

Л. С. Ощепков, аспирант;

Б. Ф. Потапов, кандидат технических наук, доцент
Пермский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ПАРОГАЗОГЕНЕРАТОРА

Проведено моделирование процессов в камере смешения твердотопливного парогазогенератора. Для решения использован программный комплекс Flow Vision 2.5. Получены распределения температуры парогазовой смеси, концентрации жидкости и поля скоростей при подаче воды через радиальные и тангенциальные форсунки для камер смешения ПГГ, имеющих различные размеры. Показано, что радиальная подача воды обеспечивает уменьшение длины пути испарения воды, а применение тангенциальных форсунок снижает тепловой поток в стенку камеры смешения.

Ключевые слова: парогенератор, камера смешения, инжектор, газовая смесь

Для катапультирования летательных аппаратов различных классов наиболее экономичным с точки зрения затрат топлива является минометный способ, который заключается в использовании газогенератора на твердом топливе. Недостатком этого способа является то, что продукты сгорания твердого топлива имеют достаточно высокую температуру (1 300–3 500) К, такая температура оказывает отрицательное влияние на несущую поверхность летательного аппарата. Для уменьшения температуры газа и увеличения его работоспособности в него добавляют воду, получая парогаз – смесь продуктов сгорания твердого топлива с перегретым паром [1]. Таким образом, вместо газогенератора в качестве энергоузла старта предлагается парогазогенератор (ПГГ).

В рамках технологий двойного назначения парогаз используется в системах пожаротушения [2, 3], например, известны гидроимпульсные системы пожаротушения (ГИРС), действие которых основано на принципе выброса и диспергирования жидкости с высокой скоростью под воздействием продуктов сгорания порохового заряда.

Парогаз может быть использован также в качестве окислителя для двигателей космических аппаратов, использующих в качестве горючего порошки металлов, так как водяной пар существенно увеличивает скорость горения металлов по сравнению с воздухом [4].

Парогазогенератор любого назначения включает три основных узла: газогенератор, емкость с водой и камеру смешения. Одна из возможных конструктивных схем, в которой указанные узлы расположены последовательно, показана на рис. 1. При запуске твердотопливного газогенератора 1 основная часть продуктов сгорания через его критическое сечение 7 поступает в камеру смешения 5. Меньшая часть продуктов сгорания через отверстия наддува 2 поступает в емкость с водой 3 с целью ее вытеснения в камеру смешения через форсунки 4. Для стабилизации процесса подачи воды (исключения перемешивания продуктов сгорания с водой в емкости 3) служит отражатель 8. Парогаз с заданными термодинамическими параметрами подается потребителю через выхлопную трубу 6.

Численное моделирование ПГГ с применением нульмерной нестационарной термодинамической модели [5] позволило рассчитать параметры состояния (давление и температуру) в трех основных его частях: газогенераторе, емкости с водой и камере смешения.

Одним из основных узлов парогазогенератора является камера смешения, где происходит впрыск, испарение воды и образование парогаса. От конструкции узла впрыска воды и организации ее смешения с продуктами сгорания топлива зависят размеры камеры смешения, а следовательно, массогабаритные параметры ПГГ различного назначения.

Для численного исследования процессов, происходящих при впрыске жидкости в поток горячего газа через радиальные и тангенциальные форсунки выбран программный комплекс Flow Vision 2.5, который предназначен для решения трехмерных гидро- и газодинамических задач, с учетом процессов тепло- и массопереноса, в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха.

При расчетах использована математическая модель «слабосжимаемая жидкость» совместно с моделью «частицы». Математическая модель тепло- и массопереноса включает в себя следующую систему дифференциальных уравнений [6]:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g V_g) = Q_{mass}^p;$$

– уравнение сохранения массы для парогаса

$$\frac{\partial(\rho_g Y_1)}{\partial t} + \nabla(\rho_g V_g Y_1) = \nabla \left(\left(\rho_g D_1 + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_1 \right) + Q_{mass}^p;$$

– турбулентное число Шмидта полагается равным 1:

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho_g D_t} = 1;$$

– массовая концентрация вещества 0 находится из условия

$$Y_0 + Y_1 = 1;$$

– уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho_g V_g)}{\partial t} + \nabla(\rho_g V_g \otimes V_g) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho_g g + \bar{Q}_{mom}^p,$$

где $\tau_{g,\alpha\beta} = -\frac{2}{3} \rho_g k_g \delta_{\alpha\beta} + \mu_{g,eff} \left(\frac{\partial V_{g,\beta}}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial V_{g,\alpha}}{\partial x_\beta} \right) - \frac{2}{3} \mu_{g,eff} \frac{\partial V_{g,\gamma}}{\partial x_\gamma} \delta_{\alpha\beta};$

– эффективная вязкость

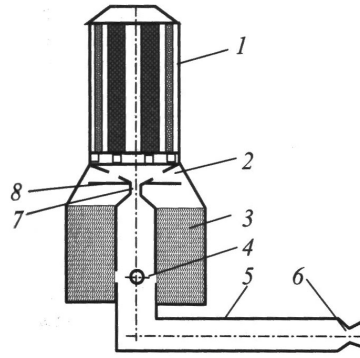


Рис. 1. Схема парогазогенератора:
1 – газогенератор; 2 – отверстия наддува; 3 – емкость с водой; 4 – форсунки; 5 – камера смешения; 6 – выхлопная труба; 7 – критическое сечение сопла ГГ; 8 – отражатель

$$\mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_t;$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho_g h_g(T_g))}{\partial t} + \nabla(\rho_g V_g h_g(T_g)) = \nabla \left\{ - \left[- \left(\frac{\lambda_g}{Cp_g} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h_g(T_g) \right] \right\} + Q_{enth}^p;$$

– турбулентное число Прандтля полагается равным единице

$$Pr_t = \frac{\mu_t Cp_g}{\lambda_t} = 1.$$

Предполагается взаимное влияние фаз, т. е. несущая фаза определяет траектории частиц, частицы, в свою очередь, оказывают влияние на течение через источники массы, импульса (т. е. силу, действующую на несущую фазу) и энергии [6]. Источники рассчитываются следующим образом.

Источник массы:

$$Q_{mass}^p = Q_{vapor}^p = \sum_{j=trajectories} (m_{p,in} - m_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}.$$

Источник импульса:

$$Q_{mom}^p = - \sum \frac{\pi r_p^2}{2} C_{Dj} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}.$$

Источник энтальпии:

$$Q_{mass}^p = \sum_{j=trajectories} (m_{p,in} h_{p,in} - m_{p,out} h_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}.$$

Начальные условия:

- давление в камере смешения $P_0 = 101\,000$ Па;
- температура в камере смешения $T = 298$ К.

Граничные условия:

- круглая стенка с логарифмическим законом изменения скорости в турбулентном пограничном слое;
- на входе заданы скорости потоков газа и жидкости;
- выход свободный с нулевым избыточным давлением на границе.

Камера смешения представляет цилиндрический канал, по которому движется горячий газ с температурой T_0 и средней скоростью V_0 . На расстоянии, равном $\frac{1}{2}$ диаметра канала, расположены форсунки, через которые подается вода, имеющая температуру T_1 и скорость V_1 . Рассмотрены радиальные и тангенциальные форсунки. Варианты расчетов представлены в таблице.

Таблица. Варианты численных экспериментов

Варианты расчетов	1	2
Расход воды, кг/с	0,275	0,275
Расход газа, кг/с	0,4	0,4
Давление на входе, МПа	13	13
Давление в трубе, МПа	7	7
Диаметр камеры смешения, мм (D)	30	30
Диаметр форсунки, мм (d)	2	2
Длина трубы смешения, мм (l)	300	300
Расположение форсунок	радиальное	тангенциальное

В результате моделирования получены поля скоростей, температур, концентраций и давлений по длине камеры смешения; определены зоны смешения воды с продуктами сгорания и ее испарения для двух типов форсунок.

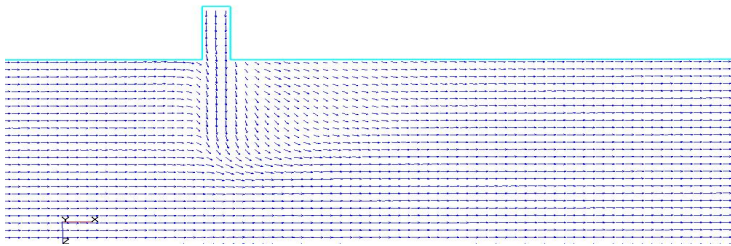


Рис. 2. Векторное поле скоростей при подаче воды через радиальные форсунки

Применение радиальных струйных форсунок обеспечивает проникание воды в ядро потока газа, что приводит к уменьшению длины участка испарения.

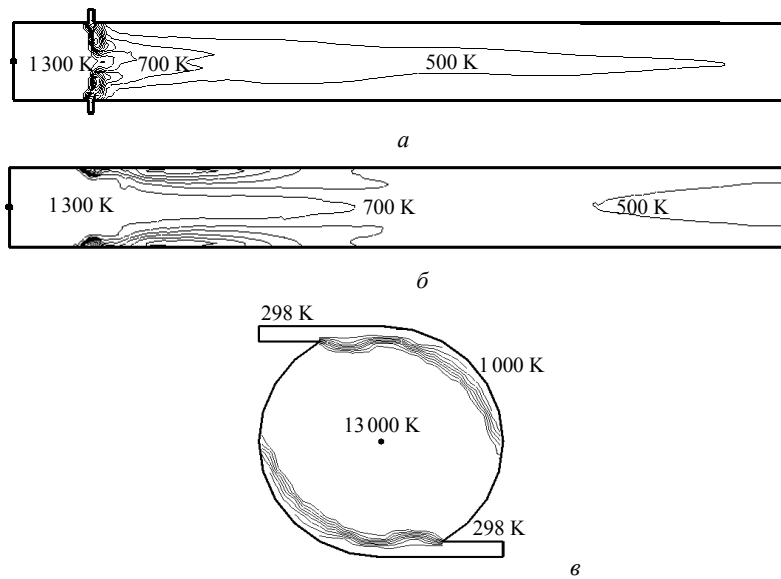


Рис. 3. Поле температур: а – вариант 1; б – вариант 2; в – поперечный разрез в плоскости форсунок

При тангенциальном впрыске жидкость сосредотачивается в пристенной зоне, а испарение происходит более медленно. Таким образом, тангенциальный впрыск приводит к уменьшению тепловых потерь в стенку.

На рис. 4, 5 показаны графики температуры и концентрации вдоль оси камеры смешения, для всех вариантов расчетов.

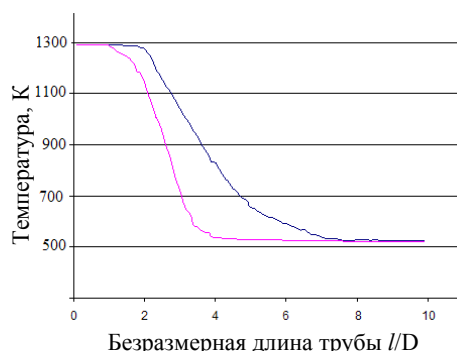


Рис. 4. Температура в камере смешения

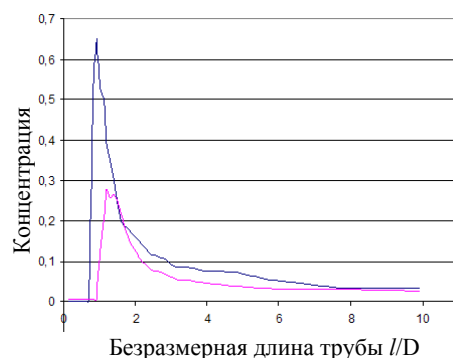


Рис. 5. Концентрация жидкой фазы в камере смешения

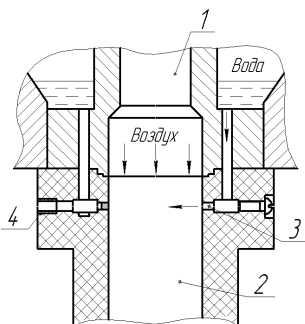


Рис. 6. Схема узла смешения:
1 – газогенератор; 2 – камера смешения;
3 – форсунка; 4 – канал для измерения давления

Из графиков видно, что при тангенциальной подаче жидкости в камеру смешения концентрация жидкой фазы меньше, чем при радиальном впрыске, это обусловлено скоростью парообразования.

Проведены эксперименты, позволившие проверить расчетную траекторию струи воды при ее радиальной подаче в потоке газа. Использовалась прозрачная труба из оргстекла, через которую продувался воздух и через радиальную форсунку впрыскивалась подкрашенная вода. Процесс развития струи фиксировался с помощью скоростной киносъемки и фотографировался. Конструкция узла впрыска воды показана на рис. 6.

Расчетная и опытная траектории струи воды показаны на рис. 7.

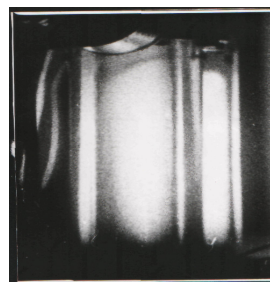
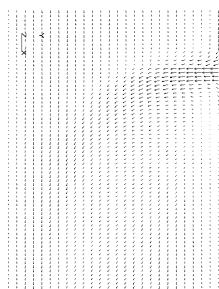


Рис. 7. Расчетная и опытная траектории струи воды:
а – векторное поле скоростей – расчет; б – траектория струи воды – эксперимент

Выводы:

- программа Flow Vision 2.5 и ее математическое ядро позволяют моделировать процессы в камере смешения парогазогенераторов различного назначения;
- распределение средних по сечению камеры смешения температур и концентраций показало, что при одних и тех же конструктивных параметрах применение тангенциального впрыска увеличивает длину зоны парообразования;
- тангенциальная подача жидкости обеспечивает более низкую температуру двухфазного потока, а далее парагаза в пристенном слое, что, вероятно, снижает тепловые потери в стенку камеры смешения;
- в результате обработки результатов моделирования получены соотношения относительных размеров камеры смешения, позволяющие проектировать ПГТ с ограниченными массогабаритными параметрами.

Список литературы

1. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе / В. И. Петренко, М. И. Соколовский, Г. А. Зыков и др. ; под общ. ред. М. И. Соколовского и В. И. Петренко. – М. : Машиностроение, 2003. – 464 с.
2. Пороха, топлива, заряды / В. Н. Аликин, А. М. Липанов, С. Ю. Серебренников и др. – М. : Химия, 2004. – Т. 2 : Заряды народнохозяйственного назначения. – 2004. – 202 с.
3. Жегров Е. Ф., Милехин Ю. М., Берковская Е. В. Технология порохов и твердых ракетных топлив в приложении к конверсионным программам / ФГУП «Федерал. центр двойных технологий „Союз“». – М. : Архитектура-С, 2006. – 392 с.
4. Малинин В. И., Потанов Б. Ф. Ракетные двигатели космических аппаратов на топливных компонентах: ТРТ – вода – порошкообразный алюминий // Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники, 2007. – Т. 2. – С. 427–430.
5. Ощепков Л. С., Потанов Б. Ф. Моделирование внутрибаллистических параметров парогазогенератора // Вестн. Перм. гос. техн. ун-та. Аэрокосм. техника. – 2006. – № 26. – С. 59–62.
6. Система моделирования движения жидкости и газа Flow Vision 2.05.04 : справоч. пособие. – М. : Тесис, 2008.

* * *

L. S. Oshchepkov, Postgraduate, Perm State Technical University

B. F. Potanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Perm State Technical University

Simulation of Processes in Mixing Chamber of Solid-Propellant Steam-Gas Generator

Simulation of processes in a mixing chamber of a solid-propellant steam-gas generator with use of Flow Vision 2.5. bundled software is performed. The distributions of gas-vapor mixture temperature, liquid concentration and velocity fields at water feed through radial and tangential mixing chamber injectors of different sizes were received. It was shown that the radial water feed provides decrease of water expulsion length, and the tangential injectors decrease the heat flow into the mixing chamber walls.

Keywords: steam-gas generator, mixing chamber, bottom-feed injector, gas-vapor mixture

Получено 09.04.10