

Расчётные исследования по оптимизации схемы и параметров подачи компонентов топлива в камеру сгорания РДМТ на топливе газообразный кислород-керосин

77-30569/270659

12, декабрь 2011

Ягодников Д. А., Новиков А. В., Антонов Ю. В.

УДК 536.46

МГТУ им. Н.Э. Баумана

daj@mx.bmstu.ru

arnov@power.bmstu.ru

antonov@bmstu.ru

Решению проблемы экологии ракетно-космической техники (РКТ) за счет экологически чистых топлив уделяется большое внимание ведущими фирмами США, Великобритании, Франции, Германии, а в последнее время к решению этой задачи активно подключились фирмы Японии, Китая, Индии, Австралии и т.д. Интерес к данному классу топлив проявляют и отечественные головные разработчики космических систем: ОАО РКК «Энергия» им. С.П.Королева, ФГУП ГНКПЦ им. М.В.Хруничева, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и др. Учитывая отечественный опыт создания многоразовой транспортной системы "Энергия-Буран", можно предположить, что нетоксичные и малотоксичные топлива на основе кислорода с жидкими горючими керосин, спирт и др. будут востребованы также для верхних ступеней ракет-носителей и космических аппаратов (КА) различных типов, реактивная система управления которых использует в качестве исполнительных органов ракетные двигатели малой тяги (РДМТ).

Цель работы – анализ схемных решений по конструкциям РДМТ на жидком и газообразном компонентах и получение количественных зависимостей энергетических характеристик камеры РДМТ и параметров рабочего процесса расчетно-аналитическим путем, оптимизация схемы и параметров подачи компонентов топлива в камеру сгорания РДМТ.

В качестве базовой использована расчетная модель процессов в камере РДМТ тягой ~ 50 Н на топливе: газообразный кислород – керосин и система уравнений, описывающая рабочий процесс в камере сгорания РДМТ и опубликованная в [1]. В данной работе проведена доработка программы расчёта распределения параметров по объёму КС применительно к целям настоящего исследования. В частности введены теплофизические свойства керосина и термодинамические характеристики горения керосин-кислородной смеси [2-4], а также усовершенствован математический аппарат с целью получения более достоверных данных по распределению параметров рабочего процесса по объёму камеры сгорания для различных компонентов

На рис. 1 представлена конструкция рассматриваемой камеры сгорания (КС) двигателя, на рис. 2 – расчетная схема КС. Через отверстие А подается расход кислорода на свечу, через периферийную щель С – расход кислорода на периферийную завесу, остальные компоненты топлива подаются через радиальную щель В в виде равномерной смеси. При подаче через щели В и С имеет место закрутка потока. Образовавшиеся продукты сгорания истекают через сопло Д. Расчеты проводились для случая, когда подача компонента через периферийную щель С отсутствует, и оба компонента поступают в КС через щель В в виде газожидкостной смеси с монодисперсным составом капель жидкого компонента.

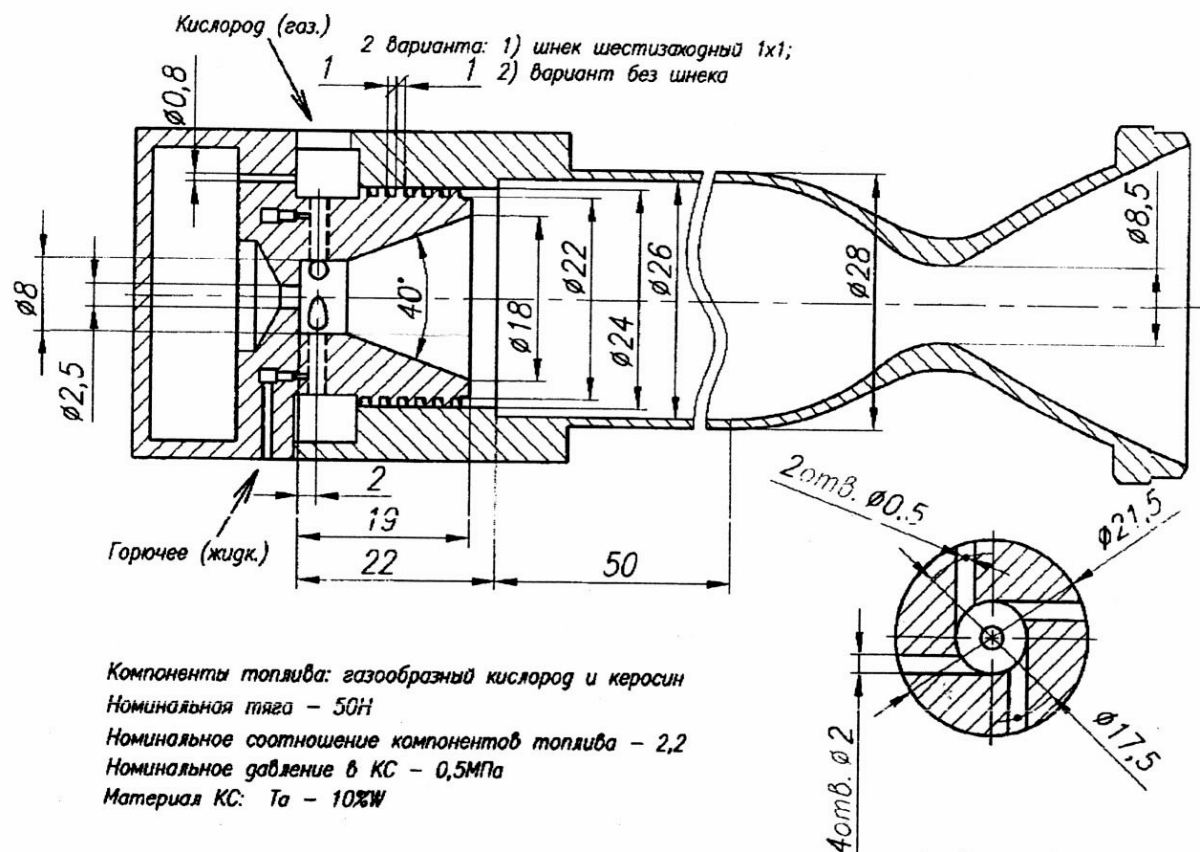


Рис. 1. – Конструкция рассчитываемой камеры двигателя

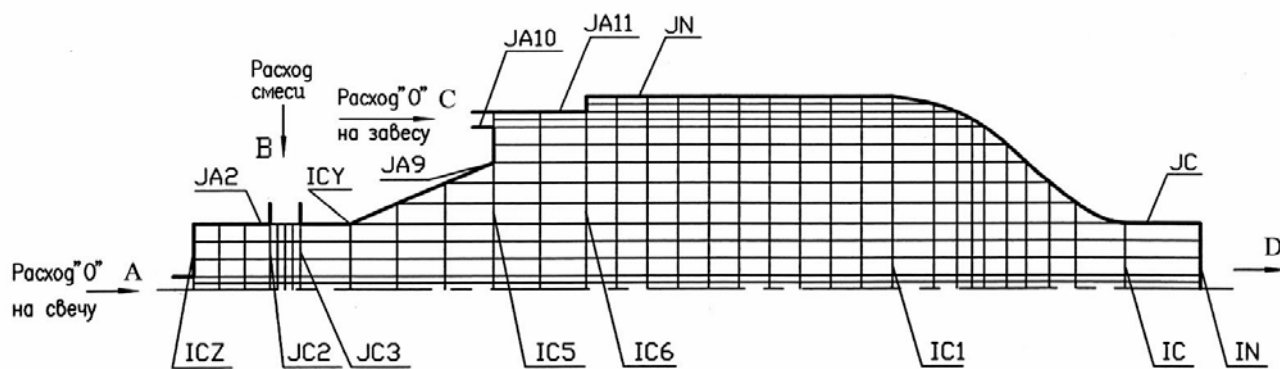


Рис. 2. - Расчетная схема камеры сгорания

Течение в КС двухфазной смеси (жидкий керосин и газообразный кислород) требует принятия некоторых допущений, обусловленных скоростной и температурной неравновесностью. Одной из трудностей, препятствующей применению численных методов для расчета испарения капель керосина, является их полидисперсность. Затраты машинного времени с учетом того или иного распределения капель по размеру достаточно велики. Эта проблема преодолевается

за счет использования эквивалентного диаметра. В качестве такого диаметра будем использовать среднемассовый диаметр капель.

В результате экзотермических химических реакций, протекающих в КС, устанавливается определенный химический состав и температура рабочего тела. С целью определения температуры продуктов сгорания (рабочего тела) должен производиться термодинамический расчет в каждом узле исследуемого объема для каждой итерации, что приводит к недопустимо большим затратам машинного времени и делает затруднительным решение данной задачи даже на быстродействующих ЭВМ. Этот недостаток устраняется путем замены множества химических реакций одной одностадийной реакцией, с введением эмпирических поправочных функций для согласования расчетной температуры, полученной по энтальпиям компонентов, с термодинамической температурой, полученной в термодинамических расчетах по программе АСТРА [5].

Рассчитываемую камеру сгорания можно считать изобарической. Распределение параметров в сужающейся части сопла рассчитываются по газодинамическим функциям через средний показатель изоэнтропы истечения n , определяемый в результате термодинамического расчета, а давление в каждом поперечном сечении сопла считаем постоянным и равным давлению на оси сопла. Очевидно, что при решении задачи в каждой локальной точке сужающейся части сопла давление будет отличаться от заданного базового значения за счет изменения параметров рабочего тела (температуры, плотности, осевой и радиальной составляющих, скорости). Это отличие определяется в процессе решения задачи.

При решении задаются следующие исходные данные:

1. Характерные геометрические размеры КС .
2. Давление в камере сгорания – p_k .
3. Суммарное соотношение компонентов топлива – $K_{m\Sigma}$.
4. Исходный диаметр капель жидкого компонента – d_k .

В результате решения задачи получаем следующие данные:

- распределение параметров по объему КС (напряженность вихря, функция тока, температура рабочего тела, плотность рабочего тела, осевые, окружные и радиальные скорости и т.д.);

- коэффициент расходного комплекса φ_β ;

- другие параметры, необходимые для оценки состояния КС на этапе проектирования.

Варьируя исходными данными (p_k , α , длина цилиндрической части КС L_k , схема смесеобразования, геометрические размеры КС и т.д.), можно по разработанной методике проводить параметрический анализ влияния различных факторов на полноту протекания рабочего процесса и тепловое состояние стенок камеры, а, следовательно, вырабатывать предварительные рекомендации по проектированию

Основные исходные данные по компонентам топлива и режимным параметрам камеры для давления 0,5 МПа, которые используются в математической модели и программе расчета приведены в таблице.

Таблица. Свойства керосина

	Керосин
Температура воспламенения, К	793
Плотность, кг/м ³	850
Удельная теплота испарения, кДж/кг	343
Энтальпия образования, кДж/кг	-1747,5
Температура кипения, К	440
Удельная теплоемкость, кДж/(кгК)	0,88

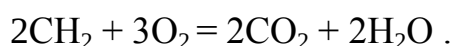
Режимные параметры камеры приняты в расчетах следующими:

- среднее массовое соотношение компонентов топлива для пары кислород - керосин $K_m = 2,2$;

- коэффициент избытка окислителя $\alpha=0,64$;

- давление в камере сгорания $p_k = 0,5$ МПа;

При разработке математической модели использовано представление об одностадийной химической реакции в виде:



В соответствии с уравнением химической реакции для пары кислород - керосин при избытке горючего ($\alpha \leq 1$) имеем:

$$z_{CO_2} = z_{CO_2} + \frac{88}{96} \cdot z_{O_2},$$

$$z_{H_2O} = z_{H_2O} + \frac{36}{96} \cdot z_{O_2},$$

$$z_{CH_2nap} = z_{CH_2nap} - \frac{28}{96} \cdot z_{O_2},$$

$$z_{O_2} = 0;$$

соответственно при избытке кислорода $\alpha > 1$:

$$z_{CO_2} = z_{CO_2} + \frac{88}{28} \cdot z_{CH_2nap},$$

$$z_{H_2O} = z_{H_2O} + \frac{36}{28} \cdot z_{CH_2nap},$$

$$z_{O_2} = z_{O_2} - \frac{96}{28} \cdot z_{CH_2nap},$$

$$z_{CH_2nap} = 0.$$

Остановимся подробнее на физике воздействия основных режимных параметров рабочего процесса и геометрии КС на коэффициент расходного комплекса.

Одним из параметров, оказывающим существенное влияние на совершенство и полноту внутрикамерных процессов в ракетных двигателях, работающих по схеме «газ-жидкость» является тонкость распыливания жидкого компонента топлива. Принципиальное значение в данном случае имеет выбор начального значения диаметра капли, так как в рамках рассматриваемой математической модели присутствует допущение об изначальном монодисперсном составе смеси.

Фиксируя режимные параметры и геометрию КС, попытаемся установить предельный размер капель d_{kmax} , с которого начинается существенное снижение коэффициента расходного комплекса. За величину d_{kmax} принимаем такой размер капель, при котором $\varphi_\beta = 0,99$. При этом считается, что при $d_k < d_{kmax}$ процесс испарения капель завершается в КС полностью и не лимитирует значение φ_β .

На рис. 3 представлена зависимость $\varphi_{\beta} = \varphi_{\beta}(d_k)$ исследуемой КС для компонентов кислород - керосин из которой следует, что для рассматриваемой топливной пары предельным диаметром является значение $d_{k\max} = 62$ мкм. Полученную величину примем в качестве опорной в процессе проведения дальнейших расчетов.

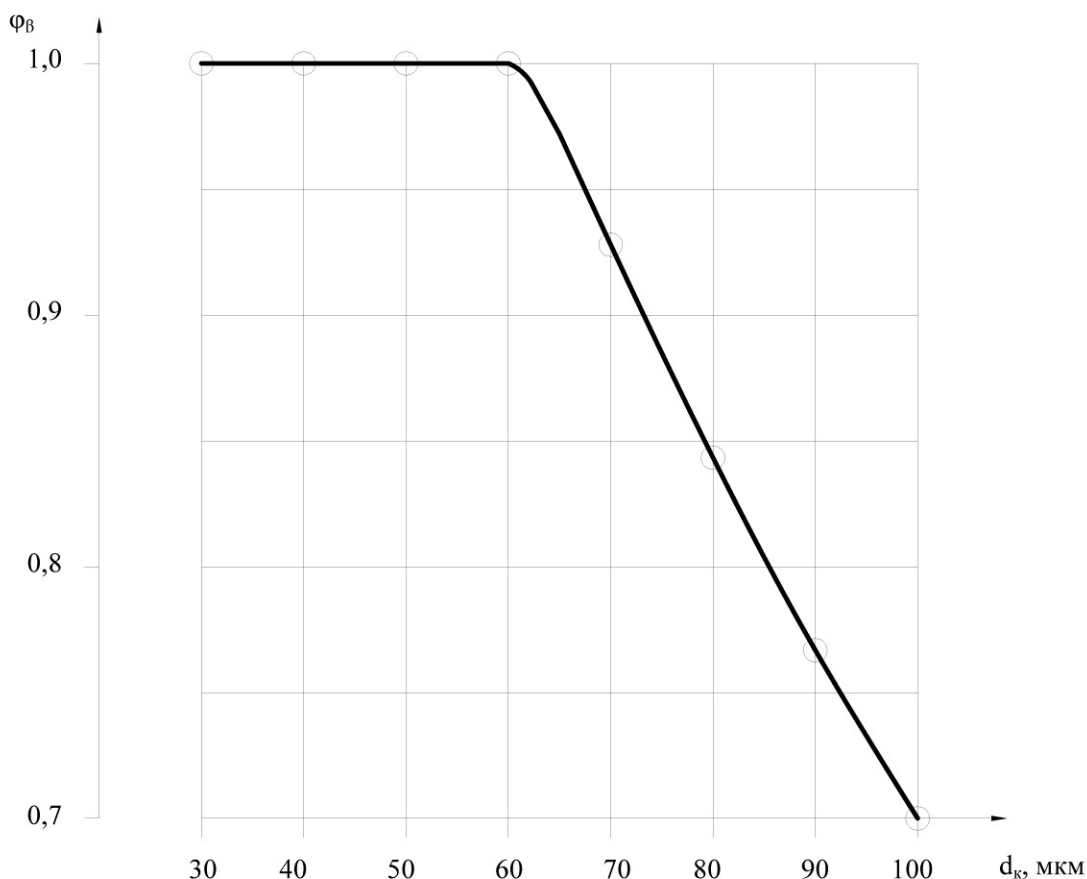


Рис. 3 - Зависимость $\varphi_{\beta} = f(d_k)$ для компонентов топлива кислород-керосин при $p_k=0,5$ МПа, $\alpha=0,64$, $L_k=50$ мм.

Очевидно, что изменение длины цилиндрической части КС при определенных условиях будет оказывать существенное влияние на полноту испарения капель жидкого горючего и на коэффициент расходного комплекса, при этом для различных значений начального диаметра, степень такого влияния будет различной.

На рис. 4 представлены расчётные зависимости $\varphi_{\beta} = \varphi_{\beta}(L_k)$ при различных значениях d_k для топлива кислород - керосин. Из рисунка видна общая тенденция роста полноты сгорания топлива с увеличением длины камеры сгорания,

обусловленная увеличением времени пребывания. Видно также, что влияние диаметра капель керосина в исследуемом диапазоне изменения длины цилиндрической части камеры сгорания начинается при $d_{\text{кmax}} = 30$ мкм. Это позволяет сделать вывод, что при такой и меньшей тонкости распыливания полное испарение капель керосина происходит уже на начальном участке КС.

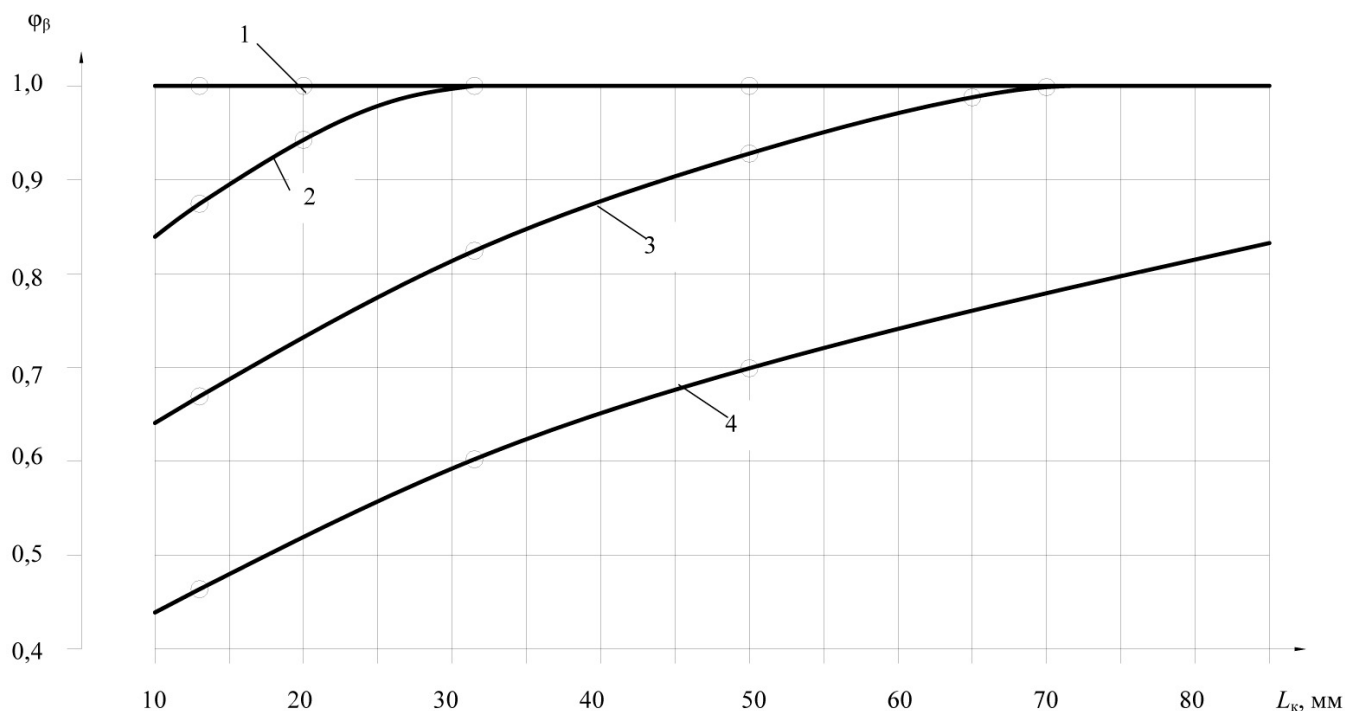


Рис. 4 - Зависимость $\phi_\beta = f(L_k)$ для компонентов топлива кислород+керосин при $p_k=0,5$ МПа, $\alpha=0,64$ и различных начальных диаметрах капель керосина.
1 - $d_k=30$ мкм; 2 - $d_k=50$ мкм; 3 - $d_k=70$ мкм; 4 - $d_k=100$ мкм.

На рис. 5 представлена зависимость $d_{\text{кmax}} = d_{\text{кmax}}(L_k)$ из которой видно, что с ростом длины цилиндрической части камеры сгорания значение $d_{\text{кmax}}$ возрастает, что связано с увеличением времени пребывания капель жидкого горючего в КС.

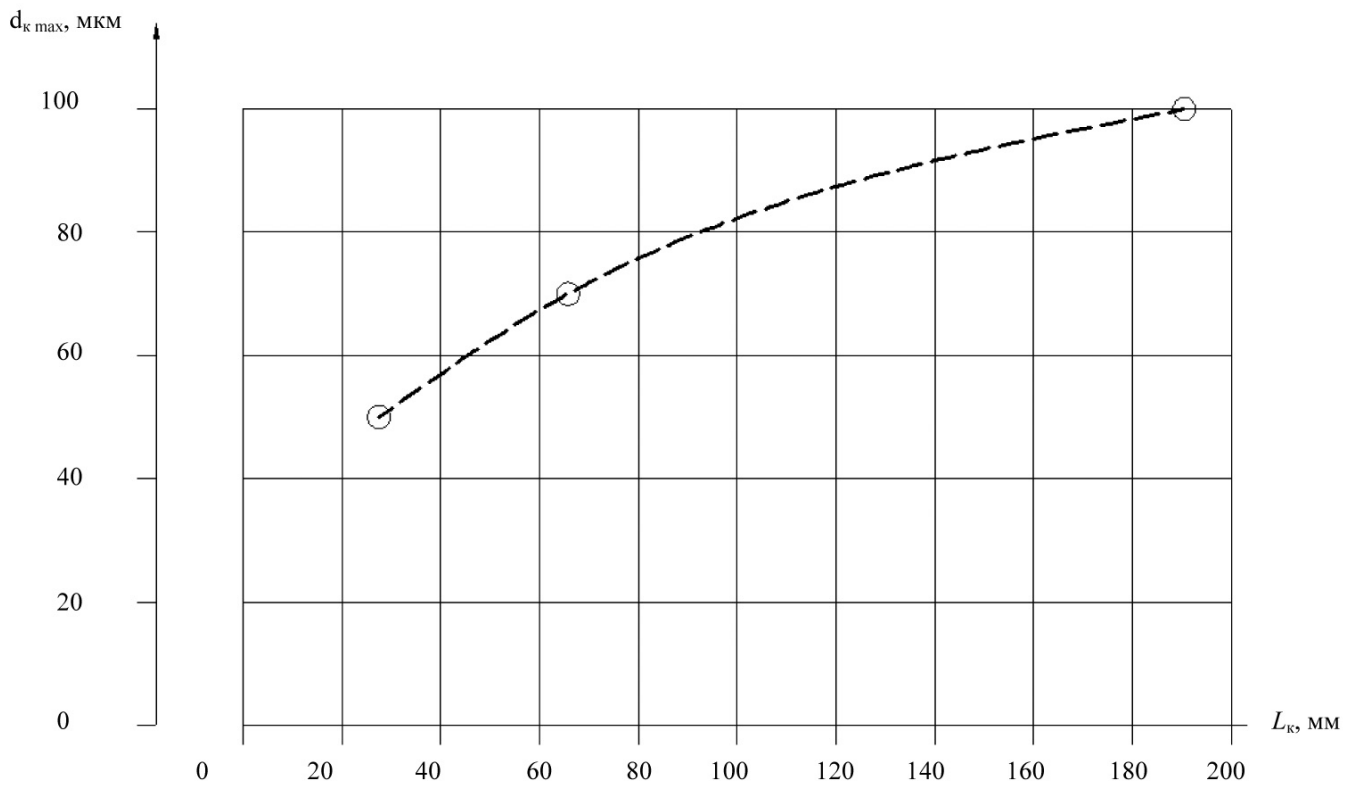


Рис. 5 - Зависимость $d_{k \max} = f(L_k)$ при $\varphi_\beta=0,99$, $p_k=0,5$ МПа, $\alpha=0,64$.

Другим режимным параметром, оказывающим существенное влияние на качество рабочего процесса, является соотношение компонентов топлива (коэффициент избытка окислителя). На рис. 6 представлены зависимости $\varphi_\beta = \varphi_\beta(\alpha, d_k)$ для топлива кислород – керосин, из которых видно, что при $d_k > d_{k \max}$ коэффициент расходного комплекса с ростом α существенно снижается. Такое поведение кривых объясняется более эффективным горением обогащённых смесей, когда лимитирующим фактором становится не поступление паров горючего из капель в реагирующую газовую смесь, а наличие в этой смеси свободного кислорода. Из данных этого же рисунка может быть сделан вывод, что для базового значения α при $d_k > d_{k \max}$ недостаточно тонкий распыл приводит к значительному снижению коэффициента расходного комплекса.

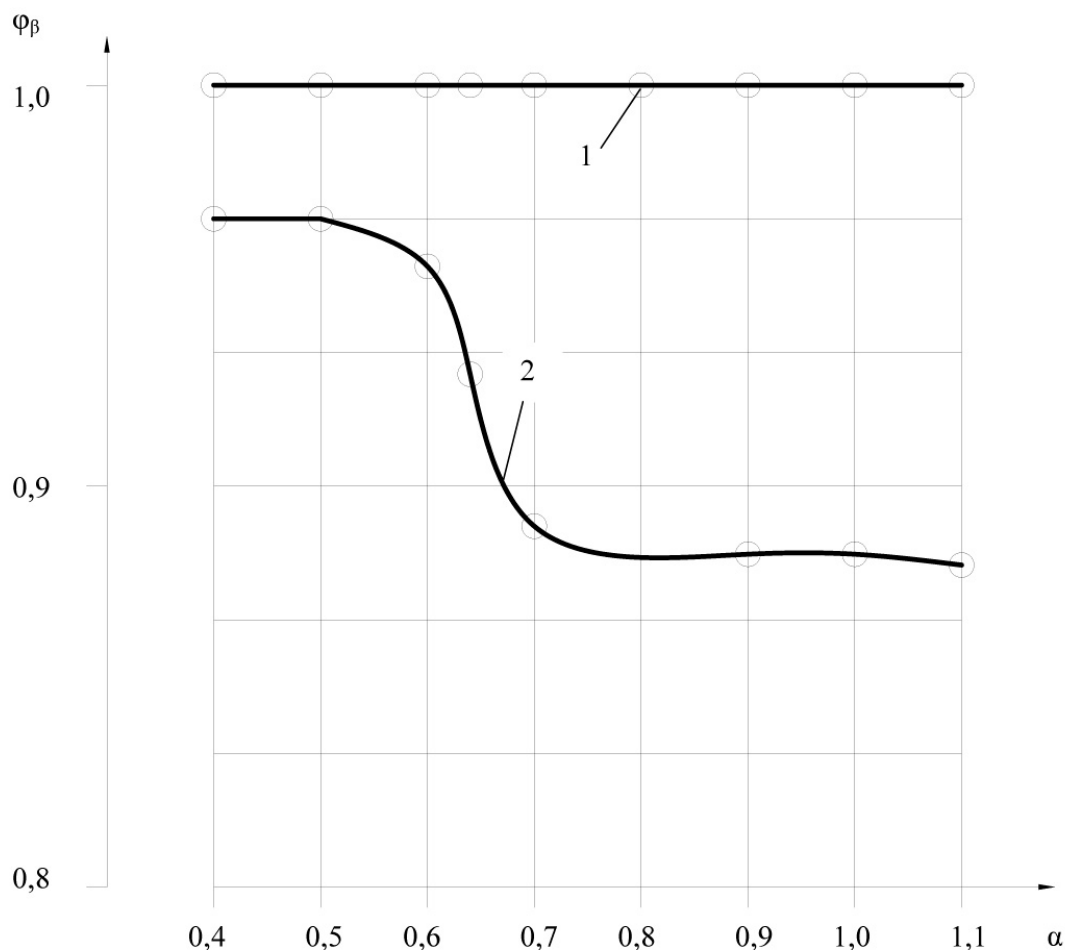


Рис. 6 - Зависимость $\varphi_{\beta} = f(\alpha)$ для компонентов топлива кислород+керосин при $p_k=0,5$ МПа, $L_k=50$ мм и различных начальных диаметрах капель керосина.
1 - $d_k=30$ мкм, $d_k=50$ мкм; 2 - $d_k=70$ мкм.

Рассматривая влияние давления на характеристики рабочего процесса в КС (рис. 7), следует отметить, что в соответствии с принятой математической моделью оно практически отсутствует. Это связано, в частности, с предположением об изначальной подаче в КС предварительно подготовленной газожидкостной смеси с монодисперсным составом капель жидкости. Таким образом, аэродинамические силы не оказывают существенного влияния в исследуемом диапазоне изменения давления 0,5 МПа – 1,5 МПа. Кроме того, при $d_k \leq d_{k\max}$ значение $\varphi_{\beta}=1,0$ во всём исследованном диапазоне изменения p_k . Физически это означает, что при тонком распыле капель жидкого горючего существенно ослабевает влияние на протекание рабочего процесса различия многих физических свойств жидких горючих – например, температуры кипения и теплоты фазового перехода, поскольку уже на начальных стадиях рабочего процесса происходит полное испарение этих капель.

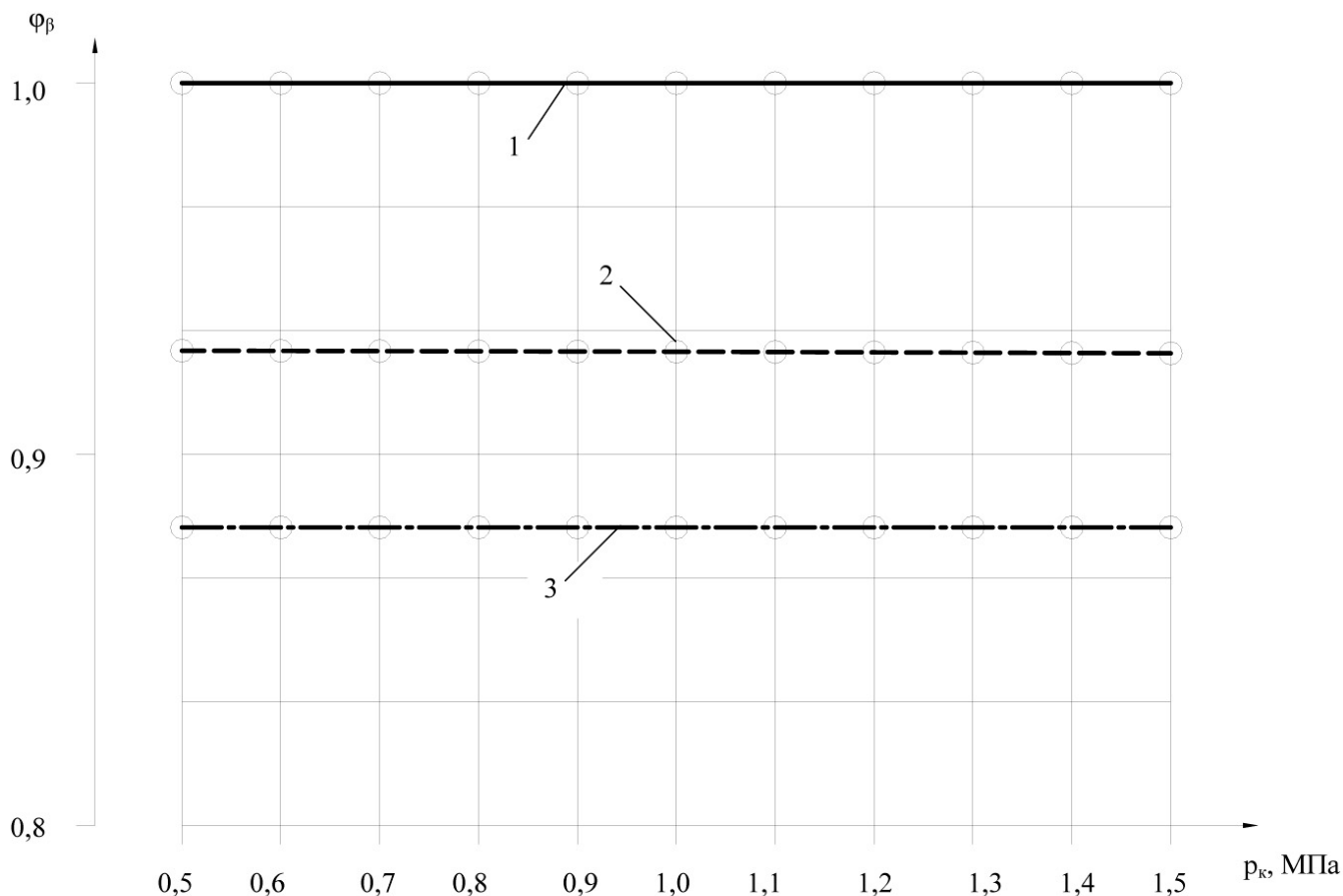


Рис. 7 - Зависимость $\phi_\beta = f(p_k)$ для компонентов топлива кислород+керосин, $L_k=50$ мм.
 1 - $\alpha=0,5$, $\alpha=0,64$, $\alpha=1,1$, $d_k=50$ мкм; $\alpha=0,5$, $d_k=70$ мкм; 2 - $\alpha=0,64$, $d_k=70$ мкм; 3 - $\alpha=1,1$, $d_k=70$ мкм.

В то же время, при подаче в КС предварительно подготовленной смеси газообразного кислорода и капле жидкого горючего процесс смешения компонентов практически завершается уже во входном сечении, и в дальнейшем происходит полное сгорание топлива.

Таким образом, проведенные комплексные расчётные исследования характеристик рабочего процесса в КС РДМТ с использованием в качестве влияющих факторов геометрических и режимных параметров позволили изучить зависимости расходного комплекса от тонкости распыления горючего, коэффициента избытка окислителя, длины камеры сгорания РДМТ.

Литература

1. Математическая модель и расчет характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан-кислород // А.В.Новиков, В.А.Буркальцев, Д.А.Ягодников и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. <http://www.technomag.edu.ru/doc/270659.html>

Машиностроение. Теория и практика современного ракетного двигателестроения.- 2004.- С. 8- 17.

2. Дубовкин Н.Ф., Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.

3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник: В 10 Т. / Под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971 – 1979. – Т.1 – 266 с.

4. Н.Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, 2-ое издание. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

5. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. “Астра – 4”, версия 1.06, январь 1991// Описание. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 1992.

Calculation studies on optimization of the diagram and parameters of propellant components supply into RDMT combustion chamber which works on gaseous oxygen-kerosene

77-30569/270659

12, December 2011

Yagodnikov D.M., Novikov A.V., Antonov Yu.V.

Bauman Moscow State Technical University

daj@mx.bmstu.ru

arnov@power.bmstu.ru

antonov@bmstu.ru

The authors consider parametric studies of different factors' influence on the working process characteristics in the combustion chamber(CC) of rocket thruster (RT), which made it possible to formulate recommendations regarding operating regime optimization and CC sizes. The authors obtained calculation dependences of the coefficient of the consumable complex and parameters of the RDMT combustion chamber working process on influencing factors with the use of gaseous oxygen as oxidizer, and kerosene – as a combustible. The authors provide a comparative analysis of the results of using these two components under similar conditions, which made it possible to determine the influence of physical properties of the combustible component on the effectiveness of working process organization.

Publications with keywords: [propellant components](#), [combustion chamber](#), [oxygen-kerosene](#)

Publications with words: [propellant components](#), [combustion chamber](#), [oxygen-kerosene](#)

Reference

1. A.V.Novikov, V.A.Burkal'tsev, D.A.Iagodnikov, et al., Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Ser. Mashinostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Mechanical Engineering Special issue "Theory and practice of modern rocket engine" (2004) 8-17.
2. Dubovkin N.F., Handbook on hydrocarbon fuels and their combustion products, Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 288 p.
3. In: V.P. Glushko (Ed.), Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products: Reference, Vol. 1, Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, 266 p.
4. N.B. Vargaftik, Handbook of thermophysical properties of gases and liquids, Moscow, Nauka, 1972, 720 p.
5. Trusov B.G., MGTU im. N.E. Bauman - BMSTU, Moscow, 1992.