

УДК 532.5

**И.М. Васенин, А.А. Глазунов, И.В. Еремин,
С.Н. Устинов, В.С. Финченко**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВА КОМПОНЕНТОВ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Описывается подход, позволяющий в рамках равновесного двухфазного приближения, с учетом объема занимаемого частицами жидкости, анализировать процесс взрыва компонентов жидких топлив. Численная реализация осуществлялась в двухмерном приближении на основе схемы С. К. Годунова. Выполненные расчеты позволяют оценить распределение газодинамических параметров в разные моменты времени.

Ключевые слова: *разгонный блок, компоненты жидкого топлива, взрыв, газожидкостная смесь, модель смеси*

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. Топливные 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 расчетам процесса взрыва путем смешения компонентов топлива на траектории спуска РБФ.

Физико-математическая постановка задачи

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 компонентов. При относительных объемных концентрациях жидкой фазы $0,1 - 0,5$, среднее расстояние между жидкими частицами внутри каждого из компонентов составляет лишь $1 - 2$ их диаметра. Поэтому процессы смешения таких газожидкостных потоков наряду с взаимной диффузией паровой фазы должно сопровождаться столкновениями жидких частиц, препятствующими про-

никновению одного компонента в другой. В настоящее время эти процессы для больших объемных концентраций жидкой фазы изучены недостаточно и не могут быть рассчитаны на основании строгой теории.

Для выхода из затруднения в работе использовалось допущение о том, что в течение времени задержки самовоспламенения после соприкосновения компонентов они беспрепятственно проходят друг через друга со скоростями, рассчитанными для каждого компонента без учета присутствия другого компонента. В отсутствие столкновения компонентов друг с другом они займут наибольший объем, в котором будут присутствовать вместе. Такой подход к расчету смешения компонентов с физической точки зрения завышает величину объема смешения. Величина этого объема пропорциональна времени задержки воспламенения и скоростям, с которыми компоненты проникают друг через друга.

Знаний объема смешения компонентов и находящихся в этом объеме масс окислителя и горючего не достаточно 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 для расчетов энерговыделения при их совместном сгорании необходим расчет энергии взрыва с учетом концентрации компонентов.

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 компонентов 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 3 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.

Для проверки достоверности подхода с помощью изложенной выше логики была построена зависимость энерговыделения Q от кислородного коэффициента α_k

$$Q = Q_{\max} \frac{3,06\alpha_k + 1/3}{3,06\alpha_k + 1}. \quad (1)$$

Здесь Q_{\max} – максимальное энерговыделение, α_k – коэффициент, равный отношению числа атомов кислорода к тому его количеству, которое необходимо для полного окисления находящихся в смеси углерода и водорода. Формула (1) справедлива для величин $\alpha_k < 1$.

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 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 классическая разностная схема 1-го порядка аппроксимации С.К. Годунова [5]. При этом при записи соотношений для распада произвольного разрыва используются 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.

$$\frac{\partial \bar{\sigma} r}{\partial t} + \frac{\partial \bar{a} r}{\partial x} + \frac{\partial \bar{b} r}{\partial r} = \bar{f}, \quad (2)$$

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

Здесь ρ – плотность смеси; u, v – продольная и радиальная компоненты вектора скорости смеси; p – давление; e – внутренняя энергия. Система (2) замыкается уравнением состояния идеального газа с учетом объема занимаемого жидкими частицами

$$p \left(\frac{1}{\rho} - \frac{z}{\rho_l} \right) = \bar{R}T, \quad \bar{R} = (1-z) \frac{R}{\mu},$$

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 компонентов. 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 немонотонному уменьшению его плотности.

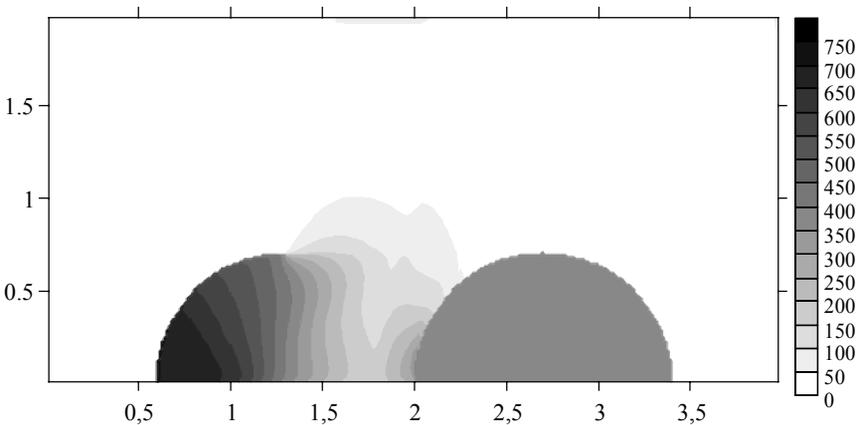


Рис. 1. Распределение плотности газожидкостной смеси окислителя после разгерметизации бака

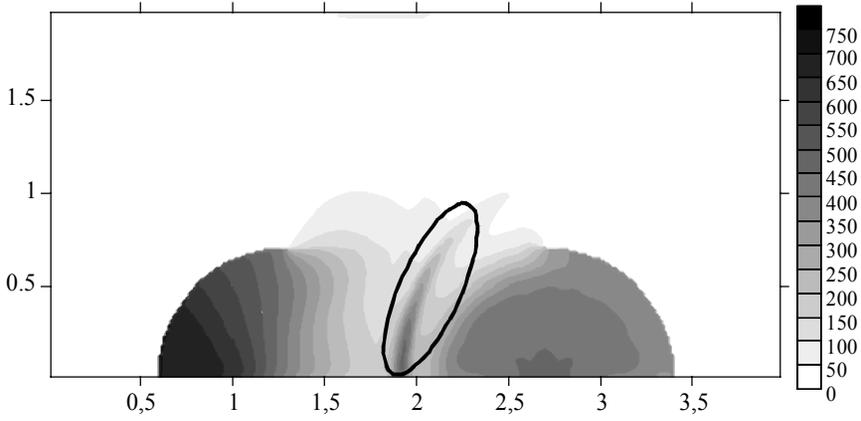


Рис. 2. Распределение плотности компонентов после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси

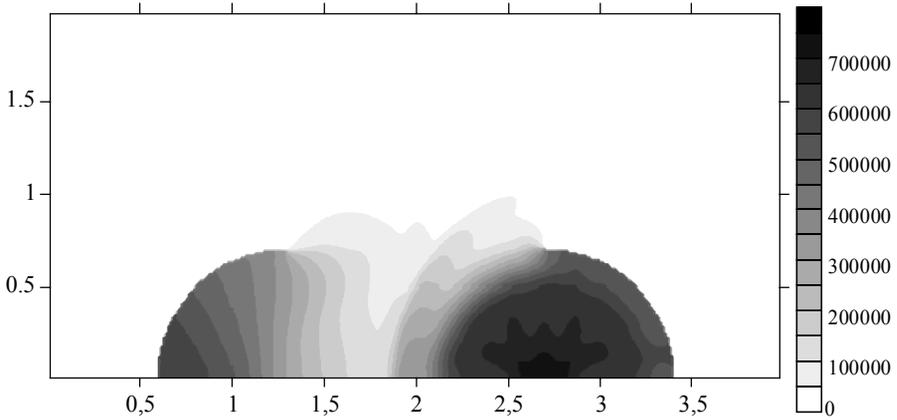


Рис. 3. Распределение давления после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси

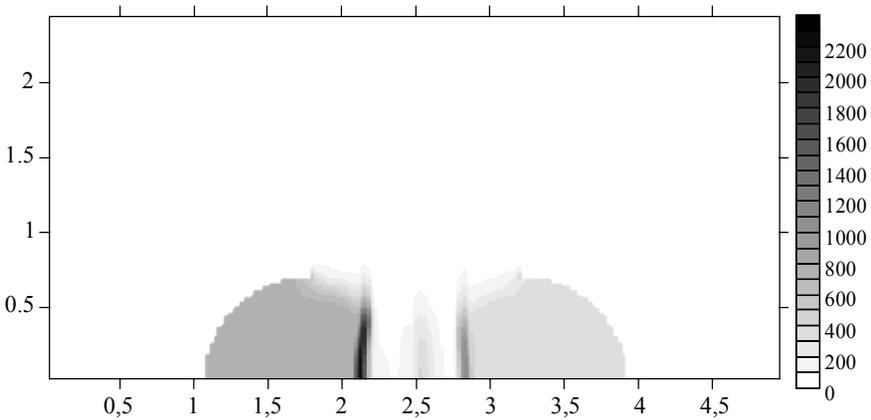


Рис. 4. Распределение давления при разлете баков после начала взрыва смеси горючего с окислителем

На рис. 2 показано распределение плотности компонентов после разгерметизации бака с горючим к моменту начала воспламенения смеси. Можно отметить, что по сравнению с рис. 1 появилась область смешения компонентов (выделенная область на рис. 2). В этой области уровень давления в момент начала воспламенения смеси, как иллюстрирует рис. 3, составляет около 150 000 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.

Заключение

Предложена инженерная методика и выполнен численный анализ процесса взрыва компонентов жидких топлив, истекающих из шаровых баков, на траектории спуска РБ «Фрегат». Результаты анализа могут служить в качестве исходных данных для расчета силового воздействия взрыва на отдельные элементы РБ, что позволяет уточнить эллипсы рассеивания при выпадении несгораемых элементов на поверхность Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конструкция* разгонного блока «Фрегат». 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. и др.* 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.

Статья поступила 01.11.2011г.

Vasenin I. M., Glazunov A.A., Eremin I. V., Ustinov S.N, Finchenko V.S. NUMERICAL SIMULATION OF THE EXPLOSION OF LIQUID FUEL COMPONENTS. An approach that permits one to analyze the process of explosion of liquid fuel components is described in the context of the two-phase equilibrium approximation, with allowance for the volume occupied by the fluid particles. The numerical implementation was carried out in the two-dimensional approximation based on the scheme of S.K. Godunov. The calculations make it possible to estimate the distribution of the gas dynamic parameters at different times.

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

Vasenin Igor Mikhailovich (Tomsk State University)

E-mail: gla@niipmm.tsu.ru

Glazunov Anatoly Anatoliievich (Tomsk State University)

E-mail: gla@niipmm.tsu.ru

Eremin Ivan Vladimirovich (Tomsk State University)

E-mail: iveremin@niipmm.tsu.ru

Ustinov Svyatoslav Nikolaevich (Lavochkin Research and Production Association)

E-mail: ust@laspace.ru

Finchenko Valerii Semeonovich (Lavochkin Research and Production Association)

E-mail: finval@migmail.ru