

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ НА НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАПИЛЛЯРНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РДМТ

© 2013 В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

Проведено расчетно-теоретическое исследование влияния тепловых факторов на гидравлические характеристики капиллярных форсуночных элементов РДМТ. Показано, что влияние тепловых факторов может приводить к существенным изменениям гидравлических характеристик форсуночных элементов РДМТ тягой менее 1 Н и, как следствие этого, к неустойчивости параметров двигателя и его нерасчетной работе.

Ракетные двигатели малой тяги, капиллярные форсуночные элементы, гидравлические характеристики, тепловые факторы, неустойчивость параметров.

Ракетные двигатели малой тяги (РДМТ) менее 1 Н представляют несомненный интерес для разработчиков систем ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА), поскольку данные исполнительные органы обеспечивают как высокую точность управления КА, так и вполне удовлетворительную динамику выполнения операций по управлению летательным аппаратом.

РДМТ тягой менее 1 по сравнению с двигателями тягой от 10 до 400 Н имеют свои отличительные особенности, которые необходимо учитывать при их проектировании [1-3]:

- наличие одного смесительного элемента;
- использование в качестве форсунок, прежде всего, струйных форсунок - капилляров с внутренним диаметром (0,15-0,3) мм и с большими относительными длинами - более 20;
- проблемы с обеспечением стабильности гидравлических характеристик капиллярных смесительных элементов из-за возможной облитерации капиллярных каналов и значительных тепловых потоков в смесительную головку;
- сложности в эффективной организации жидкофазного смешения компонентов топлива;
- значительные потери удельного импульса тяги из-за неадиабатности процессов в камере;
- особые условия организации тепловой защиты смесительной головки и стенок камеры сгорания.

Со снижением уровня тяги РДМТ возрастает относительная доля тепла, отводимого от про-

дуктов сгорания к стенке камеры двигателя, в частности потери энергии на неадиабатность рабочего процесса в камере сгорания РДМТ тягой менее 1 Н могут превышать (10...15) % [1]. Поэтому одной из возможных причин неустойчивости параметров РДМТ тягой менее 1 Н может быть изменение гидравлических характеристик капиллярных форсуночных элементов смесительной головки двигателя вследствие влияния тепловых факторов, обусловленных тепловыми потоками в смесительную головку.

Физическую картину течения жидкости в капиллярах смесительной головки РДМТ, учитывая все возможные стадии реализации течения с подводом тепла, можно представить в следующем виде (рис. 1) [3]: на входном участке АВ реализуется изотермическое течение жидкости - без подвода тепла; на последующих участках течения с подводом тепла ВЛ, на которых можно выделить зоны жидкофазного течения ВС, течения кипящей недогретой жидкости СЛ, состоящей из участков неразвитого СД и развитого ДК пузырькового кипения, а также из участка пленочного кипения КЛ. На рис. 1 показаны изменения параметров компонента вдоль оси канала капилляра, где i_{ax} , $i_{ж}$, i_{cm} , i_s - энтальпия компонента соответственно на входе в капилляр, по длине канала, при температуре стенки и при температуре насыщенных паров; φ - истинное объемное паросодержание; x_0 - относительная энтальпия, определяемая по тепловому балансу; $x_{ж}$ - относительная энтальпия компонента, средняя по сечению; x_0 - действительное массовое паросодержание; q - плотность теплового потока; z - координата вдоль оси канала капилляра.

На основании рассмотренной выше физической картины течения с учетом результатов исследований [3-9] была предложена математическая

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: ke_src@ssau.ru

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра космической энергетики СГАУ. E-mail: ke_src@ssau.ru

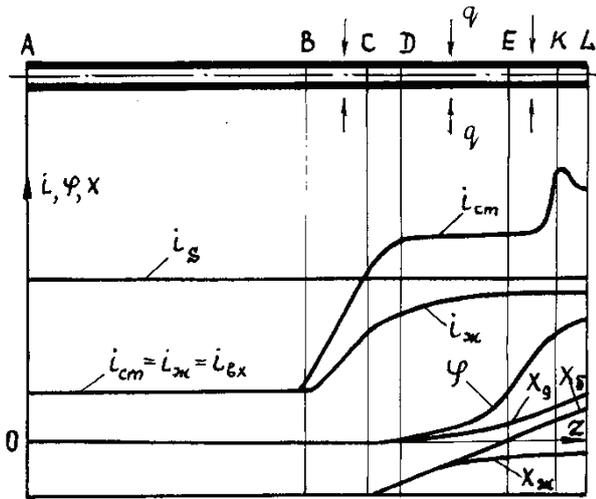


Рис. 1. Физическая картина течения жидкости в капилляре смесительной головки ЖРДМТ

модель расчета теплообмена и гидравлического сопротивления компонентов топлива в капиллярах смесительной головки при следующих допущениях:

- стационарность течения и теплообмена;
- постоянство плотности теплового потока на участке теплоподвода к капилляру;
- капиллярные форсуночные элементы - гидродинамически гладкие трубы;
- тепловой поток вдоль оси капилляра пренебрежимо мал.

Изменение коэффициента гидравлического сопротивления при подводе тепла оценивалось с помощью относительного коэффициента гидрав-

лического сопротивления $\bar{\xi}_i = \frac{\xi_i}{\xi_{oi}}$, где ξ_{oi} - ко-

эффициент гидравлического сопротивления при изотермическом течении компонента на i -том участке; ξ_i - коэффициент гидравлического сопротивления при подводе тепла к компоненту на i -том участке.

Значения относительного коэффициента гидравлического сопротивления для различных участков течения компонента в соответствии с представленной выше физической картиной определялись с помощью следующих выражений:

- при жидкофазном течении и течении недогретой жидкости на участке неразвитого кипения, когда реализуется ламинарное течение

$$\bar{\xi}_t = \left(\frac{\eta_{cm}}{\eta_o} \right)^n,$$

где $n = 2,30 \left(\frac{1}{Pe_o} \frac{l}{d} \right)^{0,3} \left(\frac{\eta_{cm}}{\eta_o} \right)^{-0,062}$,

- когда реализуется турбулентное течение

$$\bar{\xi}_t = \left(\frac{\eta_{cm}}{\eta_{жс}} \right)^{0,33} \left(\frac{\eta_{жс}}{\eta_o} \right)^{0,25},$$

- при течении недогретой жидкости на участке развитого кипения, когда относительная энтальпия, определяемая по тепловому балансу, $x_o \leq 0$

$$\bar{\xi}_{kun1} = \frac{1,28}{\xi_{o1}} \left(\frac{q}{r\rho_n u} \right)^{0,7} \left(\frac{r\rho_n}{(i_s - i)\rho_{жс}} \right)^{0,6},$$

- когда относительная энтальпия, определяемая по тепловому балансу, $x_o > 0$

$$\bar{\xi}_{kun2} = \left(\frac{\eta_{kun}}{\eta_{жс}} \right)^{0,25} + \frac{2\rho_{kun}}{\xi_{o2}} \left[\frac{x_o^2}{\varphi^2} \frac{1}{\rho_n} + \frac{(1-x_o)^2}{(1-\varphi)^2} \frac{1}{\rho_{жс}} - \frac{1}{\rho_{жс, x=0}} \right].$$

Зная изменения коэффициента гидравлического сопротивления на каждом из рассмотренных участков течения с подводом тепла можно найти изменение суммарного относительного коэффициента гидравлического сопротивления $\bar{\xi}_\Sigma$ на капиллярном форсуночном элементе:

$$\bar{\xi}_\Sigma = \frac{\xi_o}{\xi_{o\Sigma}} + \bar{\xi}_t \frac{l_t}{l_\Sigma} + \bar{\xi}_{kun1} \frac{l_{kun1}}{l_\Sigma} + \bar{\xi}_{kun2} \frac{l_{kun2}}{l_\Sigma}.$$

В приведенных выше уравнениях были использованы следующие обозначения параметров: d - внутренний диаметр капилляра; l - длина участка капилляра; η - динамический коэффициент вязкости; Pe - число Пекле; ρ - плотность; r - скрытая теплота парообразования; i - энтальпия; u - скорость. Индексы в этих уравнениях означают: o - изотермическое течение; t - изотермическое жидкофазное течение с подводом тепла; $жс$ и $см$ - параметры, определяемые при средне-массовой температуре жидкости и температуре стенки; n - пар; s - параметр, определяемый при температуре насыщенных паров; $kun1$ - параметры участка кипения; 1 и 2 - участки развитого кипения соответственно при $x_o \leq 0$ и $x_o > 0$; Σ - суммарный параметр для всей длины капилляра.

С помощью предложенной модели было проведено расчетное исследование изменения гидравлического сопротивления капилляров на примере двухкомпонентного РДМТ номинальной тягой 0,4 Н на компонентах топлива несимметричный диметилгидразин (НДМГ) и азотный тетраоксид (АТ) и, как следствие этого, изменений массового соотношения компонентов топлива и тяги двигателя. Длина и внутренний диаметр капиллярных форсуночных элементов смесительной головки РДМТ, состоящей из одного капиллярного форсуночного элемента по каждой

линии подачи компонентов, в расчетном исследовании принимались равными соответственно 52 мм и 0,2 мм. Длина выходного участка теплопровода капилляра составляла 50 % от длины капилляра - 26 мм. Расчеты были проведены при номинальных параметрах двигателя: тяга 0,4 Н, давление в камере сгорания 0,5 МПа, температура компонентов на входе в двигатель 20 °С, массовое соотношение компонентов топлива 1,8. При этом в капилляре окислителя для двигателя тягой 0,4 Н была возможна реализация как ламинарного, так и турбулентного режима течения компонента, поэтому рассматривались оба режима течения, а в капилляре горючего – только ламинарный режим течения компонента. Характер режимов течения был обусловлен значением числа Рейнольдса при возможных расходах компонентов в капиллярах.

В процессе расчетного исследования определялась зависимость изменения гидравлического сопротивления $\bar{\xi}_{\Sigma}$ форсуночного элемента от значения теплового потока Q , подводимого к форсуночному элементу. Максимальное значение теплового потока в рассматриваемом исследовании ограничивалось значением 1,2% от кинетической энергии газовой струи на срезе сопла двигателя «W» при ее полном расширении. Данное значение теплового потока было достаточным, как показано ниже по тексту, для существенного влияния тепловых факторов на гидравлические характеристики форсуночного элемента. При расчетном исследовании предполагались равные значения тепловых потоков к капиллярам обоих компонентов: горючего и окислителя, постоянство перепада давления на смесительной головке и удельного импульса тяги двигателя.

На рис. 2 представлены результаты расчетного исследования в виде зависимостей суммарного относительного коэффициента гидравлического сопротивления $\bar{\xi}_{\Sigma}$, массового соотношения компонентов K_m и тяги P двигателя от значения подводимого к капилляру теплового потока Q . Зависимости тяги P и массового соотношения компонентов K_m , показанные на рисунке, рассчитаны для случая максимального отклонения гидравлического сопротивления – при ламинарном режиме течения окислителя и горючего. Из анализа полученных расчетных данных можно отметить то, что при жидкофазном течении компонентов топлива с подводом тепла уменьшение гидравлического сопротивления при ламинарном режиме течения компонентов составляет 30 % (1,0% от «W», $Q=12 Bm$) и 15 % (0,4% от «W», $Q=5 Bm$) соответственно в капиллярах горючего и окислителя, при этом массовое соотношение компонентов топлива K_m меняется

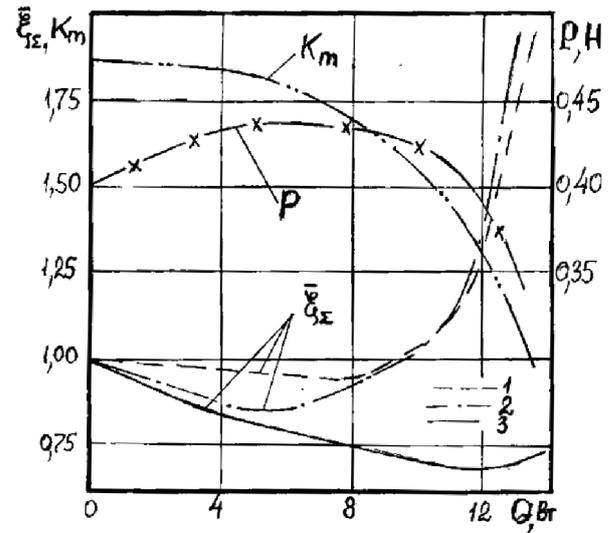


Рис. 2. Зависимости суммарного относительного коэффициента гидравлического сопротивления $\bar{\xi}_{\Sigma}$, массового соотношения компонентов K_m и тяги P двигателя от значения подводимого теплового потока:

1, 2 – окислитель; 3 – горючее; 1 – турбулентный режим течения; 2,3 – ламинарный режим течения

незначительно, а тяга P двигателя увеличивается на 9,4% от номинального значения. Возможность реализации турбулентного режима течения в капилляре окислителя для ЖРДМТ тягой 0,4 Н в сравнении с ламинарным повышает стабильность гидравлического сопротивления в области жидкофазного течения с подводом тепла: $\bar{\xi}_{\Sigma}$ уменьшается лишь на 6% и расширяет диапазон данной области по тепловому потоку до 0,7% от «W» ($Q=8 Bm$).

Дальнейшее увеличение теплопровода к капиллярам смесительной головки приводит к образованию паровой фазы, прежде всего в капилляре окислителя, т.к. АТ имеет более низкую температуру насыщенных паров, чем НДМГ, что ведет к росту гидравлического сопротивления: в рассматриваемом диапазоне подводимого теплового потока гидравлическое сопротивление при достижении теплового потока 1,2% от «W» по линии окислителя увеличивается в два раза, по линии горючего уменьшается на 25%.

При этом массовое соотношение компонентов топлива и тяга двигателя падают соответственно на 40% и 10%. Однако коэффициент теплоотдачи в капилляре окислителя больше, чем в капилляре горючего, поэтому, по всей видимости, большая часть подводимого к смесительной головке теплового потока будет сниматься окислителем и, учитывая тот факт, что АТ более чувствителен к теплоподводу, то возрастает возможность возникновения кипения в капилляре

окислителя. Последнее будет приводить к перераспределению теплового потока, что существенно увеличит гидравлическое сопротивление капилляра окислителя и приведет к более значительному изменению параметров РДМТ. Кроме того, в области развитого кипения градиент роста гидравлического сопротивления при изменении теплового потока достаточно большой, поэтому незначительные тепловые возмущения могут приводить к неустойчивости рабочего процесса как в капилляре окислителя, так и РДМТ в целом. Поскольку массовое соотношение компонентов топлива изменяется значительно: K_m уменьшилось с 1,8 до 1,0, то будет существенно падать удельный импульс тяги двигателя и, как следствие этого, более значительно по сравнению с расчетным значением уменьшится тяга двигателя.

Проведенное расчетно-теоретическое исследование показало, что влияние тепловых факторов может приводить к существенным изменениям гидравлических характеристик форсуночных элементов РДМТ тягой менее 1 Н и, как следствие этого, к нестабильности параметров двигателя и его нерасчетной работе. Из сказанного выше следует, что на стадии проектирования РДМТ необходимо оценивать возможные тепловые потоки к форсуночным элементам смесительной головки, конструктивно обеспечивая их допустимые значения. Одним из возможных способов снижения тепловых потоков в смесительную головку можно рекомендовать предкамерное устройство в качестве теплового моста между камерой сгорания и смесительной головкой [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу о потерях в камере сгорания двигателей малой тяги / В.Е. Годлевский, В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1983. № 1. С. 77...79.
2. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Особенности организации рабочего процесса ЖРДМТ тягой менее 1 Н // Материалы докладов на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Часть 1. Самара: СГАУ, 2009, С. 119-120.
3. Особенности расчета гидравлических характеристик капиллярных форсуночных элементов ЖРДМТ / В.Е. Годлевский, В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Вестник СГАУ. 2009. № 3 (19). С. 241-247.
4. Сточек Н.П., Шапиро А.С. Гидравлика ЖРД. М.: Машиностроение, 1978. 118 с.
5. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Гемин, С.А. Ковалев. М.: Атомиздат, 1974. 407 с.
6. Локальное гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении воды в трубах / Н.В. Тарасова, В.И. Хлопушин, Л.В. Боронина // Теплофизика высоких температур. 1967. № 1 (5). С.130...136.
7. Орнатский, А.П. Обобщение опытных данных по гидравлическому сопротивлению при поверхностном кипении // Журнал прикладной механики и технической физики. 1965. № 3 (3). С.444...451.
8. Обобщение данных по теплопередаче при кипении недогретых жидкостей / Ю.Е. Похвалов, И.В. Кронин, И.В. Курганов // Теплоэнергетика. 1966. № 5. С.63...68.
9. Богданов Ф.Ф. Влияние скорости парожидкостной смеси теплоносителя и паросохранения на коэффициенты теплопередачи при кипении воды в трубах // Атомная энергия. 1970. Вып.6 (29). С.454...456.
10. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Перспективы применения предкамер в ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива // Материалы докладов на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Часть 1. Самара: СГАУ, 2009. С. 120-122.

EFFECT OF THERMAL INSTABILITY FACTORS ON THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE CAPILLARY INJECTOR ELEMENT LIQUID ROCKET THRUSTERS

© 2013 V.E. Nigodjuk, A.V. Sulinov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

By calculation and theoretical study of the influence of thermal factors on the hydraulic characteristics of the capillary injector element liquid rocket thrusters. It is shown that the influence of thermal factors can lead to significant changes in the hydraulic characteristics of injector components of rocket engine thrust of 1 N and, consequently, to the instability of the engine and its nonisobaric work.

Rocket thrusters, air washers capillary elements hydraulics, thermal factors, instability parameters.

Valentin Nigodjuk, Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Theory of Aircraft Engines Department.

E-mail: ke_src@ssau.ru

Alexander Sulinov, Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Theory of Aircraft Engines Department, Senior Research Fellow, Research Center of Cosmic Energy of SGAU.

E-mail: ke_src@ssau.ru