

УДК 621.642.17

В.Л. ДЖЕППА, А.А. ДУБРОВИНСКИЙ, М.П. САЛО, М.И. КОШКИН*Государственное конструкторское бюро «Южное», Днепропетровск, Украина***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ НЕСПЛОШНОСТИ
В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ**

Разработана математическая модель процесса образования несплошности в потоке жидкости насыщенной двумя газами. Проведен анализ изменения несплошности в зависимости от давления и температуры. Модель позволяет определять газосодержание в расходных магистралях жидкостных реактивных двигательных установок верхних ступеней ракет носителей.

жидкостная реактивная установка, несплошность потока, газосодержание, коэффициент Генри, газовые включения, относительная объемная концентрация

Одним из условий нормальной работы верхних ступеней ракет носителей является отсутствие крупных парогазовых включений в компонентах топлива, поступающих в управляющие блоки (УБ). Образованию таких включений способствует насыщенность компонентов топлива газами. Этот процесс может привести к задержке первых включений УБ, снижению тяги УБ и задержке воспламенения.

Возникновение газовых включений в компонентах топлива наблюдается при падении статического давления потока жидкости ниже его равновесного давления насыщения – суммы парциальных давлений растворенных газов и давления насыщенного пара жидкости.

Методики расчета подобных процессов, изложенные в публикациях, отсутствуют. В ГКБ «Южное» ранее была создана методика расчета несплошности потока в расходной магистрали маршевого двигателя, но в ней предполагается постоянство температуры и наличие только одного растворенного газа. Так как потребные расходы компонентов топлива для УБ на порядки меньше, чем расходы топлива для маршевого двигателя, то процессы, происходящие в расходных магистралях УБ выражены более детально. Поэтому при их описании нельзя пренебрегать изменением температуры, также надо

учитывать насыщенность компонентов топлива двумя технологическими газами – гелием и азотом.

В настоящей работе представлена математическая модель процесса образования несплошности компонентов топлива в магистралях жидкостной реактивной системы верхней ступени ракеты носителя, позволяющая определить газосодержание в компонентах топлива на входах в УБ и соответствующее снижение номинального значения тяги УБ.

Возможностью парообразования (вскипания) компонентов топлива в магистралях можно пренебречь, поскольку наименьшее статическое давление компонентов, в данной задаче, существенно больше давления их насыщенных паров в рассматриваемом диапазоне температур.

В заметных количествах в компонентах растворены технологический газ азот и газ наддува топливных баков гелий, которые вместе с насыщенным паром компонента топлива и составляют содержание газового включения.

При решении настоящей задачи необходимо принять во внимание, что температура компонентов топлива при течении их в магистралях может изменяться.

Поскольку минимальное время пребывания компонентов топлива в магистралях, для данной задачи,

существенно превышает время задержки газообразования порядка 1 с [1], будем полагать, что газ и жидкость находятся в равновесном состоянии.

Таким образом, задача определения газосодержания в компонентах топлива на входе в УБ сводится к вычислению количества газов, выделившихся в результате падения статического давления в потоке жидкости с учетом изменения ее температуры, причем рассматривается только процесс, протекающий в направлении выделения растворенных газов.

Относительная объемная концентрация газовых включений в газожидкостном потоке (относительное объемное газосодержание, в дальнейшем просто газосодержание) определяется как

$$\varphi = \frac{V_z}{V_z + V_{ж}}, \quad (1)$$

где V_z – объем газовых включений, м³;

$V_{ж}$ – объем жидкостной фазы компонентов топлива, м³.

С учетом соотношения

$$V_z = \frac{G_z}{\rho_z}$$

уравнение (1) можно записать в виде

$$\varphi = \frac{G_z}{G_z + V_{ж}\rho_z}, \quad (2)$$

где ρ_z – плотность смеси газов, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Поскольку смесь газов состоит из гелия и азота, уравнение (2) можно представить как

$$\varphi = \frac{G_{He} + G_{N_2}}{G_{He} + G_{N_2} + \frac{V_{ж}}{T} \left(\frac{P_{He}}{R_{He}} + \frac{P_{N_2}}{R_{N_2}} \right)}, \quad (3)$$

где P_{He} , P_{N_2} – парциальное давление гелия и азота соответственно, ата;

R_{He} , R_{N_2} – газовая постоянная гелия и азота соответственно, $\frac{\text{ата} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

T – температура смеси газов, К.

По закону Генри концентрация в кг/м³ растворенного в жидкости газа

$$c = \chi \cdot P, \quad (4)$$

где χ – зависящий от температуры коэффициент Генри, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ата}}$; P – парциальное давление насыщения жидкости газом, ата.

Очевидно, что масса гелия и азота, выделившегося из объема $V_{ж}$ вследствие разности статического давления между входом и выходом магистрали, определяется выражениями:

$$\begin{aligned} G_{He} &= [c_{He \text{ вх}} - c_{He \text{ вых}}] \cdot V_{ж}; \\ G_{N_2} &= [c_{N_2 \text{ вх}} - c_{N_2 \text{ вых}}] \cdot V_{ж}. \end{aligned} \quad (5)$$

После подстановки (5) в (3) получим

$$\begin{aligned} \varphi &= \left[(c_{He} + c_{N_2})_{\text{вх}} - (\chi_{He} P_{He} + \chi_{N_2} P_{N_2})_{\text{вых}} \right] \times T_{\text{вых}} : \\ &: \left(\left[(c_{He} + c_{N_2})_{\text{вх}} - (\chi_{He} P_{He} + \chi_{N_2} P_{N_2})_{\text{вых}} \right] T_{\text{вых}} + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{P_{He}}{R_{He}} + \frac{P_{N_2}}{R_{N_2}} \right) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно из (6), чтобы определить изменение газосодержания в потоке компонента топлива при прохождении его через участок магистрали, необходимо знать концентрацию растворенных газов на входе в участок, а также парциальные давления насыщения этих газов и температуру компонента на выходе (коэффициенты Генри χ_{He} и χ_{N_2} определяются по известной температуре).

Для гелия и азота, содержащихся в газовом включении объема V на выходе участка магистрали, справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} G_{He \text{ вых}} &= \frac{P_{He \text{ вых}} V}{R_{He} T_{\text{вых}}}; \\ G_{N_2 \text{ вых}} &= \frac{P_{N_2 \text{ вых}} V}{R_{N_2} T_{\text{вых}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Кроме того, по закону Дальтона парциальное давление смеси газов

$$P_{см \text{ вых}} = P_{He \text{ вых}} + P_{N_2 \text{ вых}}. \quad (8)$$

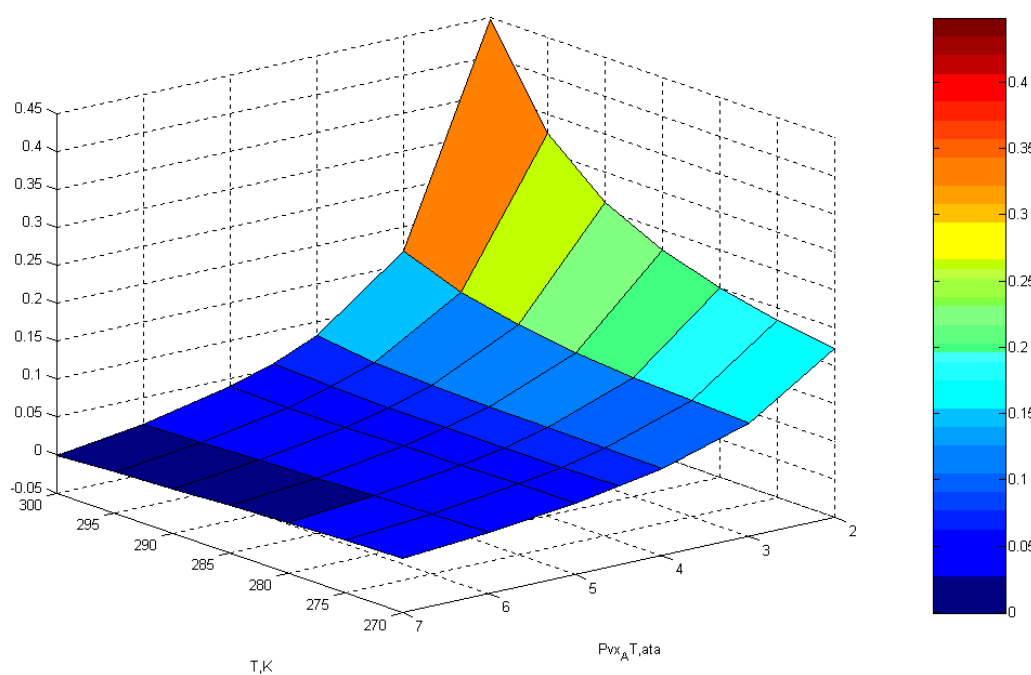


Рис. 1. График изменения несплошности потока АТ в зависимости от температуры и давления

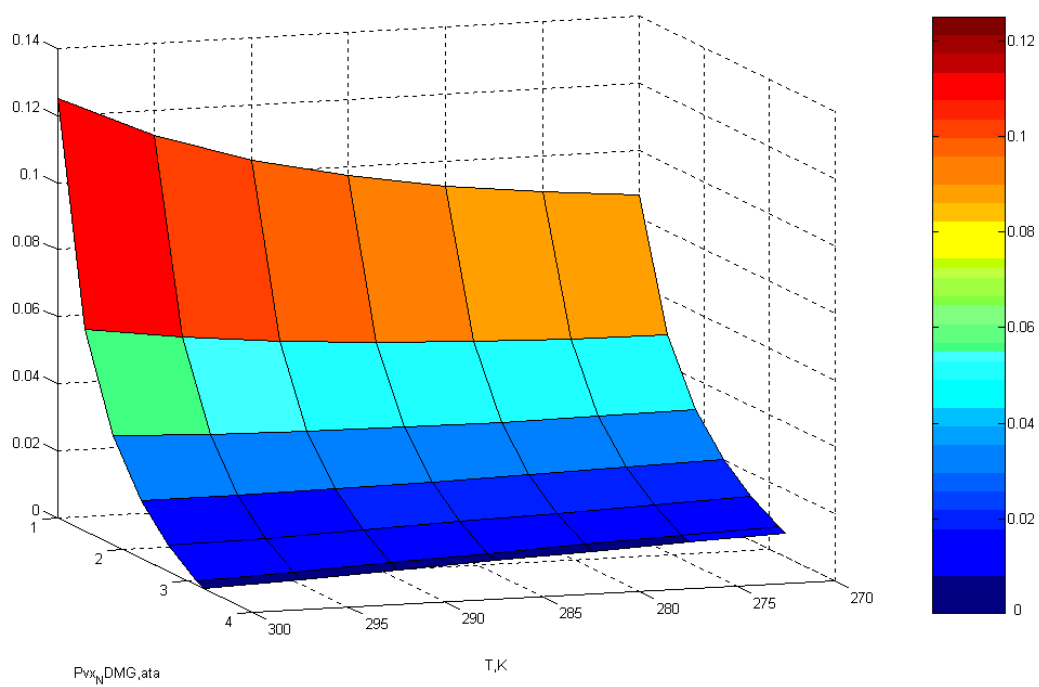


Рис. 2. График изменения несплошности потока НДМГ в зависимости от температуры и давления

В соответствии с (4) концентрация растворенного газа связана с его парциальным давлением над раствором

$$\begin{aligned} c_{He\text{ вых}} &= (\chi_{He} P_{He})_{\text{вых}}; \\ c_{N_2\text{ вых}} &= (\chi_{N_2} P_{N_2})_{\text{вых}}. \end{aligned} \quad (9)$$

После преобразования уравнений (5), (7), (8) и (9) получается выражение, позволяющее вычислить парциальное давление гелия в газовом включении на выходе из магистрали

$$A \cdot P_{He\text{ вых}}^2 + B \cdot P_{He\text{ вых}} + C = 0, \quad (10)$$

где

$$A = \chi_{He\text{ вых}} \frac{R_{He}}{R_{N_2}} - \chi_{N_2\text{ вых}}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B = & P_{см\text{ вых}} \cdot \chi_{N_2\text{ вых}} - c_{N_2\text{ вх}} - \\ & - c_{He\text{ вх}} \frac{R_{He}}{R_{N_2}} - P_{см\text{ вых}} \cdot \chi_{He\text{ вых}} \frac{R_{He}}{R_{N_2}}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$C = P_{см\text{ вых}} c_{He\text{ вх}} \frac{R_{He}}{R_{N_2}}. \quad (13)$$

Из уравнений (8) и (10)

$$\begin{aligned} P_{He\text{ вых}} &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \\ P_{N_2\text{ вых}} &= P_{см\text{ вых}} - P_{He\text{ вых}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Парциальное давление смеси газов вычисляется по уравнению

$$P_{см\text{ вых}} = P_{вх} - \Delta P_m - P_{s\text{ вых}}, \quad (16)$$

где $P_{вх}$ – давление компонента на входе в магистраль, ата;

ΔP_m – потери давления в магистрали, ата;

$P_{s\text{ вых}}$ – давление насыщенного пара компонента на выходе магистрали, ата.

Были проведены расчеты для компонентов топлива АТ и НДМГ для диапазонов температуры от 270 до 300 К, давления от 2 до 7 ата и 1 до 3,25 ата соответственно.

Концентрация гелия в компонентах 0,059 кг/м³ и 0,012 кг/м³ для АТ и НДМГ соответственно.

Концентрация азота 0,04 кг/м³ для обоих компонентов. Потери давления в магистралях 0,2 ата по тракту окислителя и 0,17 ата по тракту горючего. Результаты в виде графиков показаны на рис. 1 и 2.

Из графиков видно, что чем выше давление, тем менее на несплошность потока оказывает влияние изменение температуры, при определенном давлении несплошность практически от температуры не изменяется (для АТ – 6 ата и более, для НДМГ – 2 ата и более) для данного диапазона температур. Также заметно, что при высоких давлениях (7 ата для АТ и 3,25 ата для НДМГ) при понижении температуры несплошность уменьшается, при понижении давления несплошность потока при увеличении температуры начинает расти. Это обусловлено характерным изменением коэффициентов Генри для рассматриваемых веществ.

Заключение

На основе анализа массообменных процессов в жидкости, насыщенной двумя газами, была разработана математическая модель образования несплошности в потоке жидкости, позволяющая определять газосодержание в компонентах топлива (в данном случае это АТ и НДМГ) в зависимости от изменения температуры и давления.

Литература

1. Ермашkevич В.Н. Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на четырехокси азота / Под ред. Л.Л. Васильева. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 344 с.

Поступила в редакцию 12.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.

