

УДК621.454.2

Я. Г. БАХМЕТ

Пекинский аэрокосмический университет, г. Пекин, Китай

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ЖРД

В работе показаны результаты численных экспериментов работы регулятора расхода прямого действия, включающего в себя два основных элемента: дроссельную часть, обеспечивающую изменение сопротивления магистрали и золотниковую, стабилизирующую перепад давления на дросселе. На основании представленной математической модели проведены численные факторные эксперименты с построением регрессионных моделей. Построены зависимости расхода жидкости и перепада давления регулятора от выбранных конструктивных факторов при коэффициенте статизма равном нулю. Представлены результаты анализа точности построенных моделей и степень влияния выбранных факторов на работу регулятора расхода. Полученные результаты могут быть использованы как рекомендации при проектировании регуляторов расхода.

**Ключевые слова:** регулятор расхода, ЖРД, статическая характеристика, дроссель, золотник, геометрические параметры, регрессионная модель, факторный эксперимент.

### Введение

Регуляторы расхода (РР) прямого действия для ЖРД, применяемых для разгонных блоков, обеспечивают стабильность режимов работы двигателей и возможность варьирования тягой по необходимому алгоритму. Такие РР могут обеспечить устойчивую подачу компонентов топлива в камеру сгорания, поддерживать постоянный расход при изменении перепадов давления в системе.

Рост мощности и тяговооруженности систем ЖРД приводит к росту затрат на экспериментальные исследования при проектировании РР. В этом случае становится актуальной задача замены экспериментальной отработки РР численным экспериментом.

### 1. Характеристики и проектирование регуляторов расхода

Как показано в работе [1], при проектировании регуляторов расхода (РР) различают несколько видов его характеристик. Одна из таких характеристик – статическая, которая определяет зависимость расхода через регулятор от перепада давления на нем:  $G = f(\Delta P)$ . Неубывающая такая характеристика является предпочтительней для РР, так как не приводит к автоколебательным режимам в отличие от убывающей характеристики, называемой характеристикой с отрицательным статизмом.

Проектирование РР и заключается в обоснованном выборе конструктивных параметров РР,

обеспечивающих необходимую статическую характеристику с положительным статизмом.

Представленные результаты в данной работе являются продолжением исследований приведенных в работе [1].

#### 1.1. Описание регулятора расхода

В качестве исследуемого РР выбрана конструкция, предложенная в работе [2]. Конструкция (рис. 1) включает в себя два основных элемента: дроссельную часть, обеспечивающую требуемый закон изменения расхода в процессе работы двигателя и золотниковую, стабилизирующую перепад давления на дросселе [1]. Важным элементов конструкции является пружина, создающая дополнительное компенсирующее усилие при перемещении золотника.

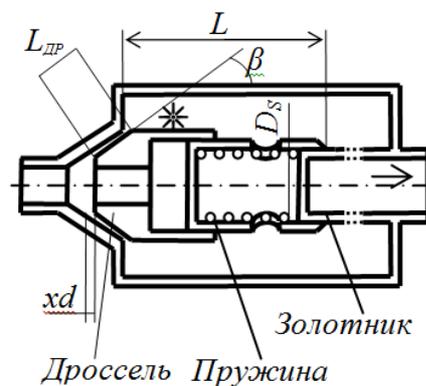


Рис. 1. Элементы конструкции

При изменении перепада давления на регуляторе положение золотника и площадь золотниковых отверстий изменяются таким образом, что влияние изменения перепада давления на расход компенсируется влиянием изменения площади золотниковых отверстий. За счет этого перепад давления на дроссельной части регулятора расхода остается практически постоянным, и, как следствие, изменения расхода через регулятор при изменении перепада не происходит.

**1.2. Модель РР**

Рассматриваемая модель [1] включает в себя: уравнение движения жидкости через дроссельную и золотниковую части регулятора, уравнение движение золотника и др. Скорость перемещения золотника определяется его приведёнными перемещаемой массой и трением, параметрами пружины и гидродинамической силой. Представленная математическая модель позволяет построить статическую характеристику РР [1] для выбранных конструктивных параметров. Для характеристики статизма РР использовался коэффициент статизма (производная расхода по перепаду давления на РР):  $PG = \frac{dG}{d\Delta P}$ , характеризующий наклон статической характеристики.

**2. Предварительный эксперимент**

Для всех экспериментов в качестве отклика определялись:

G, кг/с – расход жидкости через регулятор расхода при значении коэффициента статизма равного нулю ( $PG = \frac{dG}{d\Delta P} = 0$ );

$\Delta P$ , Па – перепад давления, при котором коэффициент статизма равнялся нулю ( $PG = 0$ ).

Предварительные эксперименты представляли два этапа:

1 - й этап. В качестве влияющих факторов выбрано 7 параметров, приведенных в таблице 1.

Была проведена серия из 7-ми групп экспериментов. При варьировании выбранного одного фактора для постоянных других факторов в каждой группе строились зависимости перепада давления и расхода от выбранного фактора при нулевом коэффициенте статизма. Как пример приведены графики зависимости от длины образующей конуса дросселя, рис. 2, 3.

Результаты 1-го этапа показали, что влияние выбранных семи факторов на перепад давления и на

расход соответствующие  $PG = 0$  разный. Перепад давления и расход:

1. Увеличиваются с ростом  $x_d, \beta, k, T_{spr}$ .
2. Уменьшаются с ростом  $D_s, L_d$ .
3. Изменяются незначительно с ростом  $L$ .

Таблица 1  
Выбранные основные параметры и их значения

Параметр	Обозначение	Значение
Расстояние между дросселем и золотником, мм	L	75; 85; 95; 105
Смещение конуса дросселя, мм	$x_d$	0,5; 1; 1,5; 2
Диаметр золотника, мм	$D_s$	45; 50; 55; 60
Половина угла конуса дросселя, град	$\beta$	20; 25; 30; 35
Длина образующей конуса дросселя, мм	$L_d$	20; 30; 40; 50
Жесткость пружины, Н/м	k	600; 1200; 1800; 2400
Начальный натяг пружины, Н	$T_{spr}$	30; 50; 70; 90

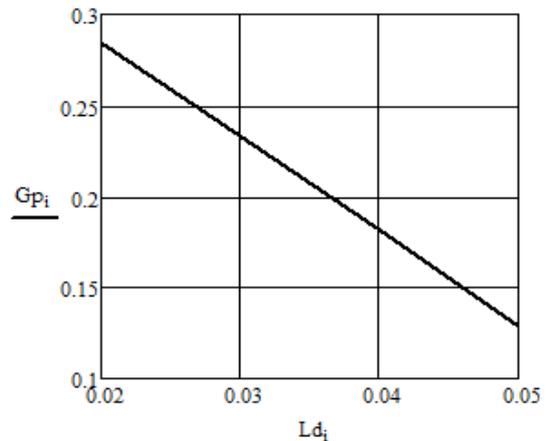


Рис. 2. Зависимость расхода соответствующего  $PG = 0$  от  $L_d$

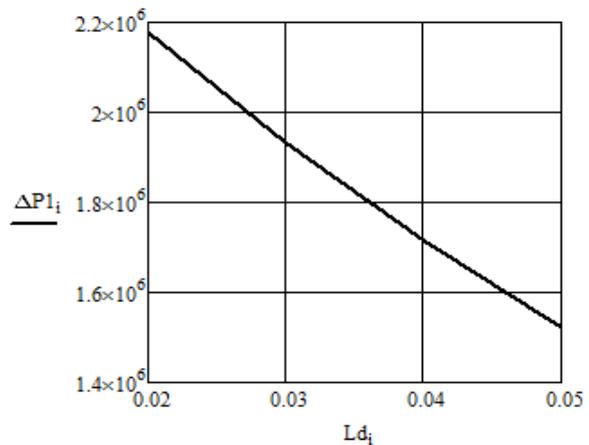


Рис. 3. Зависимость перепада давления соответствующего  $PG = 0$  от  $L_d$

Последний факт объясняется тем, что в выбранной модели [1] расстояние  $L$  определяет потери давления на трение жидкости о корпус в проточной части регулятора, и как составляющая потерь давления в РР на несколько порядков меньше величин, определяющих потери давления на дросселе и золотнике. По оценкам для рассматриваемого РР потери давления составляют:

В проточной части регулятора:  $(2..4) \times 10^2$  Па.

На дросселе:  $(1..3) \times 10^4$  Па.

На золотнике:  $(4..700) \times 10^5$  Па.

2 - й этап. В качестве влияющих факторов выбрано 6 параметров. Изменение каждого из параметров составляло 30% от основного уровня. Выбранный диапазон изменения факторов приведен в таблице 2.

Таблица 2

Параметры и их значения на 2-ом этапе

Параметр	Обозначение	Значение
Смещение конуса дросселя, мм	xd	1,25..1,625
Диаметр золотника, мм	Ds	52,5..68,25
Половина угла конуса дросселя, град	$\beta$	27,5..35,75
Длина образующей конуса дросселя, мм	Ld	35..45,5
Жесткость пружины, Н/м	k	1500..1950
Начальный затяг пружины, Н	Tspr	60..78

Результаты влияния выбранных факторов на расход (ряд 1) и на перепад давления (ряд 2) соответствующих  $PG = 0$  приведены на рис. 4.

Полученные результаты показали, что степень влияния факторов на расход и перепад давления при  $PG = 0$  различные:

1. Наибольшее влияние на выходные величины в сторону увеличения оказывает смещение конуса дросселя.

2. Жесткость пружины в большей степени влияет на перепад давления, чем на расход.

3. Конус дросселя слабо влияет на перепад давления(0,53%) и на расход (0,65%).

4. Наибольшее влияние на выходные величины в сторону уменьшения оказывает длина образующей конуса дросселя.

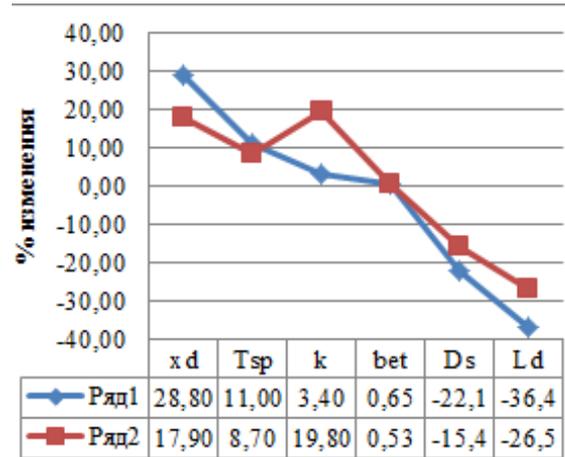


Рис. 4. Влияние на расход (ряд 1) и на перепад давления (ряд 2) соответствующих  $PG = 0$  роста различных факторов

### 3. Построение регрессионных моделей без учета смешанных факторов

Полученные результаты предварительных экспериментов позволили симитировать проведение полного факторного эксперимента. Модель многофакторного эксперимента строилась в зависимости от шести факторов. Кодированные величины соответствовали значениям, приведенным в таблице 3.

Таблица 3

Уровни варьирования факторов

	Обозначение факторов	Основной уровень	Интервал отклонения	Нижний уровень	Верхний уровень
		$X_i^0$	$h_i$	$X_{iH}$	$X_i^0$
xd, мм	$x_1$	1,25	0,75	0,5	2
Ds, мм	$x_2$	52,5	7,5	45	60
$\beta$ , град	$x_3$	27,5	7,5	20	35
Ld, мм	$x_4$	35	15	20	50
k, Н/м	$x_5$	1500	900	600	2400
Tspr, Н	$x_6$	60	30	30	90

Был построен план полного факторного эксперимента  $2^6$ , который содержал 64 опыта.

Рассчитанные отклики обрабатывались по традиционной методике обработки факторного эксперимента [4].

В качестве точности модели использовались:  
- среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma(x)_s = \sqrt{\frac{1}{64} \cdot \sum_{i=1}^{64} (\bar{y}_i - y_i)^2};$$

- наибольшее квадратичное отклонение:

$$\sigma(x)_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 64} \left( (\bar{y}_i - y_i)^2 \right),$$

где  $\bar{y}_i$  - значение отклика, рассчитанное моделью статической характеристики,

$y_i$  - значение отклика, рассчитанное по построенной регрессионной модели.

В качестве относительной погрешности используется доля среднеквадратического отклонения от наибольшего значения параметра.

В кодированных величинах факторов получена модель вида

$$y_G = 0,388 + 0,227 \cdot x_1 - 0,052 \cdot x_2 + 0,003586 \cdot x_3 + 0,0003797 \cdot x_4 + 0,027 \cdot x_5 + 0,08 \cdot x_6.$$

Расчетные погрешности построенной регрессионной модели представлены в таблице 6.

Для перепада давления в кодированных величинах факторов модель имеет вид

$$y_P = 4,629 + 1,577 \cdot x_1 - 0,344 \cdot x_2 + 0,16 \cdot x_3 + 0,238 \cdot x_4 + 1,972 \cdot x_5 + 0,526 \cdot x_6.$$

Расчетные погрешности построенной регрессионной модели представлены в таблице 6.

#### 4. Построение регрессионных моделей с учетом смешанных факторов

Для построения регрессионных моделей с учетом смешанных факторов была построена матрица плана смешанных факторов, которая расширила основную матрицу плана. Расчеты выполнялись для тех же данных, что и при расчете без смешанных факторов.

Для расхода в кодированных величинах факторов с учетом влияния смешанных факторов получена модель вида:

$$y_G = 0,388 + 0,227 \cdot x_1 - 0,052 \cdot x_2 + 0,003586 \cdot x_3 + 0,0003797 \cdot x_4 + 0,027 \cdot x_5 + 0,08 \cdot x_6 -$$

$$-0,03 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,002211 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0006141 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,012 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_6.$$

Расчетные погрешности построенной регрессионной модели представлены в таблице 6.

Числовые коэффициенты модели характеризуют степень влияния факторов на отклик модели, таблица 4.

Для перепада давления в кодированных величинах факторов модель имеет вид

$$y_P = 4,629 + 1,577 \cdot x_1 - 0,344 \cdot x_2 + 0,16 \cdot x_3 + 0,238 \cdot x_4 + 1,972 \cdot x_5 + 0,526 \cdot x_6 + 0,056 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,207 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,111 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,731 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,025 \cdot x_1 \cdot x_6.$$

Степень влияния факторов на перепад давления представлена в таблице 5.

Таблица 4

Влияние факторов по убыванию на расход регулятора расхода

Фактор	Обозначение	Числовой коэффициент	Знак
xd	$x_1$	0,227	+
Tspr	$x_6$	0,08	+
Ds	$x_2$	0,052	-
xd - Tspr	$x_1 x_6$	0,05	+
xd - Ds	$x_1 x_2$	0,03	-
k	$x_5$	0,027	+
xd - k	$x_1 x_5$	0,012	+
$\beta$	$x_3$	0,0035865	+
xd - $\beta$	$x_1 x_3$	0,002211	+
xd - Ld	$x_1 x_4$	0,0006141	-
Ld	$x_4$	0,0003797	+

Расчетные погрешности построенной регрессионной модели представлены в таблице 6.

**Замечание.** Уравнения регрессий построены для кодированных факторов (значения +1,-1). Соотношение между натуральным значением переменного фактора  $x_i$  и его нормализованным значением  $X_i$  выражается зависимостью:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i}.$$

Эти соотношения позволяют построить регрессионные зависимости для реальных значений факторов в интервалах значений:

Таблица 5

Влияние факторов по убыванию на перепад давления регулятора расхода

Фактор	Обозначение	Числовой коэффициент	Знак
k	$x_5$	1,972	+
xd	$x_1$	1,577	+
xd - k	$x_1 x_5$	0,731	+
Tspr	$x_6$	0,526	+
Ds	$x_2$	0,344	-
Ld	$x_4$	0,238	+
xd - $\beta$	$x_1 x_3$	0,207	+
$\beta$	$x_3$	0,16	+
xd - Ld	$x_1 x_4$	0,111	+
xd - Ds	$x_1 x_2$	0,056	+
xd - Tspr	$x_1 x_6$	0,025	+

$$0,5 \text{ мм} \leq xd \leq 2 \text{ мм},$$

$$45 \text{ мм} \leq Ds \leq 60 \text{ мм},$$

$$20^0 \leq \beta \leq 35^0,$$

$$20 \text{ мм} \leq Ld \leq 50 \text{ мм},$$

$$600 \text{ Н/м} \leq k \leq 2400 \text{ Н/м},$$

$$30 \text{ Н} \leq Tspr \leq 90 \text{ Н}.$$

Таблица 6

Погрешности моделей

Наименование	Без смешанных факторов		С учетом смешанных факторов	
	G, кг/с	$\Delta P$ , МПа	G, кг/с	$\Delta P$ , МПа
Наибольшее значение	0,88	12	0,88	12
Наименьшее значение	0,097	1,1	0,097	1,1
Относительная погрешность	7%	11,7%	1,9%	9,8%
$\sigma(\dots)$	0,062	1,4	0,017	1,2
$\Delta_{\max}$	0,11	7,5	0,037	7,9
$\Delta_{\min}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,023	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$

Поступила в редакцию 29.05.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: профессор Джан Лихой, Пекинский аэрокосмический университет, г. Пекин, Китай.

## Выводы

В результате построения моделей было определено:

1. Линейная модель расхода без учета влияния совместных факторов характеризуется относительной погрешностью 7%. Учет смешанных факторов повышает точность до относительной погрешности 1,9%.

2. Линейная модель перепада давления без учета влияния совместных факторов характеризуется относительной погрешностью 11,7%. Учет смешанных факторов повышает точность до относительной погрешности 9,8%. Вполне возможно, что такая точность для модели неудовлетворительна и требуется перейти на модель перепада давления 2-го порядка.

3. Наименьшее влияние на расход оказывают Ld и  $\beta$ , а также совместное действие: xd - Ld, xd -  $\beta$ . Эти факторы можно было бы не учитывать в построении модели.

Наименьшее влияние на перепад давления оказывает  $\beta$ , а также совместное действие: xd - Tspr, xd - Ds, xd - Ld. Эти факторы можно было бы не учитывать в построении модели.

## Литература

1. Бахмет, Я. Г. Построение расходной характеристики регулятора расхода ЖРД [Текст] / Я. Г. Бахмет // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 10 (107). – С. 136-140.
2. Беляев, Е. Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Е. Н. Беляев, В. К. Чванов, В. В. Черваков. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 228 с.
3. Гликман, Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б. Ф. Гликман. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
4. Егоров, А. Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента [Текст] / А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров, А. В. Коваль. – Х.: Вища шк, Изд-во ХГУ, 1986. – 240 с.

## ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА СТАТИЧНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ РЕГУЛЮВАЛЬНИКА ВИТРАТИ РРД

*Я. Г. Бахмет*

У роботі показано результати чисельних експериментів роботи регулювальника витрати прямої дії, який містить два основні елементи: дросельну частину, що забезпечує зміну опору магістралі і золотникову, яка стабілізує перепад тиску на дроселі. На підставі представленої математичної моделі проведено чисельні факторні експерименти з побудовою регресійних моделей. Побудовано залежності витрати рідини і перепаду тиску регулювальника від вибраних конструктивних чинників при коефіцієнті статизма рівному нулю. Представлено результати аналізу точності побудованих моделей і міра впливу вибраних чинників на роботу регулювальника витрати. Отримані результати можуть бути використані як рекомендації при проектуванні регулювальників витрати.

**Ключові слова:** регулятор витрат, РРД, статична характеристика, дросель, золотник, геометричні параметри, регресійна модель, факторний експеримент.

## INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON THE STATIC CHARACTERISTIC OF LRE FLOW CONTROLLER

*I. G. Bakhmet*

In present work shows results of numerical experiments LRE flow controller direct and indirect action, that consider of two main elements: throttle part, which providing changes of resistance line and spool part, which stabilizing the pressure over the throttle. Based on the proposed mathematical model, numerical factorial experiments with the construction of regression models. Dependences that was built on the liquid flow rate and differential pressure of regulator on the selected factors of constructive, with a coefficient equal to zero droop. Results of the analysis of the constructed models accuracy and the degree of selected factors influence to the work of flow regulator. These results can be used as guidelines for designing new flow regulators.

**Key words:** flow controller, LJE, expander, static characteristics, throttle, spool, geometric parameters of the model, regression model, factorial experiment.

**Бахмет Яна Геннадьевна** - аспирант школы «Аэронавтики и астронавтики» Пекинского аэрокосмического университета, г. Пекин, Китай, e-mail: bahmet\_yana@mail.ru.