

УДК 532.5

И.М. ВАСЕНИН, А.А. ГЛАЗУНОВ*, И.В. ЕРЕМИН*, С.Н. УСТИНОВ**, В.С. ФИНЧЕНКО***

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗРЫВА РАЗГОННОГО БЛОКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ¹

Описывается математическая модель, позволяющая анализировать взрыв компонент жидких топлив разгонного блока ракеты-носителя и разлет фрагментов взорвавшегося аппарата. Численная реализация этой модели позволяет оценить параметры взрыва и рассчитать разлет фрагментов.

Ключевые слова: разгонный блок, компоненты жидкого топлива, взрыв, газожидкостная смесь, модель смеси, разлет фрагментов.

Для вывода космических аппаратов (КА) на заданную орбиту используется ракета-носитель (РН) с разгонным блоком (РБ). В частности, РБ «Фрегат» (РБФ) разработки ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» [1]. Конструкция РБФ представляет собой блок сферических баков с маршевой двигательной установкой. Баки с окислителем и горючим расположены попарно и разделены между собой перегородкой. Двигательная установка позволяет РБФ реализовать различные схемы выведения КА путем многократного запуска. В зависимости от комплексной реализации работы РН и РБ по выводу КА на орбиту в баках РБ остается определенное количество компонентов топлива. После выполнения задач на орбите РБФ уводится из околоземного пространства по траектории спуска к Земле. При движении РБФ в плотных слоях атмосферы происходит его аэродинамический нагрев, что приводит к разрушению баков с горючим и окислителем. Если разрыв баков происходит в близкие моменты времени, то возможно смешение самовоспламеняющихся компонентов топлива и возникновение химической реакции с выделением тепла. Фактически такие реакции всегда приводят к взрывам. Настоящая работа посвящена математическому моделированию процесса взрыва и вычислению параметров разлета несгораемых элементов РБФ, необходимых для расчета зоны безопасности при запуске ракеты-носителя.

Физико-математическая постановка задачи расчета взрыва самовоспламеняющихся компонентов топлива РБФ

Поскольку данная работа проводилась для оценки зон безопасности при взрывах РБ «Фрегат» на траекториях спуска, при построении математической модели применялся принцип: ни на каком этапе расчетов модель не должна приводить к уменьшению мощности взрывов и, следовательно, к уменьшению эллипсов рассеивания выпадающих на Землю элементов. Наиболее сложным при проведении расчетов в решаемой задаче является процесс смешения компонент. При относительных объемных концентрациях жидкой фазы 0.1–0.5 среднее расстояние между жидкими частицами внутри каждой из компонент составляет лишь 1–2 их диаметра. Поэтому процессы смешения таких газожидкостных потоков наряду с взаимной диффузией паровой фазы должны сопровождаться столкновениями жидких частиц, препятствующими проникновению одного компонента в другой. В настоящее время эти процессы для больших объемных концентраций жидкой фазы изучены недостаточно. Для выхода из затруднения в работе использовалось допущение о том, что в течение времени задержки самовоспламенения после соприкосновения компонент они беспрепятственно проходят друг через друга со скоростями, рассчитанными для каждого компонента без учета присутствия другого компонента. В отсутствие столкновения компонент друг с другом они займут наибольший объем, в котором будут присутствовать вместе. Такой подход к расчету смешения компонент завышает величину объема смешения. Величина этого объема пропорциональна времени задержки воспламенения и скоростям, с которыми компоненты проникают друг через друга. Знаний объема смешения компонент и находящихся в этом объеме масс окислителя и горючего недостаточно для определения энергии взрыва при их взаимодействии. Из-за наличия градиентов параметров в некоторых точках объема смешения оказывается много горючего и мало окислителя для его сгорания, в то время как в других точках при достаточном количестве окислителя слишком мало горючего. Поэтому при их совместном сгорании необходим расчет энергии взрыва с учетом концентрации компонент.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания № 2014/223 (код проекта 2382).

Очевидным подходом к решению данной задачи является термодинамический расчет. Однако проведение термодинамических расчетов в сотнях тысяч ячеек, используемых в компьютерной модели, – слишком накладная задача с точки зрения времени вычислений. Поэтому для расчетов энергии взрыва в зависимости от соотношения компонент был использован другой подход. Известно, что максимальное энерговыделение при горении диметилгидразина в четырехокиси азота имеет место, когда в смеси на одну весовую часть горючего приходится три части окислителя. С учетом этого факта в расчетах использовалась следующая логика. Если в смеси недостаточно горючего и много окислителя, то сгорает все горючее, потребляя при сгорании три части окислителя. Если в смеси недостаточно окислителя, то в реакции горения участвует весь окислитель, который при сгорании окисляет массу диметилгидразина, равную $1/3$ своей собственной массы. Считается, что при таком сгорании каждый раз выделяется максимальная энергия. С целью поиска схемы и последовательности разрушения баков, приводящих к максимальному энерговыделению при взрыве, проводились параметрические исследования. Было найдено, что максимальное энерговыделение имеет место, когда отверстия в баках открываются навстречу друг другу. При этом оказалось, что наибольшее количество взрывчатой смеси образуется, когда бак с окислителем взрывается раньше, чем бак с горючим. Величина этого опережения зависит от заполнения баков перед взрывом. В случае заполнения баков на 50 % величина опережения составила 0.024 с. При заполнении баков на 25 % величина опережения равна 0.017 с. При заполнении на 10 % опережение было равно 0.012 с. Предполагалось, что взрыв может произойти при разгерметизации 4-х баков (2 бака с горючим и 2 бака с окислителем) с учетом задержки взрыва баков с горючим. Соотношение массы окислителя к массе горючего принято равным 3. При этом определено, что в случае взрыва баков, в зависимости от количества топлива (окислителя и горючего), оставшегося в баках, энерговыделение эквивалентно взрыву: 526 кг топлива (окислитель + горючее), в случае заполнения баков на 50 %; 280 кг топлива (окислитель + горючее), в случае заполнения баков на 25 %; 108 кг топлива (окислитель + горючее), в случае заполнения баков на 10 %. Следует заметить, что построенная математическая модель расчета энергии взрыва безусловно завышает эту энергию.

Рассмотрим состояние газожидкостной среды, находящейся в баках и вырывающейся под давлением наружу. По существу, внутри баков нам известны только термодинамические параметры среды: соотношение масс жидкой и паровой фаз, а также температура и давление. Совершенно неизвестно дисперсное состояние жидкой фазы. После разгерметизации баков начинается истечение этой среды во внешнее пространство. В образовавшихся двухфазных потоках менее плотный газ будет обгонять жидкие частицы, которые под действием сил сопротивления, возникающих из-за разностей скоростей, начинают двигаться вслед за газом. В процессе своего движения они могут разрушаться газовым потоком, другими частицами, а также коагулировать друг с другом. Наряду с разностью скоростей между фазами возникает также температурная неравновесность, выражающаяся в разности температур фаз. Неравновесные модели двухфазных сред детально разработаны для течений в соплах ракетных двигателей, использующих в качестве топлива алюминиевое горючее. К сожалению, в рассматриваемом случае взрыва их невозможно использовать из-за неизвестных размеров жидких частиц. Поэтому единственной реальной возможностью математического моделирования истечения газожидкостной смеси после разгерметизации баков остаётся использование равновесной модели этой смеси [2–4].

При расчетах распространения газожидкостных смесей окислителя или горючего из отверстий, образовавшихся при нарушении целостности баков, использовалась разностная схема 1-го порядка аппроксимации С.К. Годунова [5], в которой при записи соотношений для распада произвольного разрыва использовались соотношения для равновесной модели с учетом объема занимаемого конденсированной фазой. Нестационарные задачи истечения решались в осесимметричной постановке с осью симметрии, проходящей через центры примыкающих друг к другу сферических баков окислителя и горючего. Указанные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma r}{\partial t} + \frac{\partial a r}{\partial x} + \frac{\partial b r}{\partial r} = f, \quad (1)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} 0 \\ p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь ρ – плотность смеси; u, v – продольная и радиальная компоненты вектора скорости смеси; p – давление; e – внутренняя энергия. Система (1) замыкается уравнением состояния идеального газа с учетом объема занимаемого жидкими частицами $p \left(\frac{1}{\rho} - \frac{z}{\rho_l} \right) = \bar{R}T$, $\bar{R} = (1-z) \frac{R}{\mu}$, где T – температура смеси; ρ_l – плотность частиц жидкости; $z = \rho_l / \rho$; μ – молекулярный вес смеси, R – универсальная газовая постоянная. В качестве начальных условий в момент времени $t = t_1$ в баке с окислителем задаются параметры окислителя: ρ_{10} – плотность смеси; T_{10} – температура смеси; $u_{10} = 0$; $v_{10} = 0$. Давление насыщенных паров окислителя p_{v1} , для заданной температуры рассчитывалось с помощью аппроксимации закона Клайперона – Клаузиуса. Затем из уравнения состояния вычислялась массовая доля жидкой фазы окислителя z_1 . Аналогично в момент времени $t = t_2$ задавались начальные параметры в баке с горючим: ρ_{20} , T_{20} , $u_{20} = 0$, $v_{20} = 0$. Значение p_{v2} и z_2 находились так же, как и в случае окислителя. Вне баков задавались параметры атмосферы на заданной высоте. Величины начальных моментов времени t_1 и t_2 подбирались таким образом, чтобы получить наибольший объем смешанных компонент. Рассматривались также различные расположения и величины отверстий истечения.

Результаты расчетов смешения компонентов топлива

Иллюстрация процесса развития взрыва баков и смешения компонентов топлива приведена на рис. 1–4. На рис. 1 показано распределение плотности газожидкостной смеси окислителя после разгерметизации бака на момент времени 0.024 с, в который происходит разгерметизация бака с горючим. Видно, что расширение окислителя в данный момент приводит к немономонному уменьшению его плотности. На рис. 2 показано распределение плотности компонент после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси. Можно отметить, что по сравнению с рис. 1 появилась область смешения компонент (выделенная область на рис. 2). В этой области уровень давления в момент начала воспламенения смеси, как иллюстрирует рис. 3, составляет около 150000 Па. На рис. 4 показан разлет баков после начала взрыва смеси. Можно отметить, что взрыв разделяет окислитель и горючее, разбрасывая их в разные стороны. Рис. 4 также иллюстрирует положение ударных волн после начала взрыва смеси горючего и окислителя.

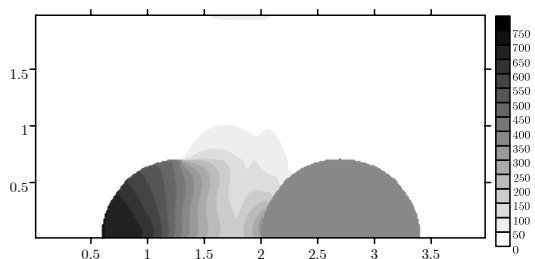


Рис. 1. Распределение плотности газожидкостной смеси окислителя после разгерметизации бака

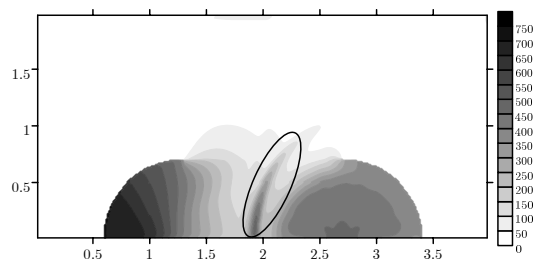


Рис. 2. Распределение плотности компонент после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси

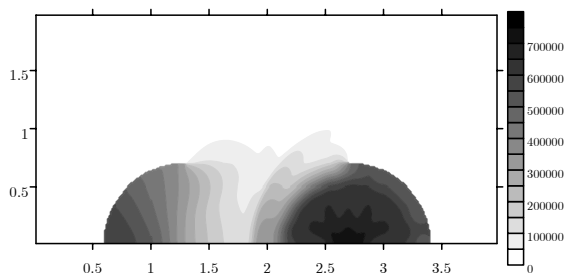


Рис. 3. Распределение давления после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси

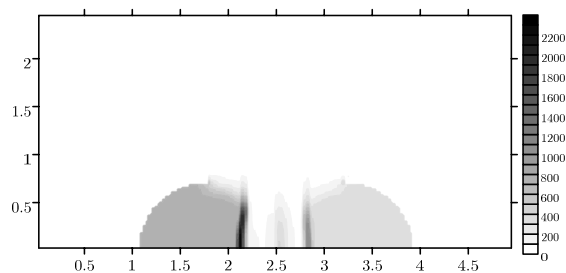


Рис. 4. Распределение давления при разлете баков после начала взрыва смеси горючего с окислителем

Физико-математическая модель задачи расчета разлета несгораемых элементов при взрыве РБФ

Взрыв самовоспламеняющегося топлива РБФ приводит к разрушению аппарата на отдельные фрагменты. Разрушение РБФ возможно также на траектории спуска вследствие возникающих в полете высоких тепловых и силовых нагрузок. В последнем случае взрыв будет разбрасывать уже отделившиеся фрагменты, находящиеся на некотором расстоянии от центра взрыва. Так как истинное положение фрагментов неизвестно, то следует изучить все возможные ситуации. При расчетах разлета элементов РБФ было сделано предположение, согласно которому взрыв одной пары топливных баков немедленно вызывает взрыв другой пары. Поэтому мощность взрыва удваивается. Фактически рассматривалась мгновенная детонация смеси в объеме аппарата РБФ, а именно в объеме цилиндра высотой 1.5 м и диаметром 3 м. Поле газодинамических параметров взрыва рассчитывалось путем численного интегрирования уравнений (2). Начальные условия вычислялись с помощью описанной выше модели взрыва и данных на траектории полета на высоте 91.67 км. Скорость аппарата принималась равной 9855 м/с.

В качестве иллюстрации результатов вычисления газодинамических параметров на рис. 5 приведено поле давления, рассчитанное на момент времени 0.4 с после начала взрыва. На рисунке видны ударная волна взрыва и волна, образовавшаяся при ее взаимодействии с головной ударной волной.

Расчеты скоростей фрагментов РБФ при взрыве проводились путем численного интегрирования уравнений их движения с учетом сил сопротивления потоку. При этом вычислялись также координаты, нужные для нахождения аэродинамических параметров в окрестности фрагментов в каждый момент времени. Рассчитывалось влияние взрыва на изменение скорости несгораемых элементов: двигательной установки, шаровых баллонов и топливных баков. При вычислении сил сопротивления применялись коэффициенты сопротивления для сфер и цилиндров, взятые из [6]. Для каждого из перечисленных элементов наряду с их начальным положением в РБФ рассматривались варианты их начального положения относительно центра взрыва (рис. 6).

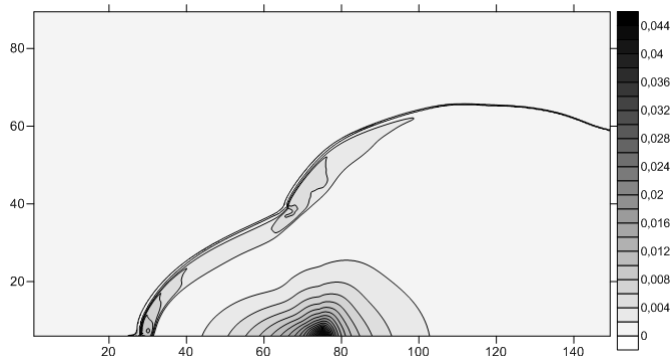


Рис. 5. Распределение давления при взрыве РБФ в момент времени $t = 0.4$ с

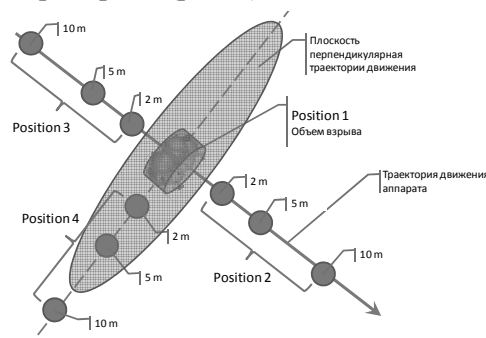


Рис. 6. Варианты начального расположения элементов перед взрывом

Численные исследования показали, что наибольшие добавки к скорости в результате взрыва получают топливные баки. Изменение их модуля скорости при взрыве для разных вариантов начального расположения относительно центра взрыва, приведенных на рис. 6, показано на рис. 7.

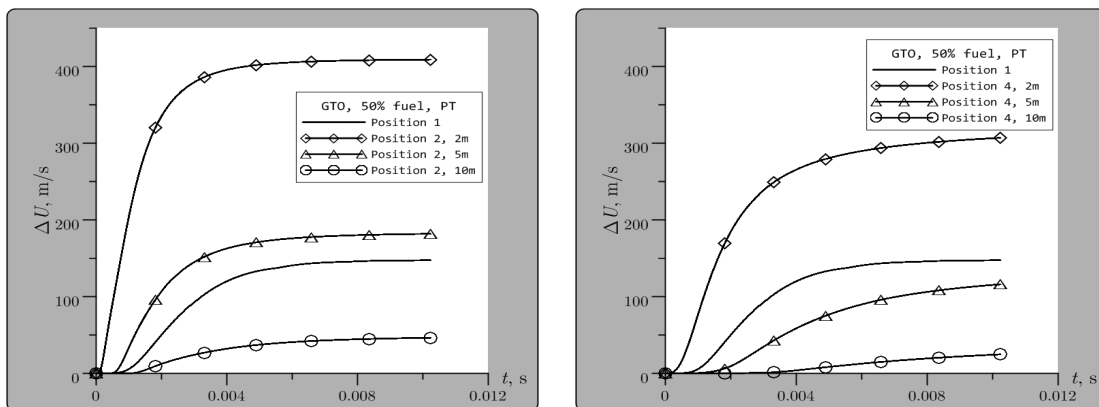


Рис. 7. Изменение модуля скорости топливных баков при взрыве для разных вариантов его начального расположения относительно центра взрыва

В силу того, что воздействие взрыва на ускорение элементов аппарата на 5–6 порядков превышает давление торможения набегающего потока воздуха при спуске, фактическая прибавка к скорости элементов при взрыве определяется только воздействием взрыва, хотя набегающий поток и учитывается в расчетах. Поэтому направление вектора прибавки скорости за счет взрыва практически совпадает с направлением вектора начального положения элемента относительно центра взрыва.

Заключение

Предложена математическая модель и выполнен численный анализ процесса взрыва компонентов жидких топлив, истекающих из шаровых баков, на траектории спуска РБ «Фрегат». Результаты анализа применены для расчета силового воздействия взрыва и изменений скорости неогораемых фрагментов РБ. Они позволяют уточнить эллипсы рассеивания при выпадении этих фрагментов на поверхность Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкция разгонного блока «Фрегат»: [сайт]. URL: http://www.laspace.ru/rus/fregat_construction.php
2. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., испр: в 2 т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
3. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. – М.: Машиностроение, 1974. – 212 с.
4. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. – 262 с.
5. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
6. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.09.14.

**ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки, Россия
E-mail: iveremin@niipmm.tsu.ru

Васенин Игорь Михайлович, д.ф.-м.н., профессор;
Глазунов Анатолий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор;
Еремин Иван Владимирович, зав. лабораторией;
Устинов Святослав Николаевич, зам. начальника отделения;
Финченко Валерий Семенович, ведущ. науч. сотр.

I.V. VASENIN, A.A. GLAZUNOV, I.V. EREMIN, S.N. USTINOV, V.S. FINCHENKO

MATHEMATICAL MODEL OF THE EXPLOSION UPPER STAGE OF THE LAUNCH VEHICLE

A mathematical model that analyzes the burst component of liquid fuels upper stage of the launch vehicle and scattering fragments of the exploded device. Numerical implementation of this model allows us to estimate the parameters of the explosion and to calculate the dispersal of fragments.

Keywords: upper stage, components of the liquid fuel, explosion, gas-liquid mixture, mixture model, scattering fragments.

REFERENCES

1. Upper stage "Fregat" – URL: <http://www.laspace.ru/rus/fregat.php>
2. *The Physics of Explosion*. Vol. 1. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 832 p.
3. *Sternin L.E. Fundamentals of Gas Dynamics of Two-Phase Flows in Nozzles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 212 p.
4. Vasenin I.M., Arhipov V.A., Butov V.G., Glazunov A.A., Trofimov V.F. *Gas Dynamics of Two-Phase Flows in Nozzles*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1986, 262 p.
5. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., et al. *Numerical Solution of Multi-Dimensional Problems in Gas Dynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1976, 400 p.
6. *Heat Exchangers design Handbook*. Vol. 1. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 560 p.