействие текущего газа с стенками сопла, камеры, другими деталями двигателя, а также оценить силу тяги и другие связанные с ней

<sup>1</sup> По материалам доклада Музейзника А.Ю. "Моделирование рабочих процессов в твердотопливных ракетных двигателях в программах LS-DYNA и STAR-CD" на МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроению, СГАУ, Самара. 2003 г.

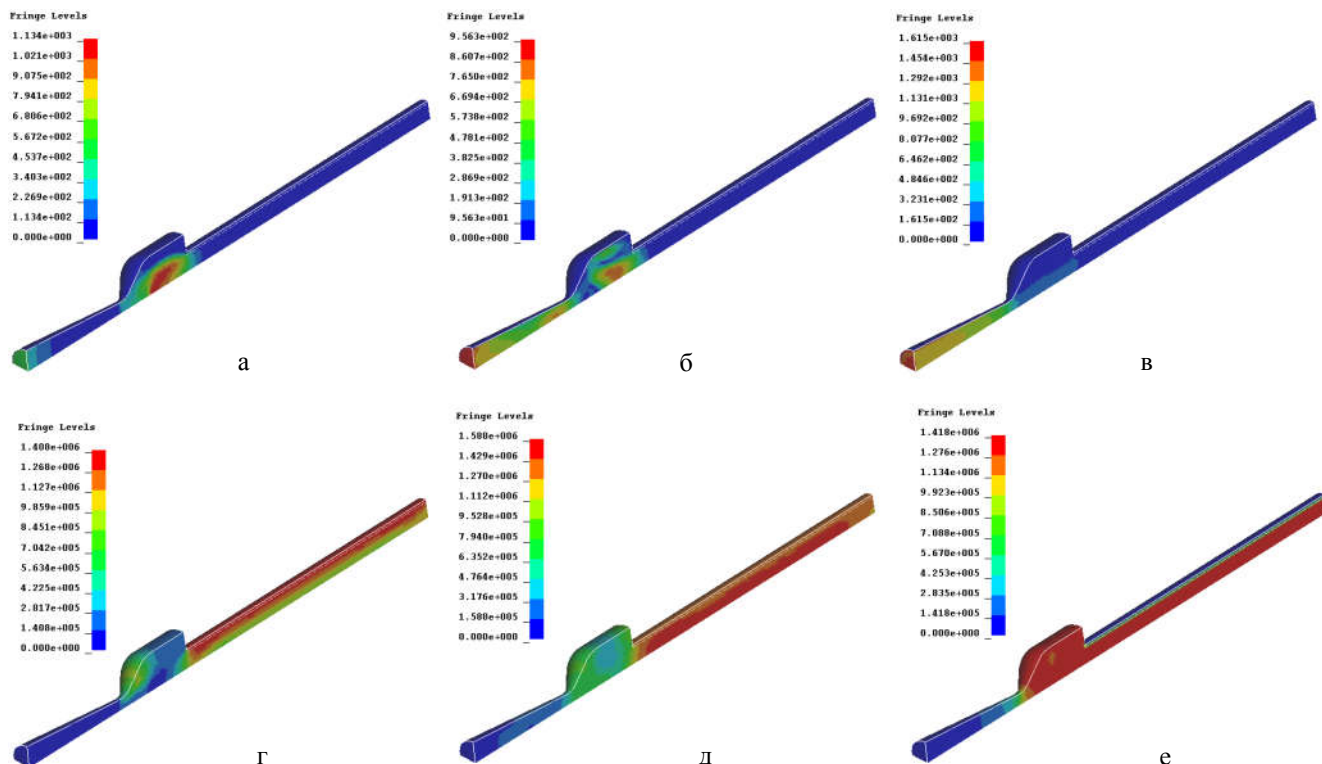


Рис. 3. Распределение модуля скорости (а,б,в) и давления (г, д, е) в камере и сопле:  
а, г -  $t = 240$  мкс; б, д -  $t = 510$  мкс; в, е -  $t = 3000$  мкс;

При моделировании течений в CFD-пакете использовались сетки, созданные в ANSYS/LS-DYNA. Результаты моделирования течений показаны на рис. 4 ... 7.

На рис. 4 и 5 показаны распределения модуля скорости, относительного давления, абсолютной температуры, чисел Маха и кинетической энергии турбулентности при трансзвуковом течении газа через сопло. На рис. 4 показаны распределения перечисленных величин в области сопла (см. КЭМ на рис. 2,в), на рис. 5 – области сопла и «воздушном» пространстве (см. КЭМ на рис. 2,а).

Результаты моделирования течения реагирующего газа в сопле показаны на рис. 6. Считалось, что на вход сопла подается предварительно смешанная смесь воздуха с  $H_7C_8$  при избытке топлива. Параметры в уравнениях, которые описывают химическую реакцию предполагаемого типа, были получены из базы данных CFD-пакета. На рис. 6 показаны распределения модуля скорости, относительного давления, абсолютной температуры и концентрации топлива ( $H_7C_8$ ) в газовом потоке.

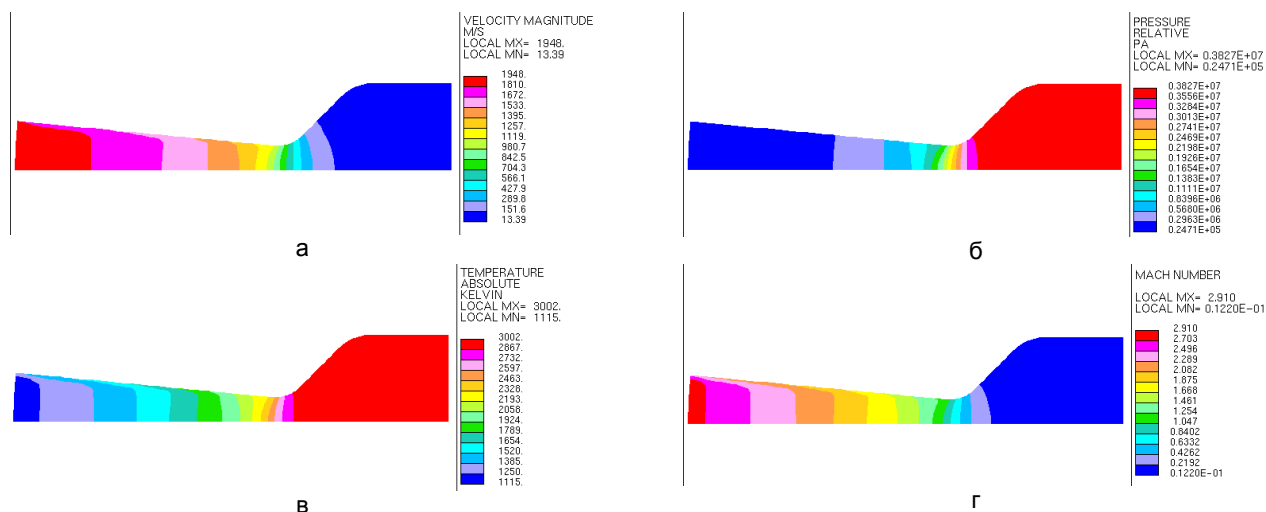


Рис. 4. Результаты моделирования:  
а - распределение модуля скорости; б - относительного давления;  
в - абсолютной температуры; г - чисел Маха

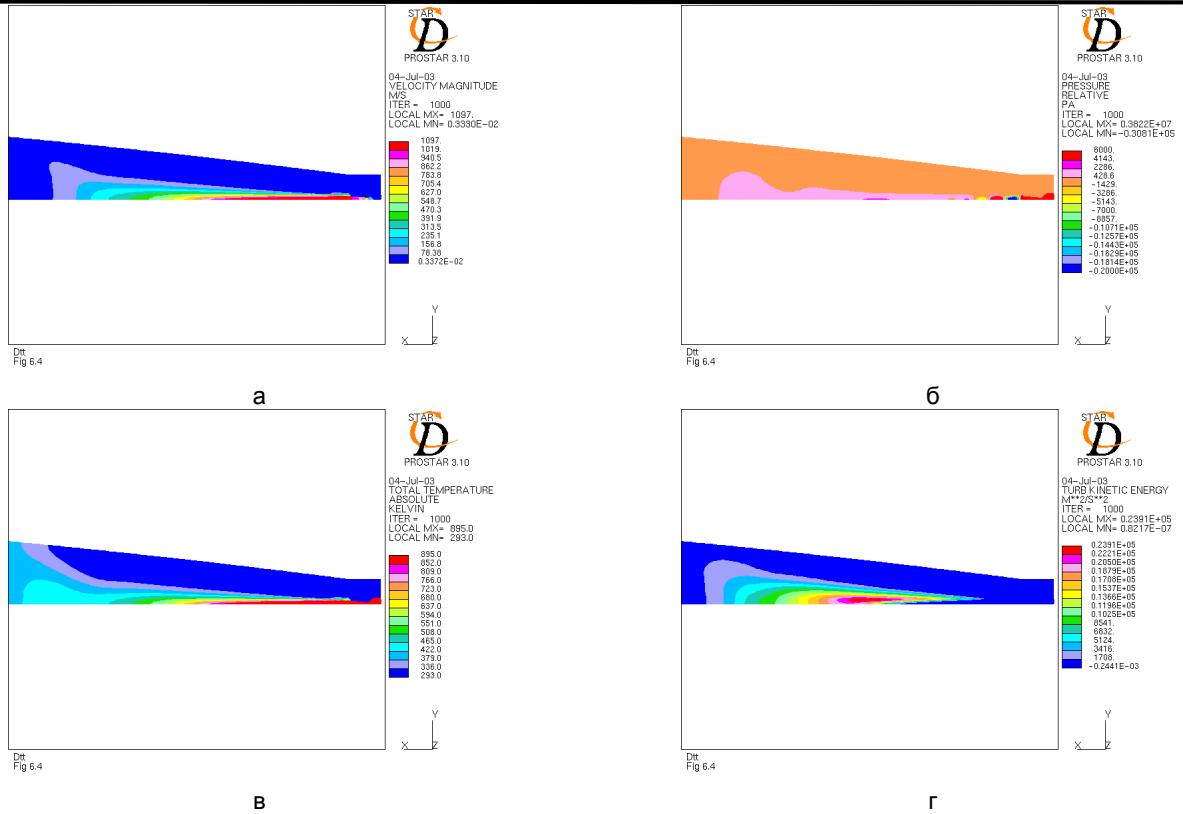


Рис. 5. Результаты моделирования:  
а - распределение модуля скорости; б - относительного давления;  
в - абсолютной температуры; г - кинетической энергии турбулентности

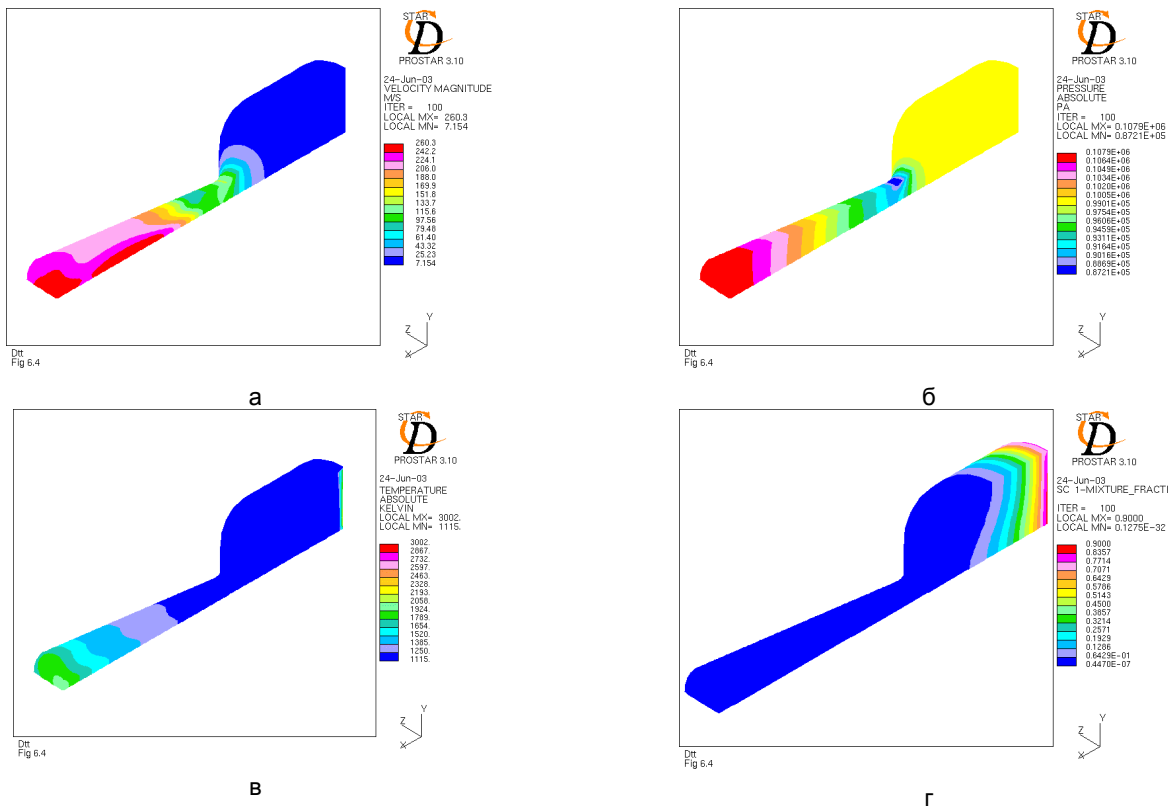


Рис. 6. Результаты моделирования:  
а - распределение модуля скорости; б - относительного давления;  
в - абсолютной температуры; г - концентрации топлива

Результаты моделирования течения реагирующего газа в сопле с присутствием жидкой дисперсной реагирующей фазы (капель  $H_7C_8$ ) показаны на рис. 7. Считалось, что на вход сопла дополнительно подается 64 пакета капель  $H_7C_8$ , каждый из которых имеет определенные значения диаметра капель, начальной скорости и начального положения. Также считалось, что капли имеют возможность взаимодействовать между собой, стенками сопла и газовым потоком, а также испаряться, изменяя при этом свой диаметр и увеличивая концентрацию топлива в потоке. Параметры в уравнениях, которые описывают взаимодействие капель, были получены из базы данных CFD-пакета.

На рис. 7 показаны распределения модуля скорости, относительного давления, а также движение капель. Цвета, показанные на рис. 7, г соответствуют диаметру капель.

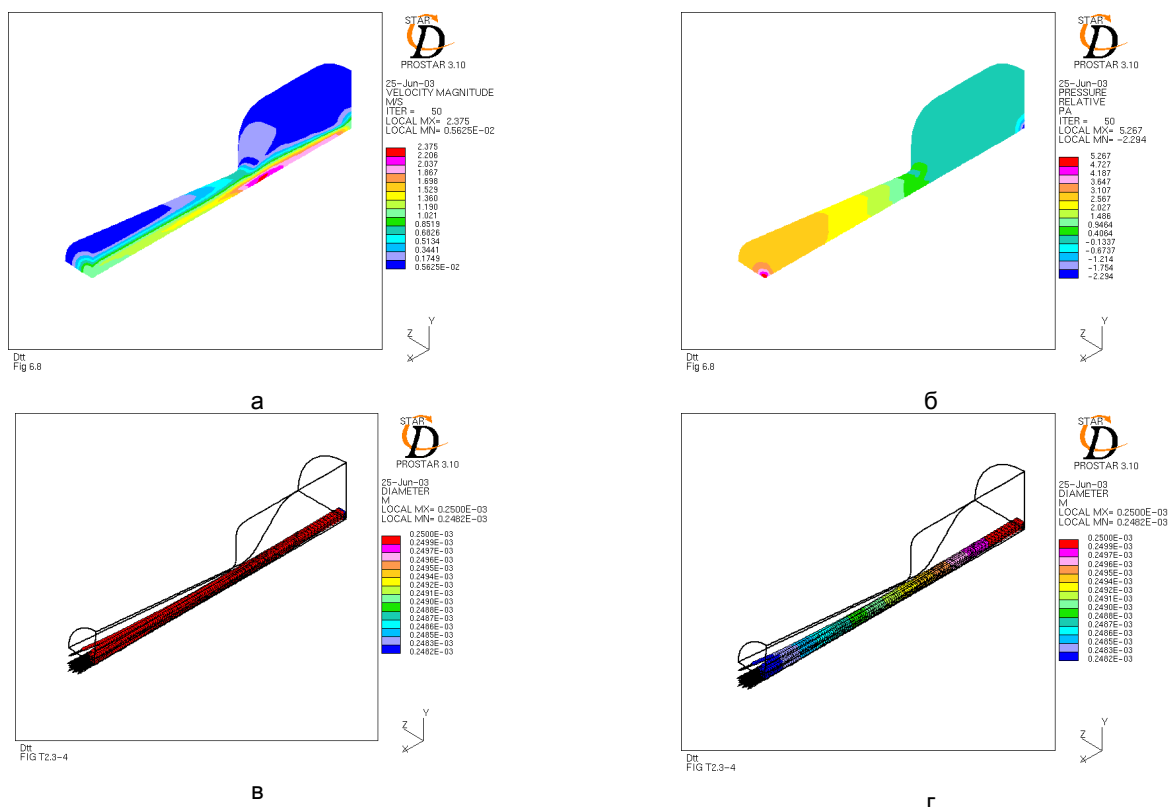


Рис. 7. Результаты моделирования:  
а - распределение модуля скорости; б - относительного давления;  
в - диаметра капель; г - диаметра капель