

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫТЕСНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА НА ГОРЯЧЕМ ГАЗЕ

© 2016

В. Л. Салич кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела перспективных разработок, Научно-исследовательский институт машиностроения, г. Нижняя Салда, salich_vas@mail.ru; mail@niimashspace.ru

Рассматриваются вопросы улучшения массогабаритных характеристик двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями малой тяги за счёт замены традиционных газобаллонных систем на системы с горячим газом, для выработки которого используется газогенератор, работающий на основных компонентах топлива. Обсуждаются возможные алгоритмы работы такой системы подачи. С целью расчётно-теоретических исследований разработана математическая модель рабочих процессов в рассматриваемой системе подачи. Каждый агрегат системы представлен как объём с сосредоточенными параметрами, для которого записаны уравнения изменения массы, внутренней энергии и концентрации продуктов сгорания и добавлено дифференциальное уравнение изменения температуры конструкции агрегата. Уравнения изменения массы и внутренней энергии преобразуются в уравнения изменения давления и температуры. Модель замыкается зависимостями, определяющими массовые расходы между агрегатами системы, зависимостями теплофизических параметров от температуры, концентрации продуктов сгорания и соотношения компонентов топлива в газогенераторе, зависимостями по теплообмену. В качестве начальных условий задаются температура, давление и концентрация продуктов сгорания в агрегатах системы, температура конструкции агрегатов. Результаты моделирования показали удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, что позволяет использовать разработанную модель для расчётно-теоретических исследований вытеснительных систем подачи топлива на горячем газе.

Двигательная установка; система подачи топлива; газогенератор; математическое моделирование.

Цитирование: Салич В.Л. Моделирование рабочего процесса вытеснительной системы подачи топлива на горячем газе // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 133-142. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-133-142

В двигательных установках (ДУ) с жидкостными ракетными двигателями малой тяги (ЖРДМТ) используют, в основном, вытеснительные системы подачи топлива (ВСПТ), к преимуществам которых, в сравнении с турбонасосными системами, относятся простота конструкции, отсутствие вращающихся элементов, простота запуска и останова. Наибольшее распространение в созданных к настоящему времени ДУ получили ВСПТ на холодном газе (газобаллонные системы) [1; 2], наиболее легко обеспечивающие многочисленные циклы работы ДУ. Однако с уменьшением размерности ДУ возрастают относительные габариты и масса таких ВСПТ. Улучшить массогабаритные характеристики ДУ возможно за счёт применения ВСПТ на горячем газе.

В работе исследовалась возможность применения в ВСПТ ДУ ЖРДМТ восстановительного газогенератора на топливе АТ+НДМГ. Предполагается, что облик такой ВСПТ будет включать в себя аккумулятор давления, газогенератор, газоводы, соединяющие газогенератор с аккумулятором давления, и аккумулятор давления с топливными баками. Работа ВСПТ осуществляется следующим образом. Газ, находящийся в газовых объёмах (аккумулятор давления, газоводы, полости наддува топливных баков), обеспечивает подачу компонентов топлива на вход в ЖРДМТ. В процессе выработки топлива происходит падение давления газа. При достижении нижнего порога давления включается газогенератор. Отключение газогенератора может производиться либо при

достижении установленного верхнего порога давления газа, либо через заданное время работы (длительность команды на включение), гарантирующее исключение «передува». После падения давления газа в результате выработки топлива до нижнего предельного значения осуществляется следующее включение газогенератора. Циклы продолжают до полной выработки топлива. Стабильность выходных параметров ЖРДМТ в диапазоне входного давления может обеспечиваться, например, либо стабилизаторами расхода, входящими в состав ЖРДМТ [1; 2], либо другими элементами автоматики.

Система питания газогенератора может представлять собой, например, либо автономную ВСПТ на холодном газе, либо систему с вытеснением топлива продуктами сгорания газогенератора с использованием мультипликаторов (схема ДУ с мультипликатором представлена в [3]).

Экспериментальные исследования по возможности использования вышеописанной ВСПТ в ДУ с суммарным объёмом топливных баков 20 л проводилось в [4] на имитаторе системы наддува (ИСН), схема которого представлена на рис. 1. Поскольку объёмное соотношение компонентов топлива для ЖРДМТ составляет единицу, то суммарный объём полостей наддува баков горючего и окислителя имитировался одной вытеснительной ёмкостью. В процессе экспериментов была показана принципиальная возможность реализации ВСПТ на горячем газе.

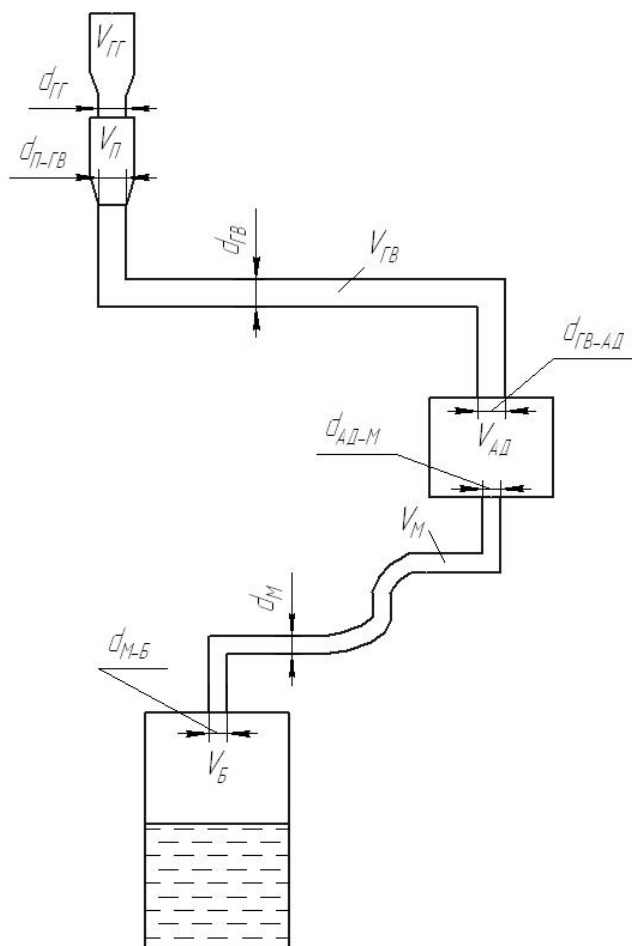


Рис. 1. Расчётная схема имитатора: V – объём, d – внутренний диаметр. Индексы: ГГ – газогенератор, ГВ – газовод, П – переходник АД –аккумулятор давления, М – магистраль, Б – бак. Нижние индексы у внутренних диаметров в виде обозначений двух агрегатов через тире обозначают, что эти диаметры приняты при определении расходов рабочего тела между указанными агрегатами

Важным этапом является выбор оптимального алгоритма управления, обеспечивающего включение и выключение газогенератора. Значительно сократить материальные и временные затраты при создании такой ДУ должны результаты математического моделирования. Наиболее простыми являются модели с сосредоточенными параметрами («нульмерные» модели), широко применяющиеся для расчётно-теоретического исследования различных технических систем. С модели такого уровня целесообразно начать описание процессов в рассматриваемой системе наддува. Необходимость использования моделей более высокого уровня должна определиться по результатам верификации. Значительные отличия продольных и поперечных размеров газоведа и магистрали, а также высокие скорости газа в данных агрегатах ставят под сомнение правомерность применения для них нульмерной модели. Однако в связи с тем, что объёмы аккумулятора давления и бака существенно превосходят объёмы газоведа и магистрали, можно рассчитывать на получение результатов расчёта с приемлемой точностью.

Для описания рабочих процессов представим каждый из агрегатов имитатора как рабочий объём V (рис. 2).

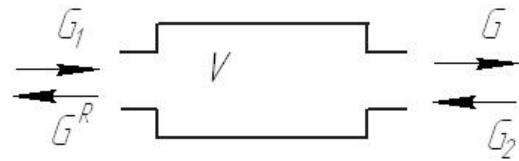


Рис 2. Схема к выводу дифференциальных уравнений

При этом индексом «1» обозначим параметры в агрегате, расположенном «выше по течению» (направление течения считаем от газогенератора); индексом «2» – параметры в агрегате, расположенном «ниже по течению». G_1 – расход рабочего

тела, поступающий в рассматриваемый объём из агрегата, расположенного «выше по течению»; G – расход рабочего тела из рассматриваемого объёма в агрегат, расположенный «ниже по течению»; G_2 – расход рабочего тела из агрегата, расположенного «ниже по течению», в рассматриваемый объём (такой расход может быть обусловлен, например, падением давления в агрегате, расположенном «выше по течению», за счёт теплообмена с элементами конструкции при выключенном газогенераторе); G^R – расход из рассматриваемого объёма в объём «выше по течению».

Динамику теплофизических процессов в рассматриваемом объёме будем описывать уравнениями изменения массы M и внутренней энергии U .

Изменение массы:

$$\frac{dM}{dt} = G_1 - G^R - G + G_2. \quad (1)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\frac{dU}{dt} = G_1 c_{p1} T_1 - G^R c_p T - G c_p T + G_2 c_{p2} T_2 + Q_H - Q_{mo} - E_{mp} - p \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

Здесь T – температура; Q_H – тепло, подводимое к рабочему телу за счёт химических реакций; Q_{mo} – тепловой поток, обусловленный теплообменом с элементами конструкции; E_{mp} – потери на трение; $p \frac{dV}{dt}$ – работа расширения; c_p – изобарная теплоёмкость.

Внутренняя энергия определяется как

$$U = M c_v T, \quad (3)$$

где c_v – изохорная теплоёмкость.

Уравнение, описывающее изменение концентрации продуктов сгорания g_{nc} , в исходном состоянии система подачи заправлена азотом и имеет вид

$$\frac{d(Mg_{nc})}{dt} = g_{nc1} G_1 - g_{nc} G^R - g_{nc} G + g_{nc2} G_2. \quad (4)$$

Изменение температуры элементов конструкции T_w опишем уравнением

$$M_w c_w \frac{dT_w}{dt} = Q_{mo} - Q_{nap} + E_{mp}, \quad (5)$$

где c_w – теплоёмкость материала конструкции; M_w – масса конструкции; Q_{nap} – тепловой поток, обусловленный теплообменом с окружающей средой.

Для газогенератора и переходника добавим уравнения, описывающие накопление несгоревшего жидкого топлива $M_{жс}^{zz}$, $M_{жс}^n$ в соответствующих агрегатах:

$$\frac{dM_{жс}^{zz}}{dt} = (G_o + G_2)(1 - \varphi_{zz}) - G_{жс}^{zz}, \quad (6)$$

$$\frac{dM_{жс}^n}{dt} = G_{жс}^{zn} (1 - \varphi_n) - G_n^{жс}, \quad (7)$$

где φ_{zz} и φ_n – полнота преобразования компонентов топлива соответственно в газогенераторе и переходнике; G_o и G_2 – расходы компонентов топлива; $G_{жс}^{zz}$ и $G_n^{жс}$ – расходы жидких фаз из газогенератора и переходника.

Для других агрегатов уравнения, аналогичные (6) – (7), отсутствуют, поскольку считаем, что все химические реакции завершаются в газовой фазе.

Принимая, что рабочее тело подчиняется уравнению состояния идеального газа $pV = MRT$, где p – давление, R – газовая постоянная, получим после преобразований следующую систему уравнений:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT}{c_v pV} \left[G_1 c_{p1} T_1 - G^R c_p T - G c_p T + G_2 c_{p2} T_2 + Q_H - Q_{mo} - E_{mp} - p \frac{dV}{dt} - c_v T (G_1 - G^R - G + G_2) \right], \quad (8)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \left[G_1 - G^R - G + G_2 + \frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} - \frac{p}{RT} \frac{dV}{dt} \right], \quad (9)$$

$$\frac{dg_{nc}}{dt} = \frac{RT}{pV} \left[G_1 g_{nc1} - G^R g_{nc} - G_{nc} g_{nc} + G_2 g_{nc2} + \frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} - \frac{p}{RT} \frac{dV}{dt} - \frac{p}{RT} \frac{dV}{dt} \right], \quad (10)$$

$$\frac{dM_{жс}^{zz}}{dt} = (G_o + G_2)(1 - \varphi_{zz}) - G_{жс}^{zz}, \quad (11)$$

$$\frac{dM_{ж}^n}{dt} = G_{z2}^{ж} (1 - \varphi_n) - G_n^{ж}, \quad (12)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} (Q_{mo} - Q_{нар} + E_{mp}). \quad (13)$$

Применительно к газогенератору в уравнениях (8)-(10)

$$G_1 c_{p_1} T_1 = (G_o c_o + G_z c_z) T_{км} \varphi_{z2}, \quad (14)$$

$$G_1 = (G_o + G_z) \varphi_{z2}, \quad (15)$$

где $T_{км}$ – температура компонентов топлива; c_o, c_z – теплоёмкости компонентов топлива.

Для переходника имеем:

$$G_1 c_{p_1} T_1 = G_{z2} c_{p_{z2}} T_{z2} + G_{z2}^{ж} c_{p_{км}} T_{км} \varphi_{z2}, \quad (16)$$

$$G_1 = G_{z2} + G_{z2}^{ж} \varphi_n. \quad (17)$$

Для газоведа имеем:

$$G_1 c_{p_1} T_1 = G_n c_{p_n} T_n + G_n^{ж} c_{p_{км}} T_{км}, \quad (18)$$

$$G_1 = G_{z2} + G_n^{ж}. \quad (19)$$

Выражение для массового секундного расхода газовой фазы имеет вид [5]:

$$G = \begin{cases} \mu_p F \frac{p_{вх}}{RT_{вх}} \left(\frac{p}{p_{вх}} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_{вх} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{вх}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, & \frac{p}{p_{вх}} > \varepsilon^*, \\ \mu_p F \frac{p_{вх} A(k)}{\sqrt{RT_{вх}}}, & \frac{p}{p_{вх}} < \varepsilon^*, \end{cases} \quad (20)$$

где R – газовая постоянная; F – площадь; k – показатель процесса расширения; μ_p – коэффициент расхода; $\varepsilon^* = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$. Индекс «вх» обозначает параметры в объёмах, расположенных выше и ниже по течению.

Тепловой поток от рабочего тела к элементам конструкции определим как

$$Q_{mo} = F_{mo} \alpha (T - T_w). \quad (21)$$

Здесь F_{mo} – обогреваемая площадь; α – коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu } \lambda}{d}, \quad (22)$$

где d – характерный размер; λ – коэффициент теплопроводности; Nu – число Нуссельта, определяемое [6] как

$$\text{Nu} = \begin{cases} c Ra^n, & \text{Re} = 0; \\ 0,15 \text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,43} Gr^{0,1} \varepsilon, & \text{Re} \leq 2300; \\ 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \varepsilon, & \text{Re} > 2300. \end{cases} \quad (23)$$

Применительно к баку и аккумулятору давления используем только первое выражение из (23):

$$Ra = Gr \text{Pr}, \quad (24)$$

$$Gr = \frac{9,8 d^3 \rho^2 (T - T_w)}{0,5 (T + T_w) \mu^2}, \quad (25)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}. \quad (26)$$

Здесь μ – коэффициент динамической вязкости; λ – коэффициент теплопроводности, коэффициенты c и n в (23), а также поправочный коэффициент ε определяется согласно [6] в зависимости от условий течения.

Число Рейнольдса, входящее в (23), определяется как

$$\text{Re} = \frac{w d \rho}{\mu}, \quad (27)$$

где d – характерный размер; ρ – плотность.

Скорость в газовой и магистральной будем определять как

$$w = \frac{G_1 + G}{2 \rho F}, \quad (28)$$

где F – площадь поперечного сечения.

Потери энергии на трение определим как

$$E_{\text{тр}} = \frac{d}{dt} (\Delta p_{\text{тр}} F L) = \Delta p_{\text{тр}} F w, \quad (29)$$

где L – длина канала; $\Delta p_{\text{тр}}$ – потери давления из-за трения, определяемые согласно [5].

Примем допущение о пропорциональности расхода жидкой фазы расходу газовой фазы. Тогда

$$G_{\text{ж}} = \frac{g_{\text{ж}} G}{1 - g_{\text{ж}}}. \quad (30)$$

Здесь $g_{ж}$ – массовая доля жидкой фазы:

$$g_{ж} = \frac{M_{ж}}{M_{ж} + M}, \quad (31)$$

где масса газа M в объёме V определяется из уравнения состояния.

Тепловой эффект химических реакций запишем в виде

$$Q_H = H G \varphi, \quad (32)$$

где H – удельная теплота химических реакций; φ – полнота преобразования компонентов топлива в продукты сгорания.

Зависимость удельной теплоты химических реакций от массового соотношения компонентов топлива k_m , полученная по результатам термодинамического расчёта и уравнению (8), записанному в стационарной постановке, представлена в [8].

Теплофизические свойства рабочего тела определяются следующим образом:

$$c_p = g_{nc} c_{p_{nc}} + (1 - g_{nc}) c_{p_{N_2}}, \quad (33)$$

$$R = g_{nc} R_{nc} + (1 - g_{nc}) R_{N_2}, \quad (34)$$

$$\mu = \frac{1}{\frac{g_{nc}}{\mu_{nc}} - \frac{1 - g_{nc}}{\mu_{N_2}}}, \quad (35)$$

$$\lambda = r_{nc} \lambda_{nc} + (1 - r_{nc}) \lambda_{N_2}, \quad (36)$$

$$r_{nc} = g_{nc} \frac{R_{nc}}{R}. \quad (37)$$

Выражение (35) взято из [9], выражение (36) – из [10].

Теплофизические параметры для диапазона $285\text{K} < T < 1391\text{K}$ (для продуктов сгорания – результаты термодинамического расчёта при $k_m = 0,25$; для азота значения взяты из [11]) и аппроксимированы полиномами, представленными в [8].

Расходы горючего и окислителя в газогенератор определяются как функции перепада давления, полученные по результатам гидравлических проливок.

В качестве начальных условий задаются температура, давление и концентрация продуктов сгорания в агрегатах системы; температура конструкции агрегатов.

Система уравнений (8)-(13) решается численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [12].

В качестве примера на рис. 3, 4 представлены сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными. Совпадение расчётных и экспериментальных данных можно считать удовлетворительным. Это позволяет в процессе проектирования предложенную нульмерную математическую модель использовать для расчётно-теоретических исследований различных вариантов ДУ с ВСПТ на горячем газе.

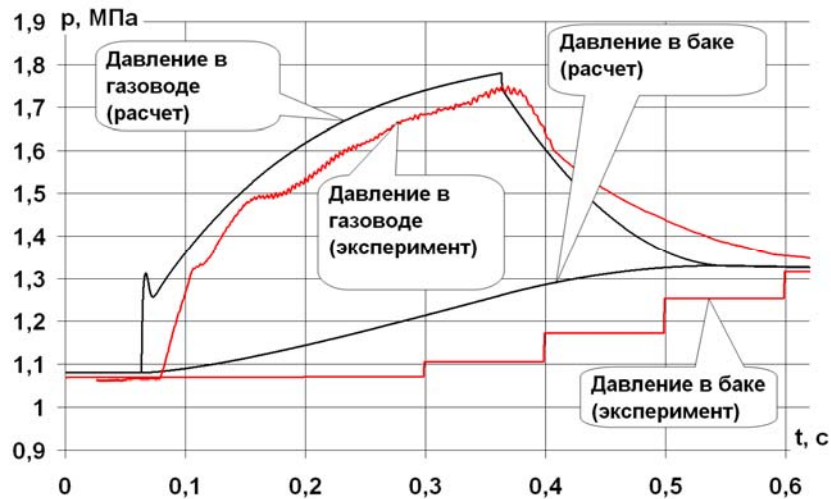


Рис. 3. Сравнение расчётных и экспериментальных данных: объём газовой подушки в баке 2 л, длительность команды на включение газогенератора 0,3 с

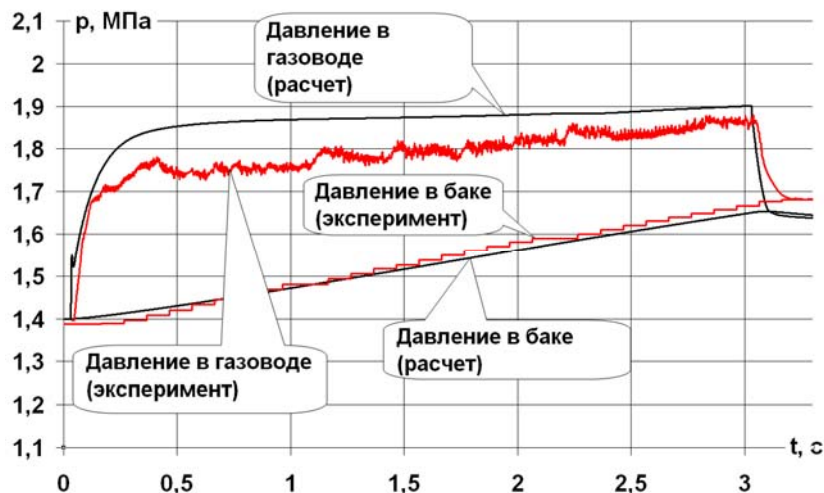


Рис. 4. Сравнение расчётных и экспериментальных данных: объём газовой подушки в баке 20 л, длительность команды на включение газогенератора 3 с

Библиографический список

1. Архипов Ю.С., Кутуева Е.В., Кутуев Р.Х. Огненные колесницы космических орбит. Нижний Тагил: Репринт, 2014. 242 с.
2. Салич В.Л., Шамаков А.А., Ваулин С.Д. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги: учеб. пособие. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2006. 52 с.
3. Валеева О.В., Ваулин С.Д., Ковин С.Г., Феофилактов В.И. Низкотемпературные твердотопливные газогенераторы: методы расчёта рабочих процессов, экспериментальные исследования. Миасс: ГРЦ «КБ имени академика В.П. Макеева», 1997. 268 с.
4. Бобров П.Н., Муркин В.А., Салич В.Л., Шульгин В.П. Экспериментальные исследования по созданию ДУ с вытеснительной системой подачи топлива на горячем

газе // Материалы XXXVI всероссийской конференции «Наука и технологии». Т. 3. М.: РАН, 2016. С. 44-48.

5. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.

6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1975. 488 с.

7. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. М.: Московский авиационный институт, 1999. 228 с.

8. Салич В.Л. Математическая модель теплофизических процессов в системе наддува ДУ на горячем газе // Материалы XXXVI всероссийской конференции «Наука и технологии». Т. 3. М.: РАН, 2016. С. 35-43.

9. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.

10. Флореа О., Смигельский О. Расчёты по процессам и аппаратам химической технологии. М.: Химия, 1971. 447 с.

11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

12. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

MATHEMATICAL MODELLING OF THE WORKING PROCESS OF A HOT GAS PRESSURE FEED SYSTEM

© 2016

V. L. Salich Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher of Advanced Design Department, Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Russian Federation, salich_vas@mail.ru, mail@niimashspace.ru

The paper discusses improving the weight and size characteristics of propulsion systems with liquid thrusters due to the replacement of conventional compressed-gas systems by hot gas systems where a gas generator operating on propellants is used for hot gas production. Possible algorithms of the operation of such feed systems are discussed. A mathematical model has been created for the purpose of computational and theoretical study of operating processes in the considered feed system. The model represents system units as lumped volumes. Differential equations of weight, internal energy, and combustion gases concentration are written for every lumped volume. The differential equation of unit structure temperature is also added. The differential equations of mass and internal energy are converted into equations of pressure and temperature. The model is expressed through mass flow ratios and heat exchanges between the system units, dependences of thermo-physical properties on the temperature, combustion gas concentrations and the ratio of fuel components in the gas generator. The temperature, pressure, concentration of combustion gases in the system units and the unit structure temperature are specified as input parameters. The simulation results showed satisfactory agreement with the experimental data, which makes it possible to use the developed model for computational and theoretical studies of the hot gas pressure feed systems.

Propulsion system; propellant feed system; gas generator; mathematical modeling.

Citation: Salich V.L. Mathematical modelling of the working process of a hot gas pressure feed system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 133-142.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-133-142

References

1. Arkhipov Yu.S., Kutueva E.V., Kutuev R.Kh. *Ognennyye kolesnitsy kosmicheskikh orbit* [Fiery chariots of space orbits]. Nizhny Tagil: Reprint Publ., 2014. 242 p.
2. Salich V.L., Shmakov A.A., Vaulin S.D. *Zhidkostnyye raketnyye dvigateli maloy tyagi* [Liquid rocket thrusters]. Chelyabinsk: South Ural State University Publ., 2006. 52 p.
3. Valeeva O.V., Vaulin S.D., Kovin S.G., Feofilaktov V.I. *Nizkotemperaturnyye tverdotoplivnyye gazogeneratory: metody rascheta rabochikh protsessov, eksperimental'nyye issledovaniya* [Low-temperature solid-fuel gas generators: Methods of calculating working processes, experimental research]. Miass: Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre Publ., 1997. 268 p.
4. Bobrov P.N., Murkin V.A., Salich V.L., Shul'gin V.P. *Eksperimental'nyye issledovaniya po sozdaniyu DU s vytesnitel'noy sistemoy podachi topliva na goryachem gaze. Materialy XXXVI vserossiyskoy konferentsii «Nauka i tekhnologii»*. V. 3. Moscow: Russian Academy of Sciences Publ., 2016. P. 44-48. (In Russ.)
5. Emtsev B.T. *Tekhnicheskaya gidromekhanika: ucheb. dlya vuzov* [Engineering fluid dynamics: Textbook for higher schools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 440 p.
6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha: uchebnyy dlya vuzov* [Heat transfer: Textbook for higher schools]. Moscow: Energiya Publ., 1975. 488 p.
7. Belyaev E.N., Chvanov V.K., Chervakov V.V. *Matematicheskoye modelirovaniye rabochego protsessa zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Mathematical modeling of the working process in liquid rocket engines: Tutorial]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 1999. 228 p.
8. Salich V.L. *Matematicheskaya model' teplofizicheskikh protsessov v sisteme nadduva DU na goryachem gaze. Materialy XXXVI vserossiyskoy konferentsii «Nauka i tekhnologii»*. V. 3. Moscow: Russian Academy of Sciences Publ., 2016. P. 35-43. (In Russ.)
9. Malkov M.P., Danilov I.B., Zel'dovich A.G., Fradkov A.B. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki* [Handbook on physico-technical fundamentals of cryogenics]. M.: Energoatomizdat Publ., 1985. 432 p.
10. Florea O., Smigel'skiy O. *Raschety po protsessam i apparatam khimicheskoy tekhnologii* [Calculations of the processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1971. 448 p.
11. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Guide to the thermo-physical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
12. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 512 p.