

УДК 532.135: 678.027

**Канд. физ.-мат. наук В. И. Елисеев¹, канд. техн. наук С. Г. Бондаренко¹,
канд. техн. наук А. Ф. Курочкин¹, Т. А. Майорская²,
канд. техн. наук Е. Б. Устименко², канд. техн. наук А. Б. Суровцев¹**

¹ Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск

² ГП «НПО «Павлоградский химический завод», г. Павлоград

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСТООБРАЗНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Проведены экспериментальные и численные исследования течения пастообразных топлив в вискозиметре. Получены реологические характеристики модельных и боевых паст.

Ключевые слова: пастообразное топливо, фильера, гидравлические характеристики.

Введение

Одним из направлений развития современной ракетной техники является создание ракетных двигателей (РД) и газогенераторов (ГГ) с регулируемым режимом работы, где в качестве энергетической композиции рассматривается унитарное ракетное пастообразное топливо. Конструкции таких РД и ГГ позволяют управлять тяговыми характеристиками и вектором движения ракетных летательных аппаратов [1, 2], тем самым обеспечивается эффективность их применения в плане оперативного маневрирования по траектории полета, а также многократности запуска и выключения РД и ГГ [3–5]. Вследствие этого, разработка пастообразных ракетных топлив для регулируемых двигателей и газогенераторов является актуальной задачей при разработке двигателей оперативно управляемых летательных аппаратов. Применение пастообразных ракетных топлив приобрело в настоящее время также значительный интерес и в связи с технологичностью его изготовления, большей безопасностью хранения и более широкими возможностями регулирования подачи в камеры сгорания. Как показано в [6] конструкция ракетных двигателей с регулируемой тягой или изменяемым расходом рабочего тела, в качестве которого используется пастообразное топливо, позволяет осуществлять 80-кратное изменение энергетических параметров при регулировании. Возможность глубокого дросселирования основана на нелинейном законе зависимости расхода от перепада давления, что является признаком неньютоновского поведения жидкости. Наиболее подходящими композициями для применения в качестве пастообразного ракетного топлива являются смеси таких веществ как жидкий неотвержденный полимер и кислородосодержащий порошкообразный окислитель в соотношении от 1:5 до 3:7 по

массе. В качестве кислородосодержащего окислителя предпочтительно использование, например, перхлората аммония, отличающегося физико-химической стабильностью, высоким кислородным балансом и низкой гигроскопичностью. Для получения повышенных энергетических характеристик в пастообразных композициях возможно применение до 15 % таких добавок как порошки алюминия, магния, титана, бора, а также других порошкообразных и жидких веществ с высокой энтальпией образования. Технологические добавки в пастообразных композициях обеспечивают необходимые реологические характеристики и определенную скорость горения.

Согласно [7] для того, чтобы паста или высококонцентрированная суспензия обладала неньютоновскими свойствами, в частности степенными, необходимо, чтобы жидкость, в которой находятся частицы, обладала такими же качественными характеристиками. Это позволяет в какой-то степени моделировать пасту, зная характеристики связующей жидкости. В работе [8, 9] на примере текущих высоконаполненных полимерных композиций и опытных пастообразных топливных композиций, содержащих в качестве связующей жидкости неотвержденный полимер, приведены результаты исследований реологических характеристик и определена нелинейная зависимость параметров истечения от нагружающих воздействий. Практические результаты исследований в совокупности с положениями теории поверхностного взаимодействия частиц со связующим материалом, представленные в работе [10], позволяют разработать методы создания паст, которые и легли в основу получения пастообразных композиций ракетных топлив. Однако, несмотря на разработанные научные основы, вопрос о реологических характеристиках решается, в основном, экспериментально с применением

определенных математических операций [11]. В данной работе, используя известную методику обработки экспериментальных результатов и разработанные авторами численные решения уравнений Навье-Стокса для течений степенных жидкостей [12], определим реологические характеристики полученных модельных и ракетных топливных пастообразных композиций.

Некоторые математические аспекты при определении реологических характеристик пастообразных топливных композиций

При создании математических моделей жидкостей важное значение имеет связь между компонентами тензора напряжений (девиаторная часть τ_{ij}) и компонентами тензора скоростей (s_{ij}). Для вязких неупругих жидкостей она может быть записана как:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij}, \quad (1)$$

где μ – скалярная величина. При μ не зависящей от параметров движения жидкость называется ньютоновской. В более общем случае величина вязкости μ зависит от градиентов скоростей, т. е. от компонентов тензора скоростей. Принимая во внимание, что вязкость является скалярной величиной полагают [13], что $\mu = \mu\left(\frac{I}{2}\right)$, где I второй инвариант тензора скоростей, который в цилиндрической осесимметричной системе может быть записан в виде [14]:

$$\frac{I_2}{2} = 2\left[\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r}\right)^2, \quad (2)$$

где x – осевая координата; r – радиус; u , v – проекции скорости соответственно на оси x и r . Одной из простых и удобных для анализа математических моделей вязкой неупругой жидкости является модель Освальда-де-Вилля (степенная жидкость), которая получила широкое распространение благодаря тому, что многие концентрированные суспензии и пасты обладают этим свойством. В этом случае реологический закон может быть записан в виде:

$$\mu = K(I_2/2)^{\frac{m-1}{2}}, \quad (3)$$

где K – постоянный коэффициент (постоянная консистенции); m – также постоянная величина (индекс течения). Полными уравнениями, описывающими осесимметричное течение несжимаемой жидкости, являются уравнения Навье-Стокса, имеющие вид:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial r}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial(r\tau_{xr})}{r\partial r},$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial r}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{\partial(r\tau_{rr})}{r\partial r} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r},$$

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

где $\tau_{xx} = 2\mu\frac{\partial u}{\partial x}$, $\tau_{xr} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$, $\tau_{rr} = 2\mu\frac{\partial v}{\partial r}$,
 $\tau_{\theta\theta} = 2\mu\frac{v}{r}$.

Для стабилизированного течения производные от скоростей по x и поперечная скорость равны нулю, поэтому второй инвариант в (2) значительно упрощается, в результате чего уравнение движения записывается в виде:

$$K\frac{d}{rdr}\left(r\left|\frac{dv}{dr}\right|^{m-1}\frac{dv}{dr}\right) = \frac{dp}{dx}. \quad (5)$$

Это хорошо известное уравнение служит для определения перепада давления в зависимости от расхода жидкости (Q) через длинный цилиндрический канал (l) радиусом R_f . Из решения следует, что

$$\frac{R_f \Delta p}{l} = 2\left(\frac{1+3m}{m}\right)^m K\left(\frac{Q}{\pi R_f^3}\right)^m. \quad (6)$$

Уравнение (6) практически служит для установления реологических постоянных при течении степенных жидкостей. В литературе, например [11], принято использовать это уравнение в несколько ином виде:

$$\tau_w = \bar{K}\gamma_{ef}^m, \quad (7)$$

где $\tau_w = \frac{R_f \Delta p}{2l}$, $\gamma_{ef} = \frac{4Q}{\pi R_f^3}$, тогда связь между K

и \bar{K} определяется зависимостью:

$$K = \left(\frac{4m}{3m+1}\right)\bar{K}. \quad (8)$$

Величину \bar{K} также называют постоянной консистенции, поэтому при численном анализе течения степенной жидкости необходимо учитывать

соотношение (8). Еще одним важным обстоятельством при установлении реологических параметров паст является поправка Бэгли (n_B), которая вводится в зависимость между перепадом давления и напряжением трения:

$$\Delta p = 2\tau_W \left(\frac{l}{R_f} + n_B \right). \quad (9)$$

С помощью этой безразмерной величины учитывается поджатие текущей жидкости в вискозиметре из широкой части канала в узкую. Поправка определяется либо экспериментально, либо из решения уравнений Навье-Стокса (4). Она может играть заметную роль в нахождении или в пересчете расходных характеристик для фильерных блоков (устройство для равномерного распределения пастообразного топлива, подающегося системой подачи из бака в камеру сгорания). Таким образом, изложенные аспекты важны для получения более точных параметров течения.

Экспериментальное исследование пастообразных топливных композиций и определение реологических параметров

Реологические параметры экспериментальных ракетных (ЭПТ) и модельных (МПТ – здесь наполнитель перхлорат аммония заменен на безопасный и негорючий хлорид калия такой же фракции) пастообразных топливных композиций устанавливались на специально разработанном и изготовленном на ГП «НПО «Павлоградский химический завод» приборе, показанном на рис. 1.

Эксперименты на указанном приборе заключались в продавливании паст через фильеру (узкий канал), при этом на силовой машине типа Lloyd 05 задавалась скорость движения поршня и определялось развиваемое при этом усилие. В результате этих измерений получены следующие экспериментальные данные (табл. 1). Приведены значения параметров тех паст, которые оказались более удачными в плане их близости к степенным жидкостям.



а



б

Рис. 1. Фото измерительной оснастки прибора для определения реологических параметров: а – общий вид; б – детализовка

Таблица 1 – Значения усилий при движении поршня в вискозиметре (эксперимент)

МПТ (модельная паста) при 20 °С		МПТ (модельная паста) при 28 °С	
U_{por} , мм/мин	P , Н	U_{por} , мм/мин	P , Н
10	2000	10	1900
30	2870	30	2800
50	3400	50	3220
100	4300	100	4100

ЭПТ-111 при 20 °С		ЭПТ-111-Д при 32 °С	
50	1165	10	920
100	1430	30	1333
150	1660	50	1470
200	1810	100	1766
250	1940		

ЭПТ-115 при 20 °С		ЭПТ-115 при 26 °С	
30	1440	30	1250
50	1736	50	1420
100	2171	100	1710

Таблица 2 – Значения реологических параметров паст

Паста	m	K (без n_B)	K (с учетом n_B)	ε_{\max} (%)
МПТ (20 °С)	0,332	8666,1	7982,8	< 1,00
МПТ (28 °С)	0,332	8307,5	7652,3	1,75
ЭПТ-111 (20 °С)	0,320	3132,5	2868,0	1,24
ЭПТ-111-Д (32 °С)	0,282	4846,9	4388,7	4,05
ЭПТ-115 (20 °С)	0,340	4209,1	3880,8	< 1,00
ЭПТ-115 (26 °С)	0,261	5199,5	4745,9	< 1,00

Здесь U_{por} – скорость поршня; P – сила. При обработке этих данных методом наименьших квадратов, получены: значения m , K и максимальная погрешность ε_{\max} (табл. 2).

Из приведенных величин видно, что разработанные пасты в рассмотренных диапазонах изменения параметров ведут себя как степенные жидкости со своими постоянными консистенции. На рис. 2 для наглядности приведены кривые τ от γ , построенные по аппроксимационным зависимостям вида (7). Из рисунка хорошо видно, что аппроксимационные кривые практически проходят по соответствующим экспериментальным точкам, вследствие чего приведенная в таблице максимальная погрешность оказывается небольшой.

Обработка экспериментальных данных велась без учета поправки Бэгли. Для того, чтобы получить этот коэффициент необходимо провести расчеты полных уравнений Навье-Стокса с указанными параметрами, определить коэффициент n_B , после чего вновь повторить обработку при-

веденных выше экспериментальных значений, уточнить искомые параметры, а затем вновь повторить расчеты по полной схеме. В результате таких последовательных приближений (достаточно двух) можно определить реологические параметры, а также параметры течения в канале вискозиметра, после чего можно рассчитывать и параметры течения в фильтрном блоке.

Результаты расчетов. Уточнение реологических параметров

Проведенные численные расчеты уравнений Навье-Стокса (4) и дальнейшее уточнение реологических параметров показало, что значение коэффициента m не изменяется в связи с введением в обработку выписанных выше экспериментальных данных поправки Бэгли. Постоянная консистенции при этом несколько изменяется (третья колонка табл. 2). Для определения точности расчетов приведем значения развиваемой поршнем силы, полученные в расчетах для исследуемых паст при скорости поршня $U_{por} = 100$ мм/мин.

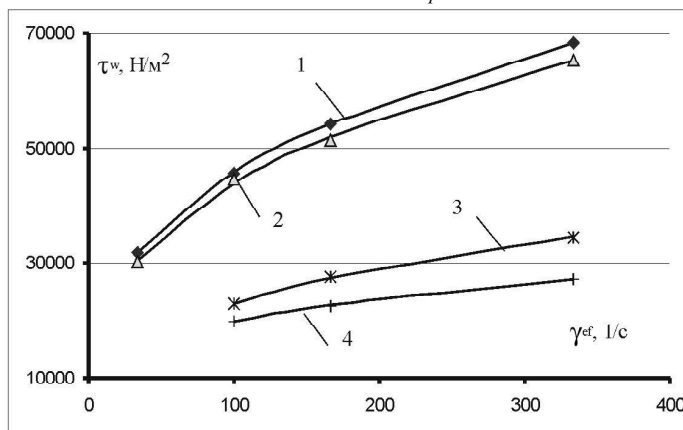


Рис. 2. Зависимость напряжения трения τ от величины γ : точки – эксперимент; кривая 1 –МПТ – 20 °С; 2 – МПТ – 28 °С; 3 – ЭПТ-115 – 20 °С; 4 – ЭПТ-115 – 26 °С

Таблица 3 – Сравнение усилий при движении поршня в вискозиметре

Паста	P (эксп)	P (без n_B)	P (с учетом n_B)
МПП (20 °С)	4300	4690,6	4319,7
МПП (28 °С)	4100	4497,3	4141,8
ЭПТ-111 (20 °С)	1430	1584,4	1450,5
ЭПТ-111-Д (32 °С)	1766	1984,1	1797,3
ЭПТ-115 (20 °С)	2171	2383,4	2198,2
ЭПТ-115 (26 °С)	1710	1863,3	1700,4

В первой колонке табл. 3 приведены величины, взятые из эксперимента, во второй — найденные из расчетов полных уравнений (4) с постоянной консистенции, определенной без поправки Бэгли. В третьей также рассчитанные по полным уравнениям, но с уточненными значениями K . Из этой таблицы видно, что при найденных значениях K без поправки Бэгли точность расчетов составляет ~ 10 %, с поправкой Бэгли и с уточненной постоянной консистенции точность расчета возрастает. Это показывает, что даже для высоковязких сред с небольшими скоростями движения внезапное сужение канала оказывает заметное влияние на гидродинамику течения и соответственно на общий перепад давления, что необходимо учитывать при расчете фильерного блока.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований, математической обработки и численных расчетов были получены необходимые характеристики и параметры течения пастообразных топливных композиций, которые могут быть использованы для расчетов фильерных блоков при проектировании перспективных ракетных двигателей на пастообразном топливе.

Список литературы

1. Иванченко А. Н. Состояние разработки дросселируемых ракетных двигательных установок на унитарном пастообразном топливе / А. Н. Иванченко, С. Г. Бондаренко // Проблемы высокотемпературной техники. Днепропетровск : РИО ДНУ. — 2007. — С. 40–50.
2. Призваны временем. Ракеты и космические аппараты Конструкторского бюро «Южное» / [под общ. ред. С. Н. Конюхова]. — Д. : АРТ-ПРЕСС, 2004. — 232 с.
3. Бондаренко С. Г. К оценке энергетической эффективности ракетных двигателей на пастообразном топливе с глубоким дросселированием / С. Г. Бондаренко, П. Г. Хорольский, Л. В. Адамчик // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 7(54). — С. 148–150.
4. Hodge K. Gelled Propellants for Tactical Missile Applications / K. Hodge, T. Crofoot, S. Nelson / Joint Propulsion Conference & Exhibit. — 1999. — 7 p.
5. Bayern-Chemie Offers Gel-Based Rocket Propellant / Defense Update, Lance & Shield Ltd. — 2009. — 2 p.
6. Іванченко А. М. Особливості ракетної рушійної установки на пастоподібному паливі / Іванченко А. М. // Космічна наука і технологія, 1999. — Т. 5. — № 4. — С. 3–10.
7. Урьев Н. Б. Текучесть суспензий и порошков / Н. Б. Урьев, А. А. Потанин. — М. : Химия, 1979. — 256 с.
8. Третьяков К. О. Залежність реологічних характеристик пастоподібного ракетного палива від дисперсності наповнювача, концентрації наповнювача і ПАР / К. О. Третьяков, О. В. Потупа, С. Г. Огинський, О. Ф. Курочкин, О. Б. Суровцев // Вопросы химии и химической технологии. — Д. : УДХТУ. — 2006. — № 3. — С. 158–163.
9. Устименко Е. Б. Высокоэнергетические композиции для ракетных двигателей и газогенераторов с регулируемым режимом работы / Устименко Е. Б., Шиман Л. Н., Подкаменная Л. И. // Системи озброєння і військова техніка. — 2010. — № 2. — С. 170–173.
10. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров / Ю. С. Липатов. — М. : Химия, 1977. — 303 с.
11. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров / Чанг Дей Хан. — М. : Химия, 1979. — 368 с.
12. Rocket propulsion using unitary paste-like propellant. Experimental investigation of paste-like propellant and results of PRM fire tests / [S.G. Bondarenko, V. I. Eliseev, Yu.V. Protsan etc.]. — Prog. of 61-th International Astronautical Congress (IAC-10.C4.1.9), 27 September–1 October 2010. Prague, Czech Republic. — 27 p.
13. Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Марруччи. — М. : Мир, 1978. — 310 с.
14. Янков В. И. Процессы переработки волокнообразующих полимеров (методы расчетов) / В. И. Янков, В. П. Первадчук, В. И. Боярченко. — М. : Химия, 1989. — 320 с.

Поступила в редакцию 08.09.2011

Єлісеєв В.І., Бондаренко С.Г., Курочкін О.Ф., Майорська Т.О., Устименко Є.Б., Суровцев О.Б. Експериментальні і чисельні дослідження реологічних характеристик пастоподібних паливних композицій

Проведені експериментальні і чисельні дослідження руху пастоподібних палив у віскозиметрі. Отримані характеристики реології модельних й бойових паст.

Ключові слова: пастоподібне паливо, філь'єра, гідравлічні характеристики.

Eliseev V., Bondarenko S., Kurochkin A., Mayorskaya T., Ustimenko E., Surovtsev A. Experimental and numerical research reological descriptions of pasten-like fuel compositions

Experimental and numeral researches of flow of paste-like fuels are conducted in a viscometer-stirrer. Reological descriptions of model and battle pastes are got.

Key words: paste-like fuel, draw-plate, hydraulic descriptions.