

основные уравнения данного процесса, найден поток жидкости с единицы площади. Но в ходе данного исследования не было проведено экспериментальные моделирование для подтверждения результатов теоретического исследования.

Итак, применение рассмотренных способов газификации жидкости актуально для удаления остатков топлива из баков отработавших ступеней ракет-носителей. Но их также можно использовать и для осушки баков ракет на этапе их производства.

Таким образом, для газификации остатков жидкости в баке ракеты (как при производстве, так и при эксплуатации) возможно применение следующих способов:

- сушка бака с помощью вихревой трубы: вакуумная или продуванием сухим горячим воздухом;
- газификация жидкости при конвективном воздействии потока горячего газа-теплоносителя;
- газификация жидкости при воздействии потока ТН и ультразвука;
- газификация жидкости при конвективном воздействии (поток ТН) и воздействии излучением (при нагреве самого поддона с жидкостью);
- испарение жидкости при термовакuumном воздействии.

В дальнейших работах планируется установить метод газификации жидкости, наиболее подходящий для решения проблемы сушки баков ракет в процессе их производства.

Библиографический список

1. Пешкова Е.А., Прусова О.Л. Возможность использования вихревых труб для сушки баков ракет // Аэрокосмическая декада: материалы X Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара. М.: Изд-во «Доброе слово», 2017. – С. 39-41.

2. Пешкова Е.А., Прусова О.Л. Проблемы применения вихревых труб для осушки топливных баков ракет // Старт-2017: Тезисы докладов III Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2017. – С.11.

3. Пат. 2461890 Российская Федерация, МПК G09B23/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива в баках отделяющейся части ступени ракеты-носителя и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Лесняк И. Ю. и др. Опубликовано: 20.09.2012 Бюл. № 26.

4. Лесняк И.Ю. Теоретико-экспериментальные исследования процесса газификации жидкости // материалы VIII Всероссийской научной конференции «Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли», посвященной памяти главного конструктора ПО "Полёт" А.С. Клинышкова. Омск: ОмГТУ, 2013. – С. 109-113.

5. Пат. 2474816 Российская Федерация, МПК7 G01N29/02, B64G7/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Лесняк И. Ю. и др. Опубликовано: 10.02.2013 Бюл. № 4.

6. Trushlyakov, V. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume / V. Trushlyakov, S. Lavruk // Acta Astronautica. – 2015. – № 109. – P. 241–247.

7. Слёзнов В.В., Кутовой В.А., Николайчук Л.И. К теории испарения воды при термовакuumной сушке // Пром.теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 5. – С. 54-58.

УДК 621.45.035.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОДВОДА В СОПЛОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Э. И. Погоня, Н. А. Брыков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Исследование нестационарного подвода энергии в потоки газа является актуальным направлением развития аэрогазодинамики. Влияние энергоподвода на обтекание летательных аппаратов может приводить к снижению волнового сопротивления, изменению подъемной силы и аэродинамических моментов, а также к местному перестроению ударно-волновой структуры, поверхностного трения, пиков давления и тепловых потоков в окрестности отдельных элементов [1]. Нестационарный локализованный энергоподвод применяется для управления течением в каналах, соплах, воздухозаборниках, в камерах сгорания для интенсификации процессов смешения и стабилизации горения. Подобный принцип воздействия на поток возникает в плазмотронах переменного тока, высоковольтных выключателях грозовой защиты и в других технических

устройствах. Проблема изучения сверхзвуковых внутренних течений с интенсивным импульсно-периодическим подводом энергии связывается также с созданием газодинамических силовых установок, в частности, лазерных ракетных двигателей.

Нестационарное течение невязкого сжимаемого газа описывается уравнениями Эйлера, в одномерном приближении данная система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(S(x,t)U) + \frac{\partial}{\partial x}(S(x,t)F) = G, \quad (1)$$

где $S(x,t)$ – площадь поперечного сечения; U, F, G – вектора переменных и источникового члена, которые можно определить как:

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho E + p)u \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ p \frac{dS}{dx} \\ 0 \end{pmatrix},$$

где ρ – плотность; u – скорость газа; p – давление; E – полная энергия единицы массы. Систему газовой динамики (1) необходимо дополнить уравнением состояния: $p = (\gamma - 1)(\rho E - \rho u^2 / 2)$, где γ –

показатель адиабаты. Ненулевой источниковый член G в уравнении импульсов обусловлен воздействием стенок канала на газ. Для численного решения системы (1) используется метод Годунова, основанный на технологии контрольного объема с вычислением потоков по схеме распада разрыва.

В расчетах для идеального совершенного газа чаще всего используются упрощенные модели энергоподвода, из наиболее популярных можно выделить Т-модель и Q-модель [2]. Т-модель предполагает мгновенный энергоподвод в сферическую или эллипсоидальную область канала, тогда как Q-модель позволяет анализировать влияние нестационарного импульсно-периодического подвода энергии определённой продолжительности и частоты. Также интересным для исследований представляется подвод энергии в поток за счет движения и выгорания частиц твердого топлива

Т-модель – наиболее упрощенная модель описания мгновенного энергоподвода. Подвод энергии задается распределением температуры в начальный момент времени, которое для источника в виде эллипсоида с центром в точке (x_0, y_0) и размерами полуосей R_x и R_y определяется соотношением:

$$T(x, y) = T_\infty + \Delta T_0 \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{kR_x} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{kR_y} \right)^2 \right],$$

где T_∞ – температура окружающего газа или набегающего потока, $\Delta T_0 = T_0 - T_\infty$ – приращение температуры в центре зоны энергоподвода. Чем меньше параметр $0,5 \leq k \leq 1$, тем меньше разрыв газодинамических параметров на границе зоны энергоподвода. Значение определяющего параметра модели $\Delta T_0 = E_A / \rho_\infty c_V I$, где E_A – поглощенная средой энергия, ρ_∞ – плотность газа в набегающем потоке, c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, а значение интеграла

$$I = \int_{V_0} \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{kR_x} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{kR_y} \right)^2 \right] dV$$

определяется численно. Как видно, Т-модель позволяет моделировать только единичный импульс энергоподвода и при этом никак не учитывает его продолжительность.

Q-модель позволяет анализировать влияние нестационарного, одиночного и импульсно-периодического подводов энергии различной продолжительности τ и частоты f_0 . Для q-модели источниковый член в уравнении сохранения энергии G системы (1) не нулевой, и имеет следующий

вид: $G = (0 \quad p \, dS/dx \quad \rho q)$, где q – подводимая удельная мощность (в единицу массы) в область в виде эллипсоида с центром в точке (x_0, y_0) и размерами полуосей R_x и R_y определяется формулой:

$$q(x, y, t) = q_0 f(t) \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{kR_x} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{kR_y} \right)^2 \right],$$

где q_0 – удельная мощность энергоподвода в центре энергоисточника, параметр $0,5 \leq k \leq 1$, определяет значения q на границе области энергоподвода. Определяющий параметр модели q_0 находится по соотношению $q_0 = E_A / (\rho_\infty I \tau)$.

В качестве объекта исследования выбрано профилированное сопло Лавая (рис. 1), давление и температура в ресивере $p_0 = 41$ атм, $T_0 = 2000$ К, газ – воздух. Вертикальными пунктирными линиями показаны сечения, в которых осуществляется энергоподвод ($x = -0,013$ м, $x = 0,013$ м).

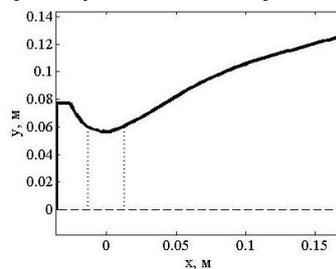


Рис. 1. Вид соплового канала

На рис.2 – рис.5 представлены результаты численного моделирования по влиянию нестационарного энергоподвода в дозвуковую и сверхзвуковую области соплового канала на течение газа и параметры двигательной установки.

Рассмотрим влияние единичного импульсного подвода энергии в дозвуковую область. В качестве математической модели выберем q-модель. Результаты исследований изменений газодинамических параметров в дозвуковой части приведены на рис.2 – 3.

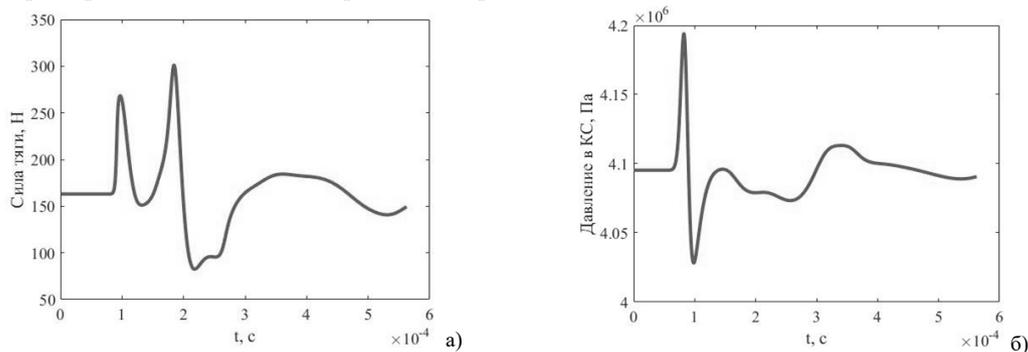


Рисунок 2 – Влияние энергоподвода в дозвуковой части ($x = -0,013$ м) на изменение силы тяги (а), на изменение давления в камере сгорания (б)

На рис. 2а представлено влияние энергоподвода на изменение силы тяги $F_m = v_a \rho_a S_a$ (параметры с индексом «а» соответствует выходному сечению сопла). На рис. 2б отображено изменение давления в ресивере, распространение возмущения от энергоподвода в противоположную сторону от течения газа.

Влияние энергоподвода в дозвуковой области соплового канала на газодинамические характеристики течения отображены на рис. 3: локальное изменение плотности (рис. 3а) и числа Маха

(рис. 3б). Здесь и далее каждая линия на графике соответствует своему времени, шаг по времени между кривыми одинаковый. Видно распространение возмущения как по потоку, так и против потока. По кривым числа Маха можно судить об частичном ускорении потока

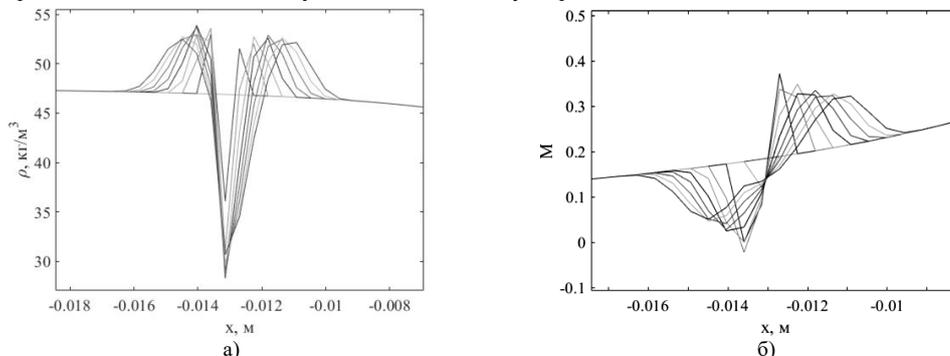


Рисунок 3 – Влияние энергоподвода в дозвуковой части сопла ($x=-0,013$ м) на локальное изменение плотности (а), на локальное изменение числа Маха (б)

Влияние единичного импульсного подвода энергии в сверхзвуковую область соплового канала приведено на рис. 4 – 5. В качестве математической модели выбрана q-модель с теми же параметрами, что и в предыдущем расчёте.

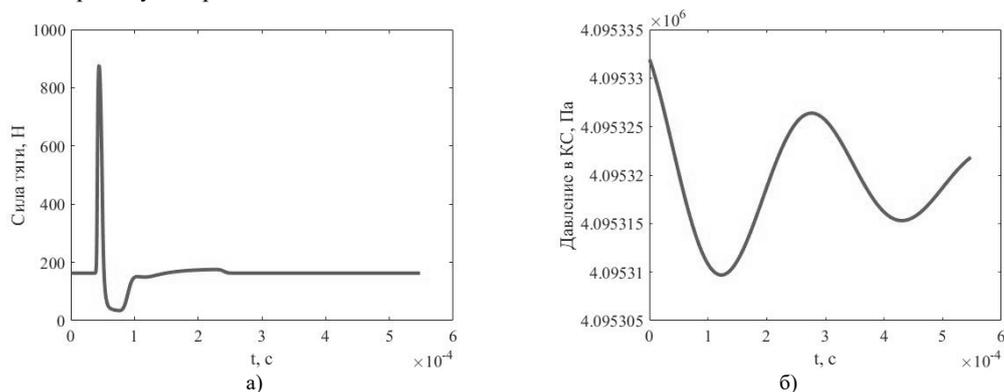


Рисунок 4 – Влияние энергоподвода в сверхзвуковой части сопла ($x=0,013$ м) на изменение силы тяги (а), на изменение давления в камере сгорания (б)

На рис. 4а представлено влияние энергоподвода на изменение силы тяги F_m , после практически скачкообразного увеличения тяги, данный параметр достаточно быстро приходит к своему рабочему значению. На рис. 4б отображено изменение давления в ресивере. За счет близкого расположения сечения энергоподвода к дозвуковой области и локальному замедлению потока при энергоподводе до чисел Маха меньше 1 (рис. 5б) возмущение оказывает влияние на параметры газа в ресивере. Однако амплитуда изменения давления мала и составляет по порядку $1e-3$ атм.

Рис. 5 посвящен влиянию энергоподвода в сверхзвуковой области сопла на газодинамические характеристики течения. В частности, на рис. 5а представлено изменение плотности потока, а на рис. 5б – числа Маха.

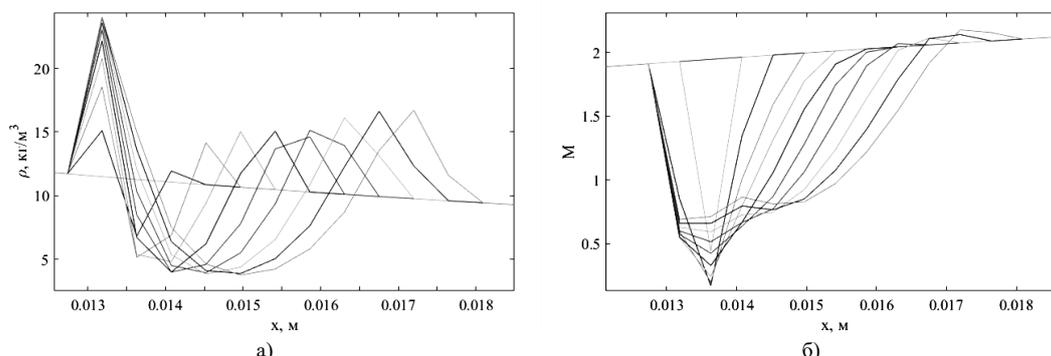


Рисунок 5 – Влияние энергоподвода в сверхзвуковой части сопла ($x=0,013$ м) на локальное изменение плотности (а), на локальное изменение числа Маха (б)

Заключение.

Энергоподвод в дозвуковую область соплового канала значительно изменяет структуру течения. Возмущения распространяются в обе стороны, как по потоку, так и против него, поэтому происходит существенное изменение как давления в ресивере, так и параметров потока на выходном сечении, что приводит к изменению силы тяги.

Энергоподвод в сверхзвуковую область сопла также приводит к значительному изменению параметров потока на выходном сечении и, соответственно, силы тяги. В связи с тем, что сечение энергоподвода расположено близко к дозвуковой области сопла, возмущения от подвода энергии в поток влияют на параметры газа в ресивере, однако данное влияние настолько мало, что им можно пренебречь.

Библиографический список

1. Желтоводов А.А., Пимонов Е.А. Численное моделирование развития зоны энергоподвода в покоящейся воздушной среде и в сверхзвуковом потоке при взаимодействии с прямым скачком. – Журнал технической физики, том 83, вып. 2. – 2013 г.
2. Брыков Н.А., Волков К.Н., Емельянов В.Н., Тетерина И.В. Течения идеального и реального газа в каналах переменного сечения с нестационарным локализованным подводом энергии. Выч. мет. программирование, том 18, вып. 1. – 2017 г. 20–40 стр.

УДК

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В КИСЛОРОДНО-КЕРОСИНОВОМ ВГГ ЖРД

А. Ю. Попов. Ю. В. Анискевич

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Горение углеводородных топлив обычно сопровождается образованием частиц сажи. Процесс сажеобразования – это сложное явление, которое объединяет несколько химических и физических процессов, таких как гомогенная нуклеация зародышей частиц сажи в газовой фазе, поверхностный рост частиц сажи в реакциях с активными частицами газовой фазы, происходящий одновременно с коагуляцией частиц сажи, что негативно влияет на работу газогенератора.

В основе сажеобразования лежит склонность атомов углерода образовывать при высокой температуре в газовой фазе разнообразные кластеры. Если пары любого элемента периодической системы, находящиеся при температурах выше 1000 К в равновесии со своей твердой фазой, состоят преимущественно из мономеров (атомов) и димеров, то углерод, находящийся в равновесии с газовой фазой, при температурах свыше тысячи градусов содержит не только димеры и тримеры, но и кластеры размером $10 < n < 30$ частиц. Только углерод, в отличие от других тугоплавких элементов, способен образовывать столь прочные кластеры, которые могут существовать в газовой фазе вплоть до температур 3000–4000 К. Было установлено, что в пламенах размеры частиц сажи в зависимости от условий организации сжигания топлив могут изменяться приблизительно в пределах от 1 до 1000 нм.