

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТВЕРДОТОПЛИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ

Ю.А. Ткаченко

(представил д.т.н., проф. И.М. Приходько)

Описаны модель процесса теплопереноса в фрагменте твердотопливного ускорителя и программа его исследования численными методами. Представлены результаты оценки степени влияния некоторых параметров процесса на нестационарное тепловое состояние фрагмента ускорителя.

Зависимость тактико - технических характеристик ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) от теплового состояния заряда обусловила необходимость его определения на момент старта. Эта проблема весьма актуальна для ракет, эксплуатация которых проходит в условиях прямого воздействия климатических факторов (переменных во времени температуры атмосферного воздуха, солнечной радиации, ветра и т.д.), формирующих нестационарное температурное поле двигателя. С другой стороны, на формирование температурного поля оказывают существенное влияние особенности теплопереноса внутри двигателя (конвективный, лучистый теплоперенос, теплопроводность твердого топлива, материала корпуса и др.).

Совокупный учет как внешних, так и внутренних особенностей теплопереноса в реальном РДТТ представляет собой крайне сложную задачу. Поэтому при практических расчетах обычно принимаются упрощающие допущения. В частности, нередко предполагается отсутствие радиационного воздействия на двигатель, характеристики теплопереноса в воздушных прослойках принимаются постоянными, не учитывается лучистая составляющая процесса. Правомерность таких допущений не всегда обоснована. Обращение к численным методам решения поставленной задачи позволяет рассматривать ее в наиболее полной постановке и оценивать величины погрешностей, вносимых в расчет упрощающими допущениями.

Ниже изложены результаты подобного исследования применительно к фрагменту многошашечного твердотопливного ускорителя (рис. 1) с использованием программы, обеспечивающей расчет нестационарного теплового состояния объекта исследования в двумерной постановке методом переменных направлений по алгоритму, известному как “прогонка”.

При построении сеточного аналога применено “сгущение” разбивки по радиусу в сторону наружной поверхности шашки. Разбивка шашки по углу (на

сектора) равномерная. Корпус рассматривается как одноблочный по толщине. Схема сетки-аналога приведена на рис. 2.

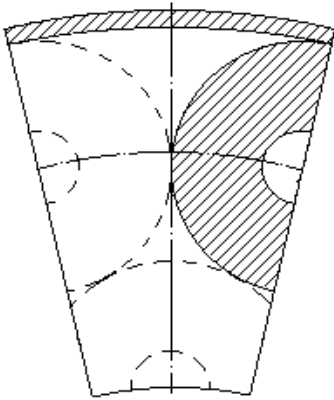


Рис.1. Фрагмент двигателя

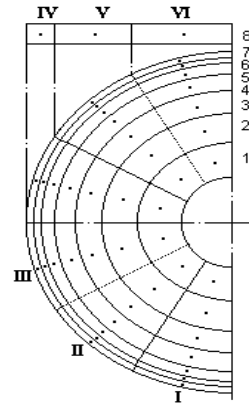


Рис.2. Схема сетки-аналога

Теплофизические характеристики материалов корпуса и шашки, степень черноты их поверхностей приняты постоянными. Сделано допущение об отсутствии теплопереноса в канале шашки.

Все остальные параметры теплового переноса переменны и корректируются на каждом временном шаге по результатам, полученным на предыдущем шаге, но без проведения итерационных процедур.

Температура атмосферного воздуха, радиационный поток, скорость ветра заданы как функции времени на основании данных, приведенных в [1]. Ход температуры атмосферного воздуха представлен как сумма хода среднемесячной и суточной температур. Радиационный поток, воздействующий на корпус, соответствует суммарному потоку солнечной радиации, падающему на горизонтальную поверхность на широте г. Киев. Теплофизические свойства воздуха принимались по [2] и аппроксимировались функциями температуры.

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности корпуса определялся для случая поперечного обтекания одиночного цилиндра с учетом угла набегающего воздушного потока по зависимостям, приведенным в [3]. В качестве определяющей принималась температура, равная полусумме температуры атмосферного воздуха и средней температуры блоков корпуса.

Теплоперенос в прослойке рассматривался как процесс теплопроводности с эффективным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_{эф} = \epsilon_k \cdot \lambda + \alpha_\pi \cdot \delta,$$

где  $\epsilon_k$ ,  $\alpha_\pi$  - коэффициенты конвекции и теплоотдачи излучением;  $\lambda$  - теплопроводность воздуха;  $\delta$  - расстояние между излучающими поверхностями, равное расстоянию между их срединными точками.

Расчет лучистого переноса тепла сводился к нахождению коэффициента

теплоотдачи излучением  $\alpha_{\text{л}}$  по формулам [3] для треугольной прослойки [4]. При этом температура корпуса принималась равной температуре его среднего блока, а температура поверхности шашки - равной средней температуре поверхностных блоков, обращенных к прослойке. В отношении поверхностных блоков шашки, обращенных к внутренней полости (между шашками), сделано допущение об отсутствии теплоотдачи с их поверхности.

С помощью описанной программы была выполнена оценка степени влияния некоторых факторов на точность определения теплового состояния элементов рассматриваемого фрагмента двигателя путем сопоставления результатов следующих вариантов расчета: 1) учтены все перечисленные выше параметры теплопереноса с учетом их переменного характера; 2) воздействие солнечной радиации не учитывалось; 3) лучистая составляющая теплопереноса в прослойке не учитывалась, конвекция учтена коэффициентом  $\epsilon_k = 1,5$ .

На рис.3 представлены в графической форме результаты расчета, ото-

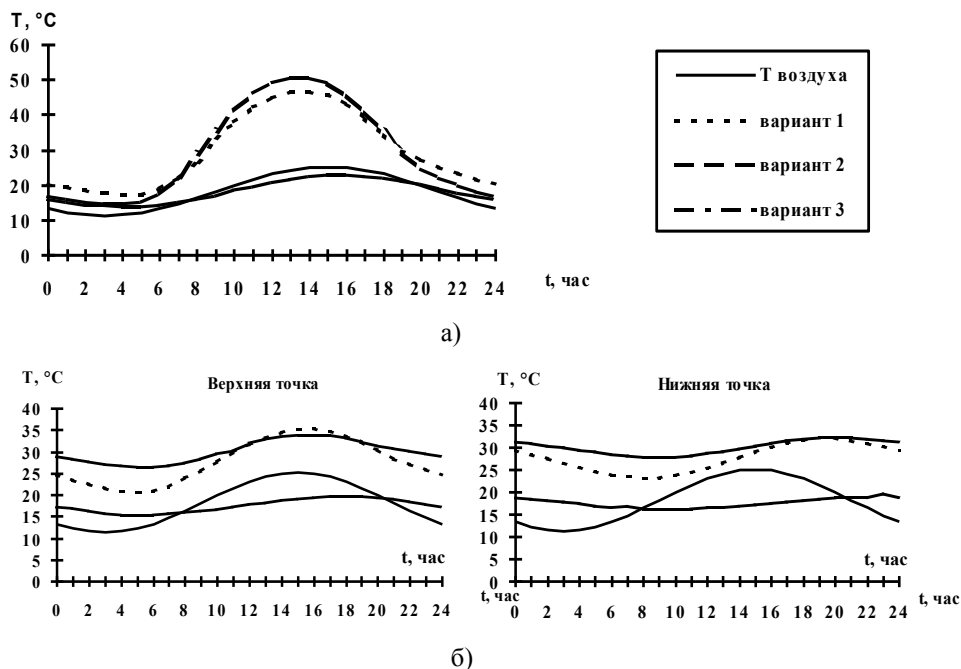


Рис. 3. Изменение температуры корпуса (а) и шашки (б)

бражающие изменение температуры корпуса и шашки (в верхней и нижней точках диаметрального сечения) для указанных выше вариантов в течение наиболее жарких суток года.

Как видно из рис. 3а, в предполагаемых условиях эксплуатации макси-

мальная температура корпуса вследствие воздействия на него солнечной радиации может достигать  $46^{\circ}\text{C}$ , при этом разница между температурами корпуса и атмосферного воздуха днем достигает  $20\text{--}22^{\circ}\text{C}$ , а ночью –  $6\text{--}8^{\circ}\text{C}$ . Если же солнечная радиация не учитывается, то расчетная температура корпуса мало отличается от температуры атмосферного воздуха. Это создает неверное представление о тепловом состоянии корпуса. Допущение о постоянстве эффективного коэффициента теплопроводности прослойки приводит к тому, что расчетная температура корпуса в дневное время на  $5^{\circ}\text{C}$  (на 10%) выше, а в ночное время на  $4^{\circ}\text{C}$  (на 20%) ниже, чем в случае учета переменной теплопереноса в прослойке и солнечной радиации.

Результаты расчета теплового состояния шашки для сопоставляемых вариантов приведены на рис. 3б. В целом, характер влияния принимаемых допущений носит аналогичный характер. Изменяются как сами значения, так и диапазон их изменения. Причем, в верхней зоне шашки это выражено существеннее, чем в нижней. Так, в верхней точке диаметрального сечения шашки максимальная температура составляет  $35^{\circ}\text{C}$ . На  $1^{\circ}\text{C}$  эта температура ниже при допущении о постоянстве  $\lambda_{\text{эф}}$  в прослойке и на  $15^{\circ}\text{C}$ , если не учитывается солнечная радиация. Минимальная температура (в ночное время) в первом случае равна  $20^{\circ}\text{C}$ , во втором на  $8,5^{\circ}\text{C}$  (42%) выше, в третьем - на  $5^{\circ}\text{C}$  (25%) ниже. В нижней точке диаметрального сечения наблюдается сходная картина, но с временным сдвигом на 4,5 часа. Расхождение между первым и вторым вариантами достигает  $14,5^{\circ}\text{C}$  (почти 50%) на уровне максимального значения температуры.

Более полное представление о влиянии принимаемых допущений на результат расчета дает рис. 4, на котором приведены распределения температуры по вертикальному диаметру шашки для трех рассматриваемых вариантов, соответствующие моментам наибольших перепадов температуры между верхней и нижней точками шашки. Следует отметить, что моменты экстремальных перепадов не совпадают во времени с экстремальными температурами поверхности шашки. Видно, что влияние принимаемых допущений проявляется, во-первых, в разных значениях среднесуточной температуры в сечении шашки (об этом свидетельствуют значения температуры в нижней точке шашки), и, во-вторых, в амплитуде колебаний температуры (особенно в верхней точке шашки) в течение суток.

Очевидно, что в случае, когда скорость горения топлива является функцией температуры, точность расчета горения шашки, тяговых характеристик двигателя, допустимой длительности его работы в значительной мере будут зависеть от того, результат какого варианта теплового расчета используется в качестве исходных данных.

В целом, на основании изложенного можно сделать вывод о том, что при расчете теплового состояния зарядов РДТТ, эксплуатируемых в условиях непосредственного воздействия климатических факторов, следует применять

методики, обеспечивающие учет переменности определяющих факторов (солнечной радиации, хода годовой и суточной температур воздуха, конвекции и лучистого переноса в воздушных прослойках).

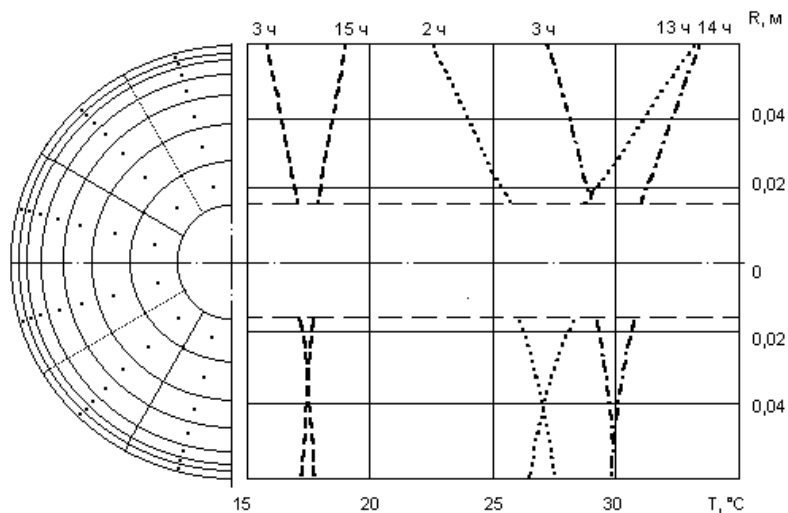


Рис. 4. Распределение температуры по вертикальному диаметру шапки

Что касается разработанной вычислительной программы, то ее целесообразно использовать при проведении оценочных расчетов и анализе степени влияния параметров теплопереноса на конечный результат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по климату СССР. Вып. 10, ч. 1, 2. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 607 с.
2. Богданов С. Н., Иванов О.П. Холодильная техника. Свойства веществ. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
3. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: ГЭИ, 1959. – 414 с.
4. Исаченко В. П., Осипова В. А. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 439 с.

*Поступила в редколлегию 11.09.2000*