

УДК 629.5.064

## **Исследование гидравлических характеристик модельного гелеобразного вещества на основе углеводов**

**Богданович А.Б.\*, Поляков В.А., Волков Е.Н.**

*Корпорация «Московский институт теплотехники»,*

*Березовая аллея, 10, Москва, 127273, Россия*

*\*e-mail: racer3000.92@mail.ru*

### **Аннотация**

В статье представлены результаты исследования гидравлических характеристик модельного гелеобразного вещества. Эксперименты проведены с использованием поршневого вытеснителя для рабочего диапазона температур. Получены экспериментальные зависимости силы, приложенной к поршню, от скорости движения. В результате обработки опытных данных получены зависимости объемного расхода гелеобразного модельного вещества от давления вытеснения.

**Ключевые слова:** модельное гелеобразное вещество, поршневой вытеснитель, дроссель, вязкость, температура, объемный расход, давление вытеснения, степенная зависимость.

В настоящее время особый интерес представляет применение прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) [1] в составе летательного аппарата (ЛА). В данном случае полет ЛА осуществляется по низкой траектории (в пределах атмосферы) с высокой скоростью, соответствующей числам Маха 6 и более [2]. При этом повышается безопасность полета из-за сложности обнаружения и перехвата ЛА.

Известна конструктивная схема ПВРД с газогенераторами на смесевом твердом ракетном топливе (СТРТ). Одной из основных проблем при разработке таких двигателей является обеспечение регулируемой подачи гетерогенного потока продуктов сгорания топлива газогенератора (ГГ) [4, 5, 6] в камеру дожигания ПВРД, куда поступает воздушный поток из окружающей среды. Сложность этого вопроса связана с высоким содержанием конденсированной фазы (до 70 % по массе) в продуктах сгорания топлива ГГ, высокой температурой (до 3200 К) [7, 8] и большим временем работы ПВРД (более 2000 с). Последнее требует разработки надежной системы тепловой защиты конструкции ПВРД.

В случае применения в ПВРД гелеобразного горючего (на основе углеводородов) [9, 10, 11, 12, 13], воспламенение и горение которого происходят при контакте с воздухом, согласно расчету [14, 15, 16] необходимая масса гелеобразного топлива, за счет отсутствия окислительных элементов, меньше на 20 % по сравнению с вариантом применения СТРТ в составе ГГ. При этом, для обеспечения заданной полноты сгорания, необходимо обеспечить расчетную дисперсность частиц горючего вещества, воспламеняющихся и горящих в потоке

воздуха в камере сгорания (КС). Рабочий диапазон температур гелеобразного горючего вещества в ПВРД +3 °С...+35 °С.

Применение гелеобразного вещества повышает плотность компоновки ЛА [17, 18] и обеспечивает возможность оптимизации веса всего изделия.

В ПВРД на гелеобразном веществе регулируется расход гелеобразного горючего вещества с температурой  $\approx 20$  °С.

В настоящей работе для рабочего диапазона температур проведено экспериментальное исследование гидравлических характеристик модельного гелеобразного вещества, имеющего при температуре +5 °С динамическую вязкость  $\sim 100$  Па·с и при температуре +60 °С –  $\sim 0,024$  Па·с. Получены зависимости объемного расхода гелеобразного вещества [19, 20, 21] от давления вытеснения.

Условия проведения экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Условия проведения экспериментов

Параметр	Значение
Температура модельного гелеобразного вещества $T_B$ , °С	+3, +5, +23, +35
Диапазон давлений вытеснения $p_B$ , МПа	0,02...6

В эксперименте использовано оборудование:

- универсальная испытательная машина Hegewald & Peschke Inspekt 20 (рис. 1);
- персональный компьютер (ПК);
- поршневой вытеснитель (рис. 2), технические характеристики которого приведены в таблице 2;
- расходный дроссель с углом входа  $90^\circ$  и диаметром проходного сечения  $d_{др}=0,62$  мм с коэффициентом расхода  $m \sim 0,8$ . Дроссель использован взамен отсутствующих форсунок [22, 23, 24, 25], которые должны будут обеспечить заданную дисперсность распыла.

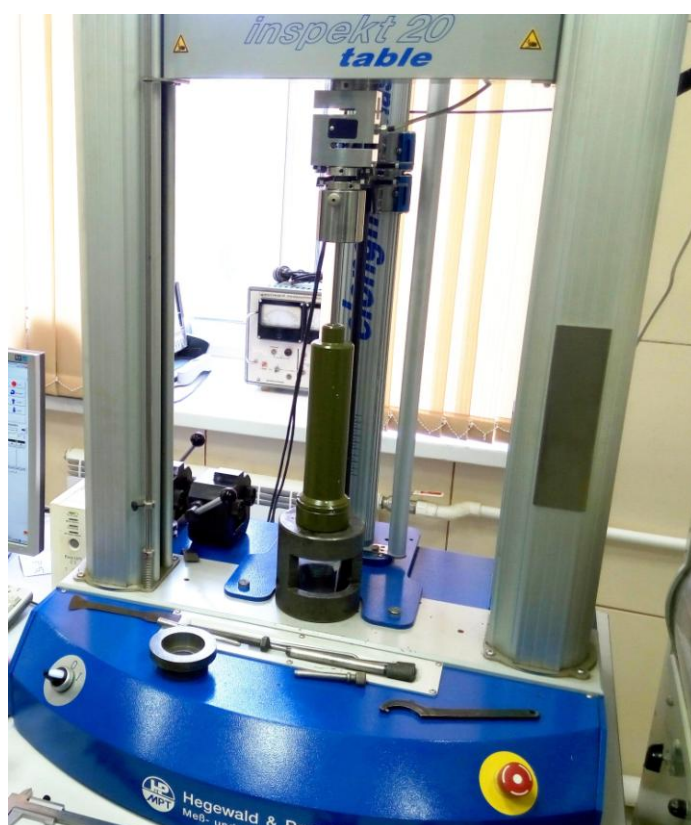


Рис. 1. Универсальная испытательная машина Hegewald & Peschke Inspekt 20.

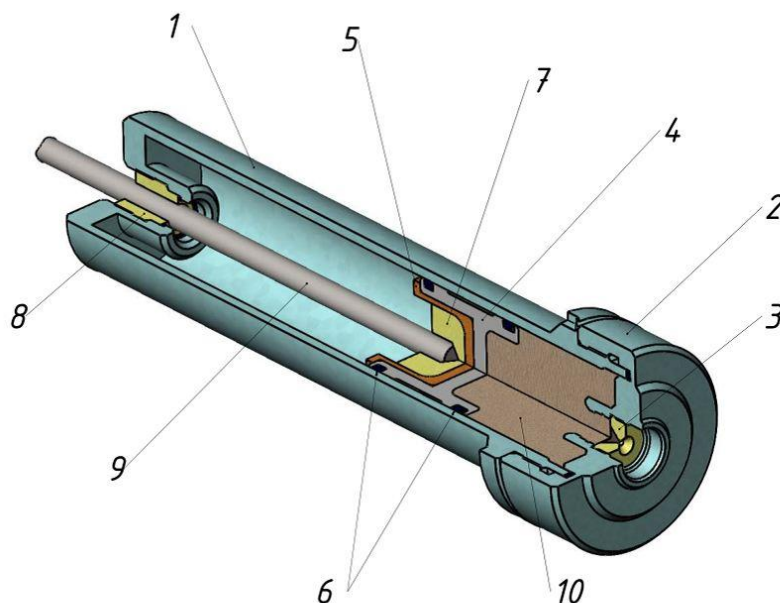


Рис. 2. Поршневой вытеснитель:

- 1 – корпус; 2 – крышка сборная; 3 – расходный дроссель; 4 – поршень;  
 5 – теплозащитное покрытие; 6 – уплотнение; 7 – центрирующая втулка;  
 8 – втулка с наружной резьбой; 9 – шток; 10 – модельное гелеобразное  
 вещество.

Таблица 2

### Технические характеристики вытеснителя

Параметр	Значение
Предельное допустимое рабочее давление, МПа	12,75
Внутренний диаметр корпуса, м	0,045
Объем полости для модельного гелеобразного вещества, м <sup>3</sup>	$3 \cdot 10^{-4}$
Площадь поршня, м <sup>2</sup>	$1,576 \cdot 10^{-3}$
Максимальная длина хода поршня, м	0,17

Заправка вытеснителя веществом проводится перед каждым экспериментом при снятой крышке сборной 2. Поршень 4 сдвинут на  $\sim 0,07$  м, и полость

заполняется модельным гелеобразным веществом в количестве  $\sim 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , после чего устанавливается крышка сборная с дросселем 3. Для удаления включений воздуха из модельного гелеобразного вещества вытеснитель помещается в камеру с температурой  $+45 \text{ }^\circ\text{C}$  на 2 ч с последующим термостатированием до температуры проведения опыта.

В эксперименте вытеснитель с модельным гелеобразным веществом вертикально устанавливается в универсальную испытательную машину. Программа перемещения поршня реализуется с помощью ПК.

Сила трения в уплотнениях поршня определена по результатам опыта без модельного гелеобразного вещества в вытеснителе.

В результате проведенных экспериментов, для рабочего диапазона температур и при постоянной скорости движения поршня  $V_{\text{п}}$ , получены опытные зависимости силы поршня  $N_{\text{п}}$  от его перемещения  $h_{\text{п}}$ .

На рис. 3 приведена одна из полученных зависимостей  $N_{\text{п}}=f(h_{\text{п}})$ , соответствующая температуре вещества  $T_{\text{в}}=35 \text{ }^\circ\text{C}$  и скорости движения  $V_{\text{п}}=3,33 \text{ мм/с}$ .

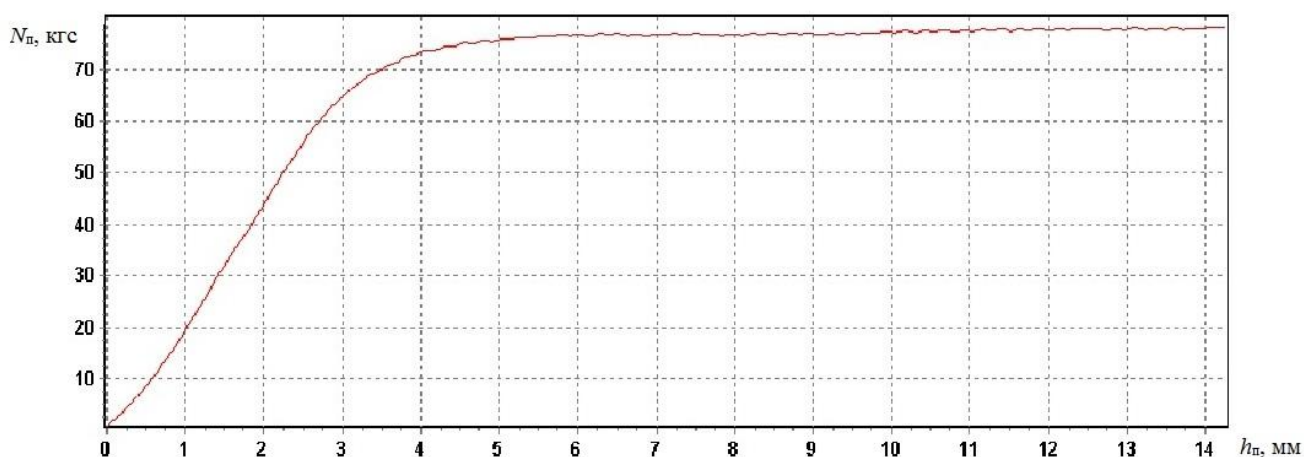


Рис. 3. Зависимость силы поршня от перемещения.

Значение силы, прикладываемой к поршню, определено на установившемся участке вытеснения вещества (на рис. 3  $t_{уст} = 5 \dots 14$  с)

Зависимости  $N_{п} = f(h_{п})$  использованы для построения графиков  $N_{п} = f(V_{п})$  (рис. 4).

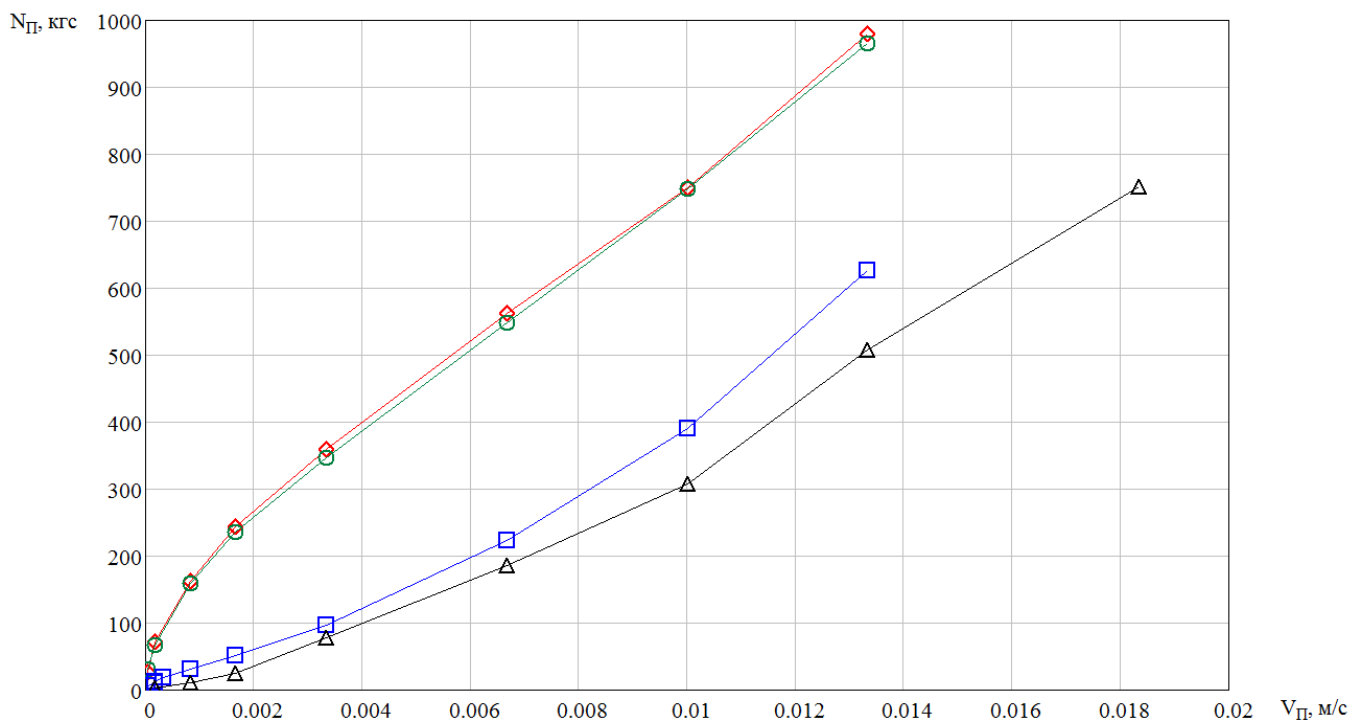


Рис. 4. Зависимости силы поршня от скорости движения:  
 ◇ – при температуре +35 °С; ○ – при температуре +23 °С;  
 □ – при температуре +5 °С; Δ – при температуре +3 °С.

При известных площади поршня  $S_{п}$ , скорости движения  $V_{п}$  и силе  $N_{п}$  давление вытеснения модельного гелеобразного вещества и его объемный расход определены по формулам:

$$p_{в} = \frac{N_{п}}{S_{п}}, \quad (1)$$

$$Q_{в} = V_{п} \cdot S_{п}. \quad (2)$$

По результатам эксперимента, с применением [26], была подобрана степенная зависимость (3) объемного расхода модельного гелеобразного вещества от давления вытеснения.



$$Q_B = k_T \cdot \mu \cdot F_{др} \cdot \left( \frac{p_B}{98066,5} \right)^n, \quad (3)$$

где  $k_T = f(T_H)$  – эмпирический коэффициент, учитывающий зависимость вязкости гелеобразного вещества от температуры, м/с;

$m$  – коэффициент расхода дросселя;

$F_{др}$  – минимальная площадь проходного сечения расходного дросселя, м<sup>2</sup>;

$p_B$  – давление подачи, Па;

$n$  – показатель степени, равный 0,8 для температур вещества +23 °С и +35 °С и равный 1,5 для температур +3 °С и +5 °С.

В результате проведенных исследований получены опытные значения и расчетные кривые (по формуле (3))  $Q_B = f(p_B)$ , построенные на рис. 5.

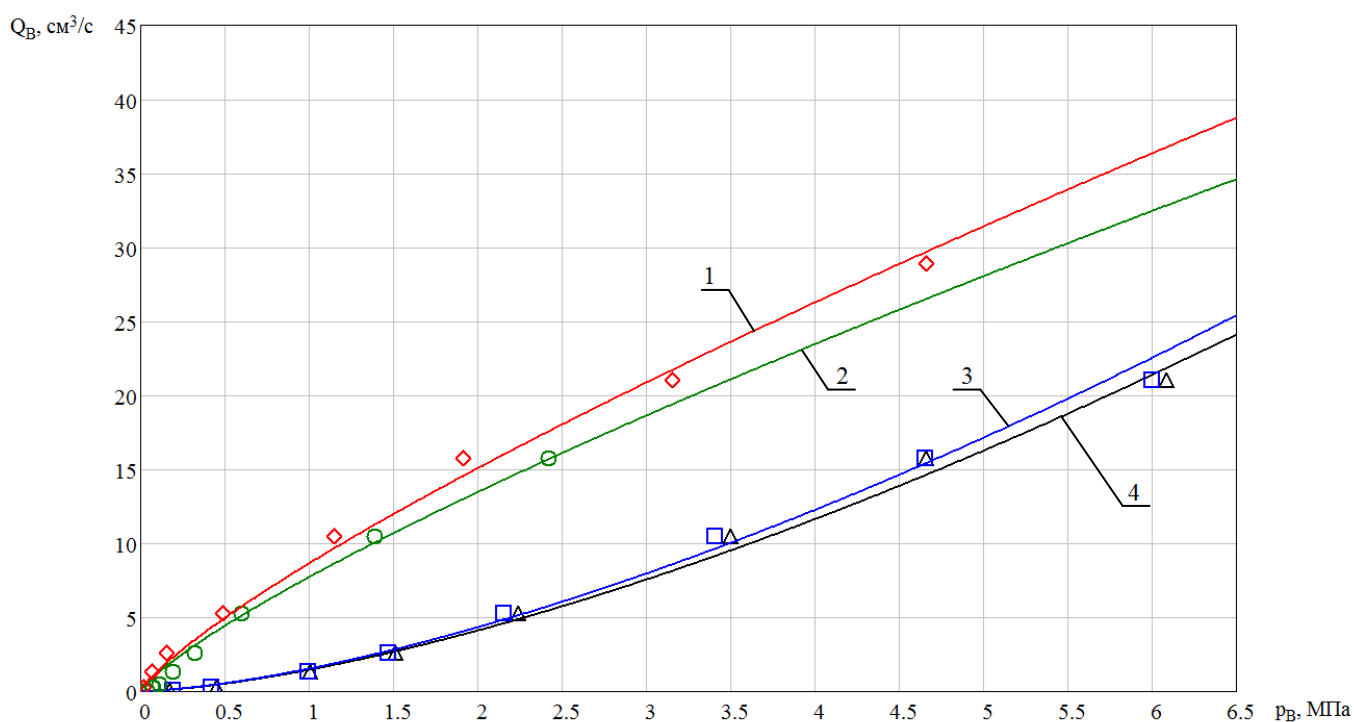


Рис. 5. Зависимости объемного расхода вещества  $Q_B$  от давления вытеснения  $p_B$ .

Условия опытов приведены в таблице 2.

### Условия проведения опытов

Опыт (обозначение)	Расчет (№ кривой)	Температура $T_B$ , °С
◇	1	35
○	2	23
□	3	5
△	4	3

Значения коэффициента  $k_T$  и показателя степени  $n$  для расчета по формуле (3) представлены в таблице 3.

Таблица 3

#### Значения коэффициента $k_T$ и показателя степени $n$

Температура вещества $T_B$ , °С	Эмпирический коэффициент $k_T$ , м/с	Показатель степени $n$ , –
3	0,185	1,5
5	0,195	1,5
23	5	0,8
35	5,6	0,8

Анализ рис. 5 показывает удовлетворительное совпадение результатов расчета по формуле (3) с опытом. Отличие не превышает 6 %.

Результаты проведенных исследований необходимы для разработки системы подачи гелеобразного топлива в камеру сгорания с целью выполнения требований по тягово-энергетическим характеристикам ПВРД.



## Выводы

1. Разработана методика расчетно-экспериментального определения расходных характеристик гелеобразных веществ, моделирующих по вязкости и составу гелеобразные топлива, с использованием поршневого вытеснителя.
2. На основе анализа экспериментальных данных получена зависимость объемного расхода гелеобразного вещества, моделирующего топливо, от давления вытеснения.
3. Отличие значений расхода  $Q_B$ , по полученной формуле (3), от опытных величин не превышает 6 %.

## Библиографический список

1. Карасев В.Н., Левин В.М. Моделирование тяговых характеристик прямооточного воздушно-реактивного двигателя для больших сверхзвуковых скоростей полета // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36551>
2. Зуев В.С., Макарон В.С. Теория прямооточных и ракетно-прямоточных двигателей. - М.: Машиностроение, 1971. – 368 с.
3. Обносков Б.В., Сорокин В.А., Яновский Л.С. и др. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 303 с.
4. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. - М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

5. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива. - М.: Машиностроение, 1995. – 400 с.
6. Веницкий А.М. Ракетные двигатели на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1973. – 348 с.
7. Панин С.Д., Румянцев Б.В., Шишков А.А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник. - М.: Машиностроение, 1989. – 420 с.
8. Рогов Н.Г., Ищенко М.А. Смесевые ракетные твердые топлива: компоненты. Требования. Свойства. - СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2005. – 195 с.
9. Авдиенко А.А., Григорьян С.С., Финагин А.В. Рабочие процессы и проектирование ракетных двигателей на пастообразном топливе. Учебное пособие. - Саратов: Саратовское ВВКИУ ракетных войск, 1996. – 125 с.
10. Shai R., Benveniste N. The Status of Gel Propellants, Combustion of Energetic Material, 2000, 24 p.
11. Teipel U., Foerter-Barth U. Mechanical Properties of Gel Propellants with Nanoparticles // Journal of Energetic Materials, 2004, vol.22, no. 2. pp. 69 - 82.
12. Shai R., Peterz Arie, Benveniste N. Rheological Matching of Gel Propellants // Journal of Propulsion and Power, 2010, vol. 26, no. 2, pp. 376 – 378.
13. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология Полимеров. - М.: Химия, 1977. – 440 с.
14. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1979. – 392 с.

15. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 463 с.
16. Абугов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. - М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
17. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Козлов В.А., Суриков Е. В. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твёрдых и пастообразных топливах. - М.: Физматлит, 2010. – 320 с.
18. Maydanuk D.V. Bondarenko S.G., Ivanchenko A.N., Protsan Yu.V. Rocket propulsion using unitary paste-like propellant. Analysis of mass efficiency for applications in the composition of landing units and upper stages of launch vehicles // Proc. of 60-th International Astronautical Congress (IAC-09-C4.2), 12-16 October 2009, DaeJeon, Republic of Korea, pp. 6.
19. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. - М.: Мир, 1964. – 216 с.
20. Шульман З.П., Берковский П.М. Пограничный слой неньютоновских жидкостей. - Минск: Наука и техника, 1966. – 239 с.
21. Шищенко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промывочных жидкостей. - М.: Недра, 1976. – 294 с.
22. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. - М.: Наука, 1965. – 432 с.
23. Палин Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. - М.: Химия, 1984. – 248 с.
24. Rahimi S., Natan B. The Flow of Gel Fuels in Tapered Injectors // Journal of Propulsion and Power, vol. 16, no. 3, 2000, pp. 458 - 471.

25. Rahimi S., Natan B. Numerical Solution of the Flow of Power Law Gel Propellants in Converging Injectors // Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2000, vol. 25, no. 4, pp. 203 - 212.
26. Башта Т.М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. - М.: Оборонгиз, 1961. – 475 с.