

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ И БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ В ДРОССЕЛЬНЫХ ОКНАХ ЗОЛОТНИКОВЫХ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ГИЛЬЗАМИ

О.Б. Белоногов

obelonogoff@mail.ru

post@rsce.ru

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв,  
Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров потоков жидкости (коэффициента расхода и числа Рейнольдса) в наливных и сливных дроссельных окнах прямоугольной и сегментной форм золотниковых гидрораспределителей электрогидравлических усилителей с вращающимися гильзами. В основу исследований положены  $\pi$ -теорема размерностей Букингема, а также разработанный автором способ определения этих параметров. На экспериментальной установке получены значения давлений в камерах нагнетания, слива и золотникового гидрораспределителя, перемещений золотникового плунжера и расходов жидкости на выходах соответственно рабочей или сливной камер. С помощью компьютерной программы по полученным экспериментальным значениям идентифицированы условные углы истечения и безразмерные параметры течения потоков жидкости. Предложен итерационный метод расчета безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей электрогидравлических усилителей с вращающимися гильзами

### Ключевые слова

*Электрогидравлический усилитель, золотник, метод идентификации, безразмерный параметр, поток жидкости*

Поступила в редакцию 24.06.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

Основной конструктивной особенностью электрогидравлических усилителей (ЭГУ) рулевых машин (РМ) [1] является известное в ракетостроении размещение золотниковых плунжеров в полых вращающихся осях шестеренных насосов РМ [2], исполняющих роль гильз золотниковых гидрораспределителей (ЗГР).

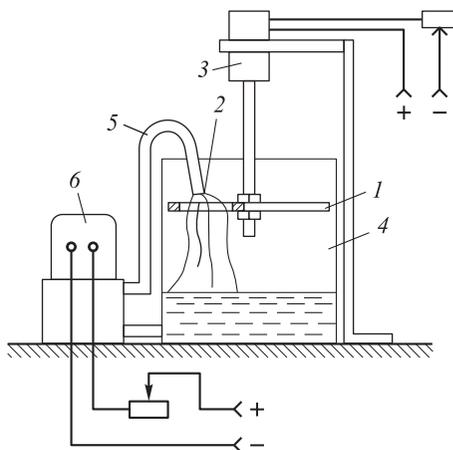
Вследствие этой конструктивной особенности рабочие процессы ЭГУ РМ существенно отличаются от рабочих процессов традиционных гидроприводов, имеющих ЭГУ со стационарными гильзами. Вращение гильз ЗГР в значительной степени влияет на демпфирование золотниковых плунжеров, на гидродинамические силы, действующие на золотниковые плунжеры в процессе функционирования РМ, а также на пропускную способность их дроссельных окон, что приводит к дополнительным потерям энергии потоков [2]. Сходные про-

цессы при движении жидкости во вращающейся изогнутой трубе были названы сверхтурбулентностью и подробно рассмотрены в работе [3].

Влияние перечисленных особенностей рабочих процессов на параметры функционирования ЭГУ РМ изучено недостаточно и крайне затрудняет создание адекватной математической модели. Поэтому в настоящей работе ставятся задачи исследования и идентификации углов истечения и безразмерных параметров течения потоков жидкости, а также задачи разработки итерационного метода расчета параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР с вращающимися гильзами.

**Экспериментальные исследования углов истечения потоков рабочей жидкости в движущихся отверстиях.** Поскольку визуальное наблюдение эффекта вращения золотниковых гильз на углы истечения потоков в дроссельных окнах невозможно, указанный эффект исследовали на экспериментальной установке, позволяющей получать физически подобный процесс в наглядной форме [4]. Схема указанной экспериментальной установки приведена на рис. 1. Круглый диск 1 со сквозными отверстиями 2, жестко связанный с валом электродвигателя 3 постоянного тока, помещали в прозрачный резервуар 4, после чего диск приводился во вращение. К диску под некоторым углом подводили сопло 5, из которого происходило истечение струи жидкости от электронасосного агрегата 6 переменной производительности.

**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования течения жидкости через движущиеся отверстия:  
1 — диск; 2 — сквозное отверстие; 3 — электродвигатель постоянного тока; 4 — прозрачный резервуар; 5 — сопло; 6 — электронасосный агрегат



В процессе эксперимента скорость вращения диска менялась ввиду увеличения или уменьшения напряжения питания приводного электродвигателя постоянного тока, а расход жидкости через сопло регулировался изменением подачи электронасосного агрегата.

Кроме того, в процессе проведения экспериментов толщину диска и размеры сквозных отверстий изменяли путем замены одних экземпляров диска на другие, имеющие разные толщину и размеры сквозных отверстий.

В результате визуальных наблюдений установлено, что при протекании потока жидкости через движущееся отверстие происходит изменение угла истечения потока, обусловленное захватом части потока жидкости стенками отверстий, в результате чего эта часть потока под действием сил инерции, центробежных и кориолисовых сил смещается к углам, образованным набегающей и внешней, а также набегающей и внутренней стенками отверстия. Дальнейшее движение жидкости происходит практически вдоль стенок этих углов, при этом другая часть потока преодолевает сквозные отверстия практически без изменения угла истечения. Вследствие увеличения скорости вращения диска и толщины диска возрастает доля смещаемой части потока жидкости, т. е. увеличивается угол истечения потока. Увеличение ширины отверстий в диске и скорости истечения жидкости из подводного сопла приводит к уменьшению доли смещаемой части потока жидкости и увеличению доли той части потока, которая успевает преодолеть сквозные отверстия без изменения угла наклона, т. е. к ослаблению эффекта увеличения угла истечения потока.

Отметим, что ярко выраженное струйное течение за диском отсутствует и о количественных соотношениях долей потоков можно судить только по следам, оставляемым ими на поверхности объема жидкости, находящейся в прозрачном резервуаре.

**Рабочая гипотеза и описание экспериментов по исследованию процессов течения жидкости через дроссельные окна вращающихся гильз.** На основании проведенных исследований течения потоков жидкости через движущиеся отверстия [4] в качестве рабочей гипотезы были приняты следующие положения.

1. Вращение гильзы ЗГР приводит к приращению углов истечения потоков жидкости в его дроссельных окнах по сравнению с углами истечения, соответствующими стационарной гильзе, при этом углы истечения при стремлении угловой скорости вращения гильзы к бесконечности стремятся к  $\pi/2$ .

2. Вращение гильзы ЗГР приводит к дополнительному сопротивлению течению потоков жидкости в дроссельных окнах из-за изменения траекторий движения частиц жидкости вдоль стенок дроссельных окон и к дополнительному сжатию потоков жидкости в дроссельных окнах, обусловленному действием на потоки набегающих стенок дроссельных окон, центробежных и кориолисовых сил. При этом на основании первого положения рабочей гипотезы изменения параметров течения потоков при стремлении угловой скорости вращения гильзы к бесконечности дополнительные сопротивление и сжатие имеют возрастающий характер с насыщением.

3. На изменение параметров потоков жидкости в дроссельных окнах вращающейся гильзы оказывают влияние следующие факторы:

- линейная скорость кругового движения средней поверхности гильзы  $v_r$ , определяемая как

$$v_r = \omega \frac{D_{r1} + D_{r2}}{4}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения гильзы;  $D_{r1}$  и  $D_{r2}$  — внутренний и внешний диаметры гильзы;

- средняя скорость течения потока жидкости в наливном (сливном) дроссельном окне  $v_{н(с)}$ :

$$v_{н(с)} = \frac{Q_{н(с)}}{nS_{н(с)}\epsilon_{н(с)}}, \quad (2)$$

где  $Q_{н(с)}$  — расход жидкости через наливное (сливное) дроссельное окно;  $n$  — число дроссельных окон;  $S_{н(с)}$  — площадь проходного сечения наливного (сливного) дроссельного окна;  $\epsilon_{н(с)}$  — коэффициент сжатия потока в наливном (сливном) дроссельном окне;

- толщина стенки гильзы  $\delta_r$ , определяемая как

$$\delta_r = \frac{D_{r2} - D_{r1}}{2}, \quad (3)$$

- характерный размер дроссельного окна  $b$ , определяемый непосредственно шириной дроссельного окна  $b_o$  прямоугольной формы, т. е.

$$b = b_o \quad (4)$$

или полухордой сегмента для дроссельных окон сегментной формы

$$b = [h(d_o - h)]^{0,5} + \Pi_z/4, \quad (5)$$

где  $h = X_{30} \pm X_3$  — открытие дроссельного окна ( $X_{30}$  — начальное открытие дроссельного окна,  $X_3$  — перемещение золотникового плунжера);  $d_o$  — диаметр дроссельного окна;  $\Pi_z$  — смоченный периметр дроссельного окна.

**Описание экспериментов по определению безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах вращающихся гильз и их идентификация.** В основу экспериментальных исследований и идентификации углов истечения и безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР с вращающимися гильзами были положены:

- разработанный и предложенный автором способ определения безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР, защищенный патентами РФ [5, 6] и основанный на гипотезе о том, что мерой соотношения между коэффициентами расхода  $\mu$  и сжатия  $\epsilon$  потока в дроссельном окне, числом Рейнольдса  $Re$  и углом  $\beta$  истечения потока в дроссельном окне является сумма гидростатической и стационарной составляющих гидродинамической силы, действующей на золотниковый плунжер со стороны обтекающих плунжер потоков жидкости;

- разработанные и предложенные автором устройство [7, 8] и способ [9, 10] определения углов истечения потоков в дроссельных окнах ЗГР также защищены патентами РФ.

Согласно разработанному способу определения характеристик безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР и способу, приведенному в работе [11], экспериментальные исследования проводили путем проливки ЗГР, одновременно измеряя перемещения нагруженного пружинной (без ее начального поджатия) золотникового плунжера под действием на него гидростатических и стационарных составляющих гидродинамических сил. При этом уравнения баланса сил на золотниковом плунжере ЗГР были определены в [11] как

$$\bar{p}_n S_{т.н} + p_p S_{т.с} + 2n^2 \mu_n^2 S_n^2 (p_n - p_p) [\cos \beta_n / (n S_n \epsilon_n) - 1/S_{т.н}] + K_n X_3 = 0 \quad (6)$$

— для случая проливки наливных дроссельных окон и

$$\bar{p}_p S_{т.н} + p_c S_{т.с} - 2n^2 \mu_c^2 S_c^2 (p_p - p_c) [\cos \beta_c / (n S_c \epsilon_c) - 1/S_{т.с}] + K_n X_3 = 0 \quad (7)$$

— для случая проливки сливных дроссельных окон.

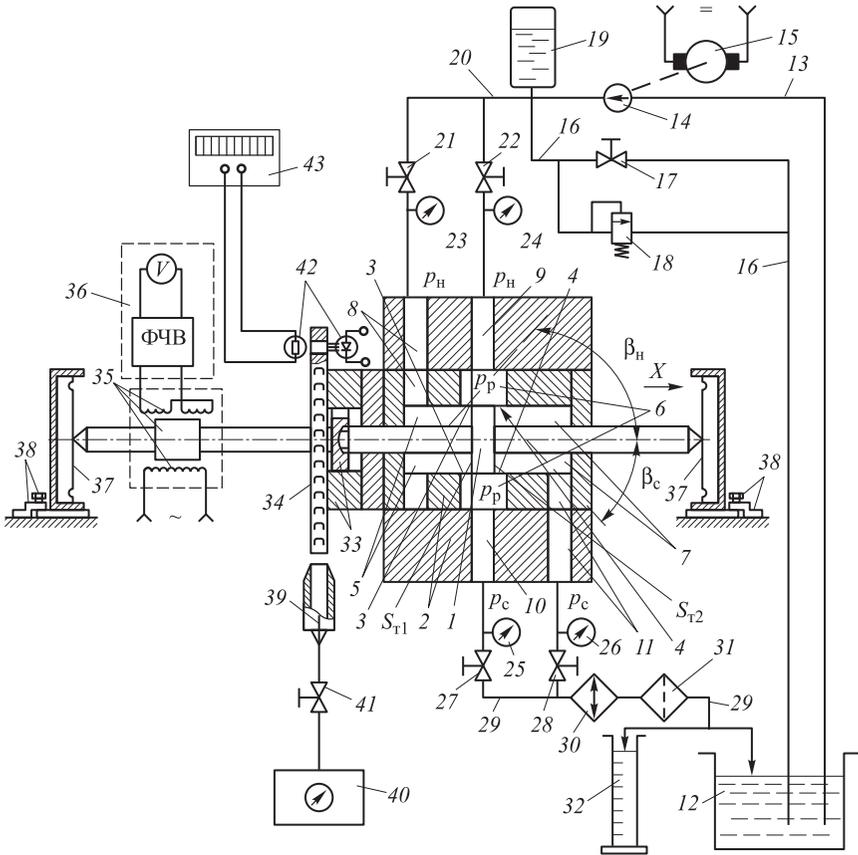
Здесь  $p_n$ ,  $p_p$  и  $p_c$  — давления в камерах нагнетания, рабочей и слива соответственно;  $S_{т.н}$  и  $S_{т.с}$  — площади наливного и сливного торцов золотникового плунжера;  $n$  — число одновременно проливаемых наливных (сливных) дроссельных окон;  $\mu_n$  и  $\mu_c$  — коэффициенты расхода наливного и сливного дроссельных окон;  $S_n$  и  $S_c$  — площади проходных сечений наливного и сливного дроссельных окон;  $\beta_n$  и  $\beta_c$  — углы истечения потоков рабочей жидкости в наливном и сливном дроссельных окнах;  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_c$  — коэффициенты сжатия потоков жидкости в наливном и сливном дроссельных окнах;  $K_n$  — суммарный коэффициент упругости тарельчатых пружин.

Исследования проводили на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2. Эта установка идентична установке, применяемой для идентификации безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР с неподвижными гильзами [11], но отличается от нее тем, что турбина 34 установлена на гильзе 2, а шток золотникового плунжера 1 при этом (для предотвращения его вращения) жестко крепится к тарельчатой пружине 37.

Исследовали ЗГР, состоящий из золотникового плунжера 1 и гильзы 2, образующих наливное 3 и сливное 4 дроссельные окна, а также наливную 5, рабочую 6 и сливную 7 камеры. В гильзе 2 были выполнены входной канал 8 наливной камеры, входной 9 и выходной 10 каналы рабочей камеры, а также выходной канал 11 сливной камеры.

Экспериментальные исследования проводили при нормальных климатических условиях. При выполнении экспериментов использовали рабочую жидкость ЛЗ-МГ-2.

Методика проливок полностью соответствовала методике, приведенной в работе [11], за исключением того, что перед началом проливок наливных 3 (сливных 4) дроссельных окон сжатый воздух от источника сжатого воздуха 40



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для определения безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах ЗГР с вращающимися гильзами:

1 — золотниковый плунжер; 2 — гильза; 3 — наливное дроссельное окно; 4 — сливное дроссельное окно; 5, 6 и 7 — наливная, рабочая и сливная камеры соответственно; 8, 9 — входные каналы наливной и рабочей камер; 10, 11 — выходные каналы рабочей и сливной камер; 12 — резервуар рабочей жидкости; 13 — магистраль всасывания; 14 — насос; 15 — приводной электродвигатель; 16 — обратная магистраль; 17 — вентиль; 18 — предохранительный клапан; 19 — ресивер; 20 — магистраль нагнетания; 21, 22 — вентили нагнетания; 23, 24 и 25, 26 — датчики давления нагнетания и слива соответственно; 27, 28 — вентили слива; 29 — магистраль слива; 30 — теплообменник; 31 — фильтр; 32 — мерная емкость; 33 — демпфер; 34 — турбина; 35 — датчик линейных перемещений; 36 — вторичная электроизмерительная аппаратура; 37 — тарельчатая пружина; 38 — приспособление для центровки и стопорения; 39 — сопло; 40 — источник сжатого воздуха; 41 — воздушный вентиль; 42 — опико-электронный датчик частоты вращения; 43 — частотомер

подавали в сопло 39 и раскручивая турбину 34 вместе с гильзой 2, обеспечивая ее вращение с различными угловыми скоростями. Частоту вращения гильзы регулировали воздушным вентилем 41 по показаниям частотомера 43, получающего сигнал от опико-электронного датчика 42 частоты вращения.

Проливкам были подвергнуты гильзы, имеющие разные ширину дроссельных отверстий и толщину стенки, которая обеспечивалась выполнением кольцевых проточек на внешней поверхности гильзы в районе дроссельного отверстия [12].

В процессе проведения экспериментов для измерения расходов использовали мерный цилиндр (2-2000, ГОСТ1770–74), имеющий погрешность измерений емкости 0,5 %, и электронный секундомер (СТЦ-1, ТУ 25-07.1353–77) с погрешностью отработки времени 0,01 с, что при максимальном времени измерения в 100 с дает погрешность измерения времени 0,1 %. Погрешность измерения расхода — это сумма погрешностей измерения заполнения емкости и времени, т. е.  $0,5 \% + 0,1 \% = 0,6 \%$ . Для измерения давления жидкости использовали манометры (МТИФ, 0...100 кПа, 0...1 МПа и 0...10 МПа, ТУ 4212-114-64115539–2014) с погрешностью 0,6 %. Для измерения перемещения золотникового плунжера использовали измерительный комплекс, состоящий из датчика линейных перемещений ЛДТ-109 и фазочувствительного выпрямителя с погрешностью измерения 1 % в диапазоне перемещений  $\pm 0,5$  мм. Для измерения частоты вращения гильзы ЗГР использовали электронно-счетный частотомер (ЧЗ-85/3R), имеющий погрешность измерения частоты  $5 \cdot 10^{-8} \%$ . Таким образом, суммарная погрешность измерений в процессе проведения экспериментов составляла  $\sim 3,4 \%$ .

**Математический метод обработки результатов экспериментов с вращающимися гильзами.** Из выражений (6) и (7) следует, что определить, как изменятся коэффициенты сжатия  $\epsilon_{н(с)}$  потоков в дроссельных окнах вращающихся гильз ЗГР и углы  $\beta_{н(с)}$  истечения в них экспериментально практически невозможно, поэтому были приняты допущения, позволяющие упростить задачу:

– вращение гильзы не вызывает изменение степени сжатия потоков жидкости в дроссельных окнах, а только увеличивает путь трения частиц жидкости вдоль стенок дроссельного окна;

– при проведении экспериментов кавитационные процессы на выходах дроссельных окон отсутствуют.

В этом случае влияние возможного изменения коэффициента сжатия  $\epsilon_{н(с)}$  потока в дроссельном окне может быть учтено в силу получаемого угла  $\beta_{н(с)}$  истечения потока в нем.

В рамках предложенной модели процесса течения жидкости через дроссельные окна вращающейся гильзы обработку результатов экспериментов проводили, решая системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, получаемых из выражений (6) и (7) относительно  $\beta_n$  и  $\beta_c$ .

Для случаев проликов наливных и сливных дроссельных окон алгоритм вычисления безразмерных параметров и углов истечения потоков заключался в решении следующих систем нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений.

1. Уравнения площади проходного сечения:

$$S_{н(с)} = b_0 \sqrt{(X_{3,н} + X_3)^2 + h_3^2}$$

— для наливного (сливного) дроссельного окна прямоугольной формы [4], где  $b_0$  — ширина дроссельного окна;  $X_{3,н}$  — начальное открытие дроссельного

окна;  $h_3 = R_r - R_{\Pi}$  — зазор между пояском золотникового плунжера и гильзой ( $R_r$  — радиус внутренней поверхности гильзы,  $R_{\Pi}$  — радиус пояса золотникового плунжера);

$$S_{H(c)} = S_3 + (d_o^2/4) \arctg \left( \sqrt{[d_o / (d_o - 2X_3 + 2X_{3,H})]^2 - 1} \right) - \\ - \left[ (d_o - 2X_3 + 2X_3)^2 / 4 \right] \left( \sqrt{[d_o / (d_o - 2X_{3,H} + 2X_3)]^2 - 1} \right)$$

— для наливного (сливного) дроссельного окна сегментной формы [13], где  $d_o$  — диаметр дроссельного окна;  $S_3$  — остаточная площадь зазора при полностью закрытом дроссельном окне.

2. Уравнения для вычисления смоченного периметра:

$$\Pi_{H(c)} = 2 \left[ b_o + \sqrt{(X_{3,H} + X_3)^2 + h_3^2} \right]$$

— для наливного (сливного) дроссельного окна прямоугольной формы [4];

$$\Pi_{H(c)} = \Pi_3 + d_o \arctg \left( \frac{\sqrt{(d_o^2/4) + [(d_o/2) - X_{3,H} + X_3]^2}}{(d_o/2) - X_{3,H} + X_3} \right) + \\ + 2\sqrt{(d_o^2/4) + [(d_o/2) - X_{3,H} + X_3]^2}$$

— для наливного (сливного) дроссельного окна сегментной формы [14].

3. Уравнение коэффициента расхода наливного (сливного) дроссельного окна:

$$\mu_{H(c)} = \frac{Q_{P(c)}}{n S_{H(c)} \sqrt{2/\rho} \sqrt{p_{H(p)} + p_{P(c)}}}$$

4. Уравнение коэффициента сжатия потока в наливном (сливном) дроссельном окне:

$$\varepsilon_{H(c)} = spl(Re, \bar{p}_{H(c)}),$$

где  $\bar{p}_{H(c)} = p_{P(c)} / p_{H(c)}$  — относительные противодавления на выходах наливных и сливных дроссельных окон.

5. Уравнения для вычисления значений углов истечения потока:

$$\beta_H = \\ = \arccos \left\{ \left[ p_H S_{T,H}^2 \varepsilon_H - p_P S_{T,H} S_{T,c} \varepsilon_H + 2n^2 \mu_H^2 S_H^2 \varepsilon_H (p_H - p_P) - K_n X_3 S_{T,H} \varepsilon_H \right] / \left[ 2n \mu_H^2 S_H S_{T,H} (p_H - p_P) \right] \right\}$$

— для наливного дроссельного окна  $\beta_H$ ;

$$\beta_c = \\ = \arccos \left\{ \left[ p_c S_{T,c}^2 \varepsilon_c - p_P S_{T,H} S_{T,c} \varepsilon_c + 2n^2 \mu_c^2 S_c^2 \varepsilon_c (p_P - p_c) + K_{\Pi} X_3 S_{T,c} \varepsilon_c \right] / \left[ 2n \mu_c^2 S_c S_{T,c} (p_P - p_c) \right] \right\}$$

— для сливного дроссельного окна  $\beta_c$ .

6. Уравнение для вычисления числа Рейнольдса  $Re$  потока в наливном (сливном) окне:

$$Re = \left[ 4Q_{H(c)} \right] / \left[ n\Pi_{H(c)}v\varepsilon_{H(c)} \right].$$

Полученные системы уравнений решали с помощью модифицированного метода Зейделя [15, 16], при этом на каждой итерации для определения углов истечения [10] вычисляли неполное число Рейнольдса  $Re^*$  потока в наливном (сливном) дроссельном окне по выражению

$$Re_{H(c)}^* = \left[ 4Q_{H(c)} \right] / \left[ n\Pi_{H(c)}v \right].$$

Значения приращений углов истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах ЗГР определяли, вычитая из значений параметров, полученных при вращающейся гильзе, значения соответствующих параметров, полученных при проливках прозрачного имитатора ЗГР с соответствующим относительным открытием дроссельного окна  $\chi$ , определяемого по выражению [10]:

$$\chi = \frac{X_3}{h_z}.$$

Анализируя результаты обработки (в соответствии с приведенным алгоритмом) предварительных экспериментов выявили, что влияние вращения золотниковой гильзы на процессы течения жидкости через наливные и сливные дроссельные окна ЗГР выражается в увеличении угла истечения потока в дроссельном окне, уменьшении коэффициента расхода дроссельных окон в области больших чисел Рейнольдса, в увеличении градиента изменения этого параметра в области малых чисел Рейнольдса и размывании локального максимума характеристики зависимости  $\mu = \mu(Re)$  в области средних чисел Рейнольдса (в области перестройки потока).

В целях оптимизации числа экспериментов, необходимых для установления зависимостей изменения безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах вращающихся гильз от факторов, приведенных в рабочей гипотезе (1)–(5), была использована  $\pi$ -теорема размерностей Букингема [16, 17].

На основании положений рабочей гипотезы и предварительных результатов экспериментов углы истечения потоков и коэффициенты расхода в наливных и сливных дроссельных окнах ЗГР можно представить как

$$\beta_{H(c)} = \beta_{H(c)}(\chi, Re) + \Delta\beta_{\omega}(v_r, v_0, \delta_r, b); \quad (8)$$

$$\mu_{H(c)} = \mu_{H(c)}(Re, \bar{p}_{H(c)}, v_r, v_0, \delta_r, b), \quad (9)$$

где  $\Delta\beta_{\omega}$  — приращения углов истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах ЗГР, обусловленные вращением гильзы.

Указанная  $\pi$ -теорема размерностей Букингема устанавливает, что функциональная зависимость между  $n$  физическими размерными параметрами всегда может быть преобразована в уравнение, содержащее  $m$  безразмерных комбинаций тех же физических величин (так называемых чисел  $\pi$ ), причем  $m$  всегда меньше  $n$ , а разность  $n - m = k$  представляет собой число первичных (основных) единиц.

Вначале установим функцию приращения угла истечения потока в дроссельном окне  $\Delta\beta_\omega$  прямоугольной формы. В соответствии с первым положением рабочей гипотезы выражение для  $\Delta\beta_\omega$  можно представить в виде

$$\Delta\beta_\omega = (\pi/2 - \beta)\Psi(v_r, v_0, \delta_r, b). \tag{10}$$

Число определяющих факторов равно четырем, а минимально необходимое число опытов для установления таких зависимостей в общем случае (при пяти опытных данных для каждой зависимости) равно  $5^4 = 625$ .

Выберем в качестве первичных единиц длину  $L$  [см] и время  $T$  [с], т. е.  $k = 2$ . Число размерных параметров  $n = 4$ , следовательно, в соответствии с  $\pi$ -теоремой  $m = n - k = 4 - 2 = 2$ , поэтому уравнение (10) можно записать так:

$$\Delta\beta_\omega = (\pi/2 - \beta)\Psi(\pi_1, \pi_2).$$

Для перехода к безразмерным параметрам составляем таблицу.

Размерные переменные	Размерность	Делитель	Новая безразмерная переменная
$v_r$	см/с	$v_0$	$v_r/v_0$
$v_0$	см/с	$v_0$	1
$\delta_r$	см	$b$	$\delta_r/b$
$b$	см	$b$	1

На основании данных таблицы определяем безразмерные переменные

$$\delta = \frac{\delta_r}{b} \text{ и } \xi = \frac{v_r}{v_0}.$$

В функции новых безразмерных переменных уравнение (10) принимает вид

$$\Delta\beta_\omega = (\pi/2 - \beta)\Psi(\delta, \xi). \tag{11}$$

Дальнейшие упрощения возможны, если использовать дополнительные неформализованные свойства изучаемого явления для частных случаев. Так, если допустить, что характер распределения скоростей потоков вдоль стенок дроссельного окна гильзы не изменяется, т. е. дополнительного сжатия потока не происходит, то естественно предположить, что отношение  $\delta = \delta_r/b$  можно рассматривать в качестве множителя при функции отношения скоростей

$\xi = v_r/v_0$ . На поиск зависимости именно в таком виде указывает и то обстоятельство, что параметр  $\delta$  в ЗГР с дроссельными окнами прямоугольной формы не изменяется в процессе их функционирования. На основании первого положения рабочей гипотезы суммарный угол истечения потока в дроссельном окне вращающейся гильзы может только приближаться к значению  $\pi/2$ , поэтому логично предположить, что функция  $\Psi$  должна иметь возрастающий характер с насыщением. Наиболее оптимальной с точки зрения возможности аппроксимации и математического моделирования для этих целей является функция гиперболического тангенса, не имеющая разрывов первого и второго рода:

$$\Psi = \text{th}(K\delta\xi), \quad (12)$$

где  $K$  — коэффициент аппроксимации.

Тогда выражение для приращения угла истечения потока принимает вид

$$\Delta\beta_\omega = (\pi/2 - \beta)\text{th}(K\delta\xi)$$

или

$$\Delta\beta_\omega = (\pi/2 - \beta)\Psi,$$

а выражение для угла истечения потока можно записать как

$$\beta_{n(c)} = \beta_{n(c)}(\chi, \text{Re}) + (\pi/2 - \beta)\text{th}(K\delta\xi)$$

или

$$\beta_{n(c)} = \beta_{n(c)}(\chi, \text{Re}) + (\pi/2 - \beta)\Psi.$$

Таким образом, задача определения зависимости (10) сводится к изучению зависимости (12), для установления которой вместо 625 достаточно всего пяти опытных данных.

Чтобы установить зависимость  $\Psi = \Psi(\zeta)$ , где  $\zeta = \delta\xi$ , достаточно провести проливку ЗГР с вращающейся с постоянной скоростью гильзой при нескольких значениях давления нагнетания, после чего выполнить указанную ранее обработку результатов экспериментов, дополнив ее вычислением на каждой итерации параметров  $\zeta$  и  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{\Delta\beta_\omega}{\pi/2 - \beta_{n(c)}}.$$

Полученные данные были подвергнуты аппроксимации методом наименьших квадратов [17, 18]. Таким образом, для наливного и сливного дроссельных окон прямоугольной формы было получено значение коэффициента  $K = 22$ .

Аналогичные исследования, проведенные с ЗГР, имеющими дроссельные окна сегментной формы, показали, что приведенные ранее рассуждения могут

быть применены и для устройств этих типов, причем значения получаемого коэффициента  $K$  для наливного и сливного дроссельных окон сегментной формы также получены близкими к значениям  $K$  для наливного и сливного дроссельных окон прямоугольной формы ( $K = 21,8$ ).

В процессе проведения дальнейших экспериментов при разных значениях толщины стенки гильзы  $\delta_r$  и ширины дроссельного окна  $b$  каждому значению скорости потока в наливном (сливном) дроссельном окне  $v_0$  подбиралось соответствующее значение угловой скорости вращения гильзы  $\omega$ , необходимое для обеспечения постоянства параметра  $\Psi$ , рассчитываемого по выражению (12). При проведении экспериментов кроме нулевого поддерживались еще три основных значения этого параметра, т. е.  $\Psi = 0,33; 0,66$  и  $0,99$ . Эксперименты проводились при обеспечении значений относительного противодавления на выходах дроссельных окон:

$$\bar{p}_{н(с)} = 0,0; \bar{p}_{н(с)} = 0,1; \bar{p}_{н(с)} = 0,2; \bar{p}_{н(с)} = 0,3 \text{ и } \bar{p}_{н(с)} = 0,4.$$

Указанные относительные противодавления на выходах наливных и сливных дроссельных окон определяются выражениями:

$$\bar{p}_н = \frac{P_p}{P_n}; \quad \bar{p}_с = \frac{P_c}{P_p}.$$

Графики полученных в результате математической обработки экспериментов зависимостей коэффициентов расхода от числа Рейнольдса при различных значениях параметра  $\Psi$  и относительного противодавления на выходах дроссельных окон приведены на рис. 3–6.

**Итерационные методы расчета параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах ЗГР.** На основании полученных зависимостей и их сплайн-интерполяций (экстраполяций), итерационный метод расчета безразмерных параметров течений потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР с вращающимися гильзами в соответствии с опытом разработки подобных методов [15, 18] заключается в решении системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений:

$$Q = n\mu S \sqrt{2/\rho} \sqrt{|p_n - p_c|} \text{sign}(p_n - p_c);$$

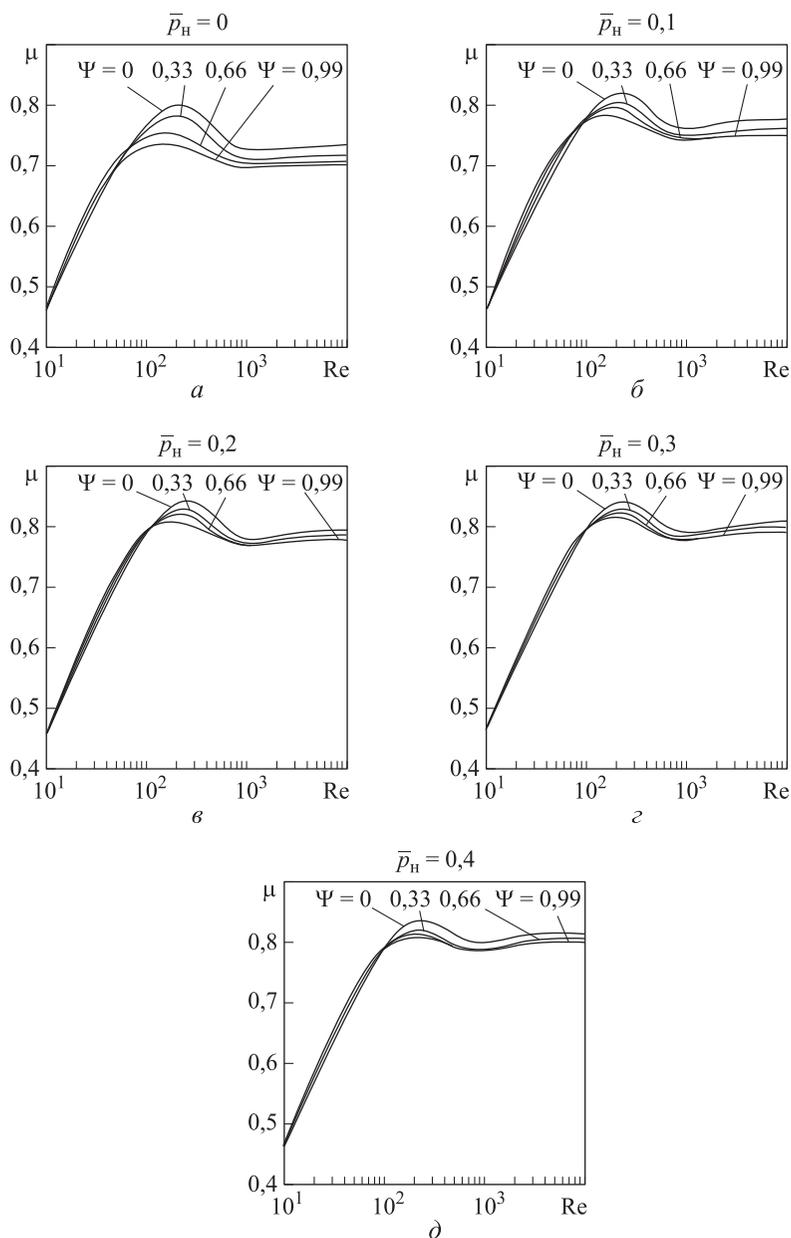
$$\mu = spl(\text{Re}, \bar{p}, \Psi);$$

$$\varepsilon = spl(\text{Re}, \bar{p});$$

$$\text{Re} = \frac{4Q}{n\Pi v \varepsilon};$$

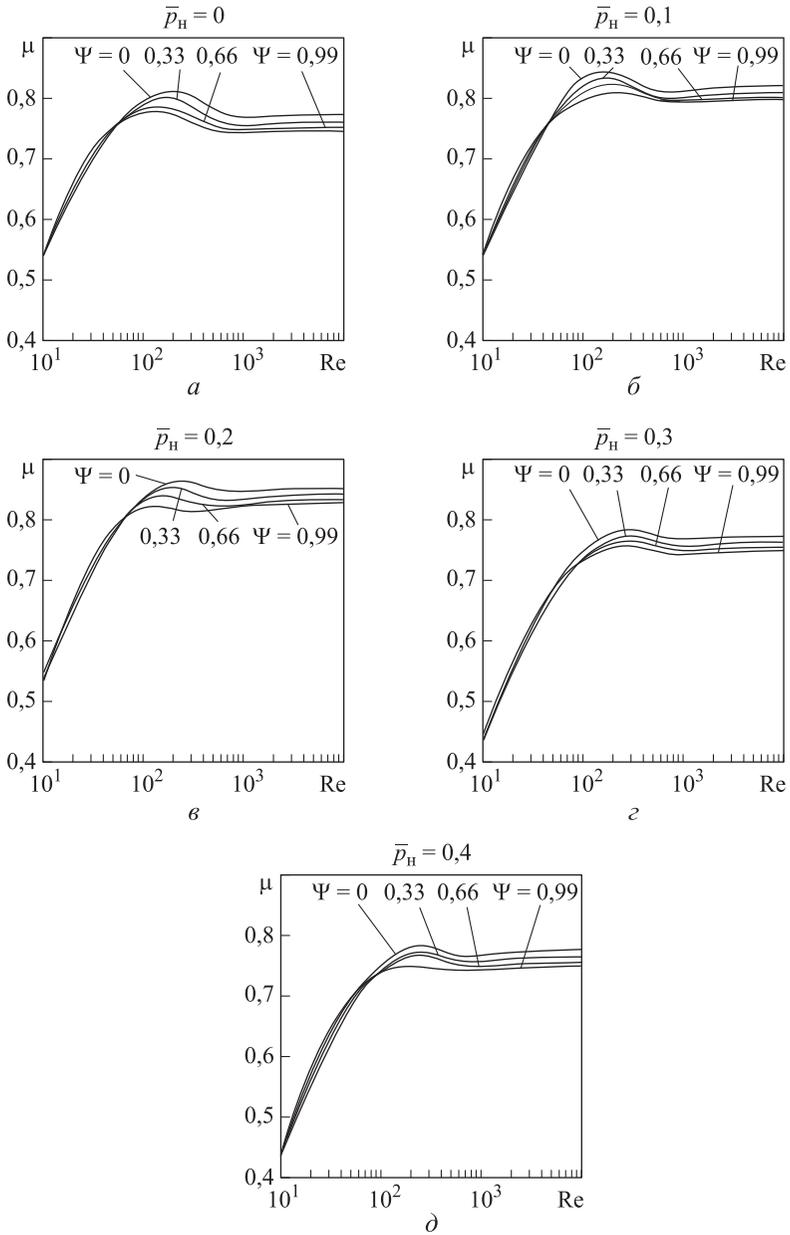
$$\bar{p} = \frac{p_c}{p_n}.$$

Решение этой системы уравнений возможно с помощью итерационного метода, изложенного в [15, 16].

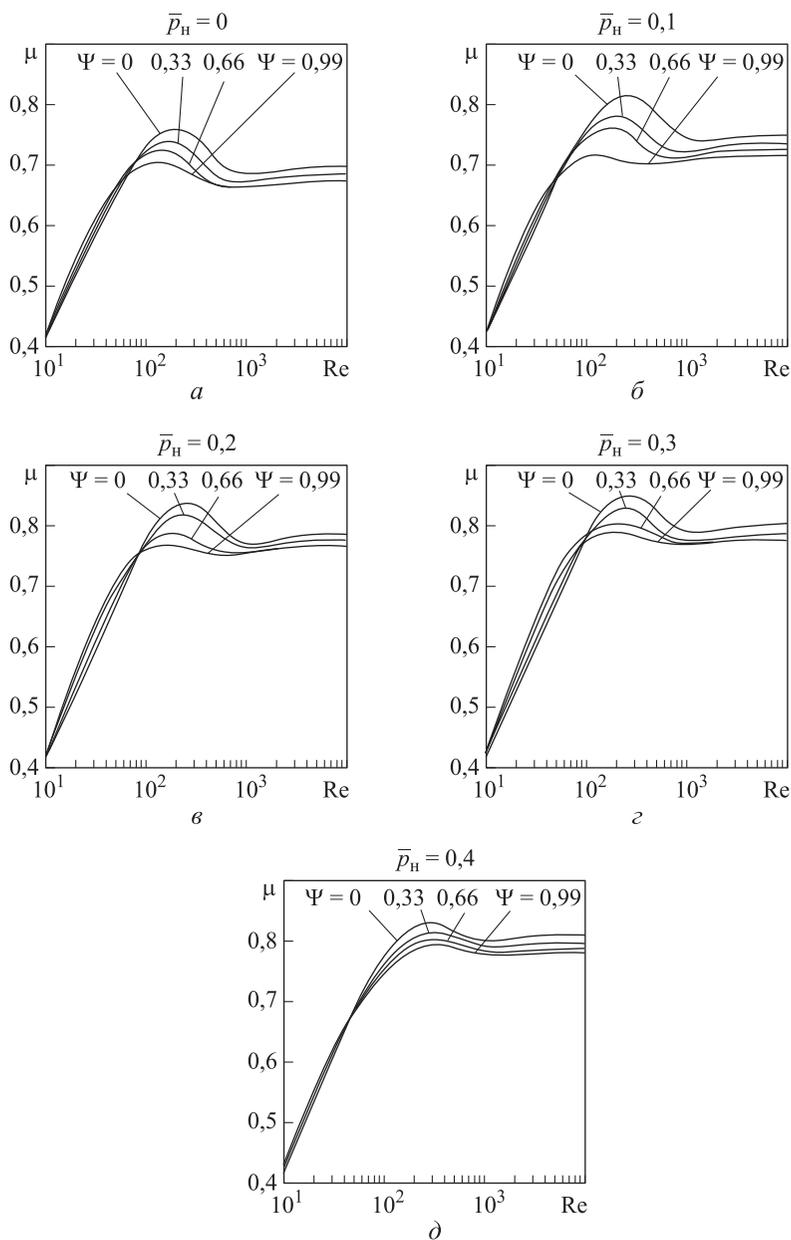


**Рис. 3.** Зависимости  $\mu = \mu(Re, \Psi)$  наливного прямоугольного дроссельного окна при значениях  $\bar{\rho}_n$ :

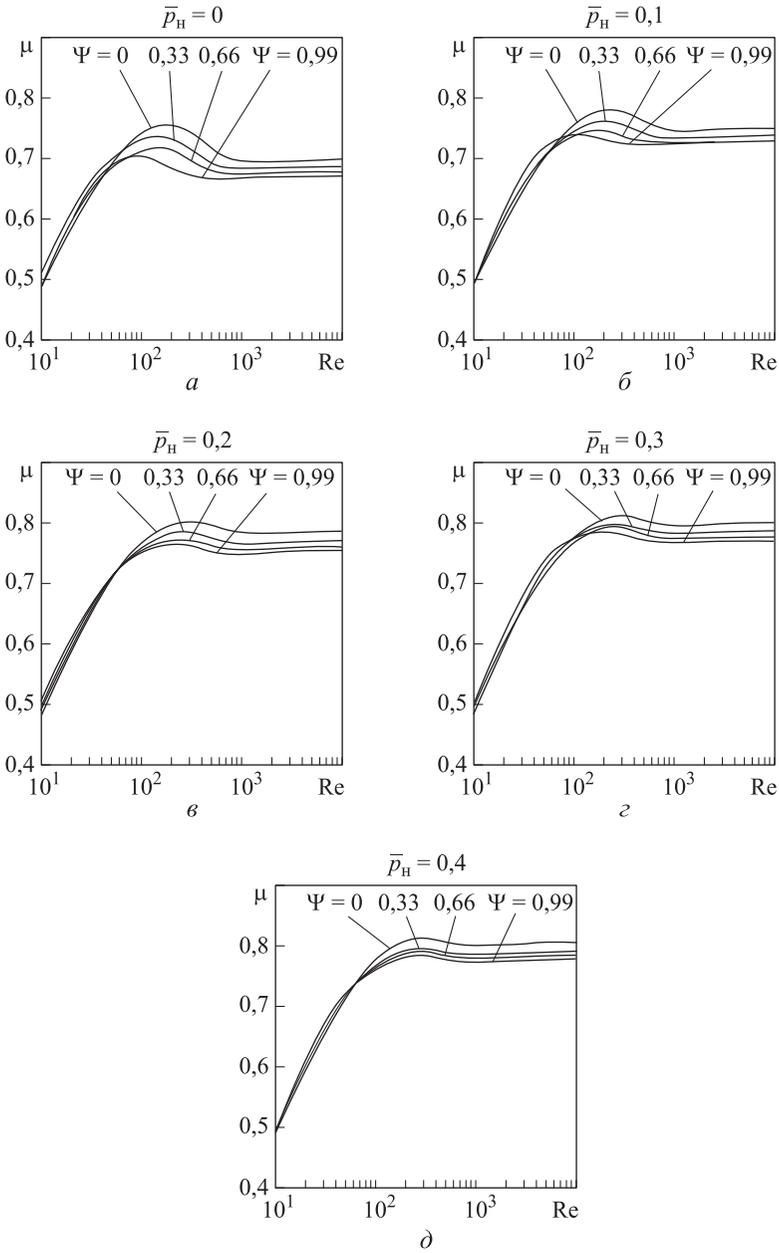
$a - 0$ ;  $б - 0,1$ ;  $в - 0,2$ ;  $г - 0,3$ ;  $д - 0,4$



**Рис. 4.** Зависимости  $\mu = \mu (Re, \Psi)$  наливного сегментного дросельного окна при значениях  $\bar{p}_n$  (а-д — см. рис. 3)



**Рис. 5.** Зависимости  $\mu = \mu (Re, \Psi)$  сливного прямоугольного дроссельного окна при значениях  $\bar{p}_c$  (*a-d* — см. рис. 3)



**Рис. 6.** Зависимости  $\mu = \mu (Re, \Psi)$  сливного сегментного дроссельного окна при значениях  $\bar{p}_c$  (a-d — см. рис. 3)

**Заключение.** 1. С помощью оригинальной экспериментальной установки исследованы углы истечения и безразмерные параметры течения потоков жидкости (коэффициент расхода и число Рейнольдса) наливных и сливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной форм ЗГР электрогидравлических усилителей с вращающимися гильзами.

2. Получены аппроксимирующие экспериментальные зависимости для описания коэффициентов расхода наливных и сливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной форм от числа Рейнольдса, параметра  $\Psi$  и относительного противодавления на выходах дроссельных окон ЗГР электрогидравлических усилителей с вращающимися гильзами.

3. Разработан и предложен итерационный метод расчета безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах ЗГР электрогидравлических усилителей с вращающимися гильзами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Машиностроение*. Энциклопедия. Т. IV-22. Ракетно-космическая техника. Кн. 1. Гл. 8.8. Исполнительные приводы систем управления / Белицкий Д.С., Белоногов О.Б., Жарков М.Н. М.: Машиностроение, 2012. С. 918–924.
2. *Особенности схемно-конструктивных решений и функционирования электрогидравлических рулевых машин ракет (краткий технико-исторический обзор)* / О.Б. Белоногов, М.Н. Жарков, В.В. Кудрявцев, Г.А. Степан, Б.Е. Черток, В.И. Шутенко // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3–4. С. 3–25.
3. *Козлов С.Н.* Дополнительные потери энергии потока во вращающейся трубке // Труды ВНИИгидромаша. 1969. Вып. 40. С. 39–50.
4. *Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Шутенко В.И.* Исследование гидродинамических сил, действующих на золотниковые плунжеры четырехдроссельных рулевых машин // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3–4. С. 57–89.
5. *Пат. 2220333 РФ.* Белоногов О.Б. Способ определения характеристик безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей. Заявл. 23.01.2002; опубл. 27.12.2003. Бюлл. № 36.
6. *Пат. 2282065 РФ.* Белоногов О.Б. Способ определения характеристик безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей. Заявл. 26.01.2004; опубл. 20.08.2006. Бюлл. № 23.
7. *Пат. 2220332 РФ.* Белоногов О.Б. Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя. Заявл. 21.01.2002; опубл. 27.12.2003. Бюлл. № 36.
8. *Пат. 2262010 РФ.* Белоногов О.Б. Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя. Заявл. 15.12.2003; опубл. 10.10.2005. Бюлл. № 28.
9. *Пат. 2329413 РФ.* Белоногов О.Б. Способ определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя. Заявл. 03.03.2006; опубл. 20.07.2008. Бюлл. № 20.
10. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования и идентификация углов истечения потоков в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей рулевых ма-

шин ракет // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 35–48. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-35-48

11. Белоногов О.Б. Экспериментальные исследования и метод идентификации безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 43–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-43-58

12. Белоногов О.Б. Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 3 (56). С. 169–173.

13. Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Шутенко В.И. Методы расчета статических характеристик автономных однокаскадных рулевых машин с двухдроссельным электрогидравлическим усилителем с отрицательным перекрытием // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып. 1. С. 5–28.

14. Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Шутенко В.И. Методы расчета статических характеристик автономных однокаскадных двухдроссельных рулевых машин // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3–4. С. 132–177.

15. Белоногов О.Б., Жарков М.Н. Модификация метода Зейделя для расчета статических характеристик рулевых машин и электрогидравлических приводов // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып. 1. С. 118–120.

16. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. М.: Машиностроение, 1982. 432 с.

17. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия: В 2-х вып. Вып. 2 / пер. с англ. Б.Л. Розовского; под. ред. Ю.П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1982. 239 с.

18. Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Шутенко В.И. Итерационный метод расчета параметров течений рабочей жидкости в соединительных трубопроводах, каналах, проточных элементах и клапанах // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып. 1. С. 97–106.

**Белоногов Олег Борисович** — канд. техн. наук, начальник сектора РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (Российская Федерация, 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Ленина, д. 4а).

#### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Белоногов О.Б. Экспериментальные исследования истечения и безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей с вращающимися гильзами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 4–23. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-4-23

### **DISCHARGE AND NON-DIMENSIONAL PARAMETERS OF FLUID FLOWS IN THROTTLES OF SPOOL HYDRAULIC VALVES OF ELECTROHYDRAULIC AMPLIFIERS**

**O.B. Belonogov**

obelonogoff@mail.ru  
post@rsce.ru

**S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Moscow Region, Russian Federation**

**Abstract**

This article describes the experimental study of fluid flows (discharge coefficient and Reynolds number) of intake and exhaust throttles of rectangular and segmented shape for spool hydraulic valves of electro hydraulic amplifiers with thimbles. The basis for this study is the Buckingham  $\pi$  theorem in dimensional analysis and the method for determining the flow parameters offered by the author. The experimental installation allowed us to estimate the pressure parameters of discharge and exhaust chambers, spool hydraulic valves, spool plunger movements and fluid discharge at the exits of the working and exhaust chambers. By analyzing the experiential data with computer software the author determined the angles of efflux and non-dimensional parameters of fluid flows. The paper offers iteration scheme to calculate non-dimensional parameters of fluid flows in throttles for spool hydraulic valves of electro hydraulic amplifiers with thimbles

**Keywords**

*Electro hydraulic amplifiers, spool hydraulic valves, identification method, non-dimensional parameter, fluid flow*

**REFERENCES**

- [1] Belitskiy D.S., Belonogov O.B., Zharkov M.N. Mashinostroenie. Entsiklopediya. Tom IV-22. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Kn. 1. Gl. 8.8. Iсполnitel'nye privody sistem upravleniya [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Vol. IV-22. Rocket and Space Equipment. Book 1. Chapter 8.8. Control System Actuators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, pp. 918–924.
- [2] Belonogov O.B., Zharkov M.N., Kudryavtsev V.V., Stepan G.A., Chertok B.E., Shutenko V.I. Characteristics of the structural concepts and operation of rocket electrohydraulic steering machines (brief technical and historical overview). *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1998, iss. 3–4, pp. 3–25 (in Russ.).
- [3] Kozlov S.N. Additional losses of the flow energy in the rotating tube. *Trudy VNIIGidromasha* [Proc. VNIIGidromash], 1969, iss. 40, pp. 39–50 (in Russ.).
- [4] Belonogov O.B. Zharkov M.N., Kudryavtsev V.V., Shutenko V.I. Research of hydrodynamic forces acting on the plunger pistons of four-throttle steering engines. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1998, iss. 3–4, pp. 57–89 (in Russ.).
- [5] Belonogov O.B. Sposob opredeleniya kharakteristik bezrazmernykh parametrov techeniya potokov rabochey zhidkosti v drossel'nykh oknakh zolotnikovykh gidroraspredeliteley [A method for determining the characteristics of the dimensionless parameters of the actuating fluid current flow in the orifices of spool valve actuators]. Patent RF, no. 2220333, 2003.
- [6] Belonogov O.B. Sposob opredeleniya kharakteristik bezrazmernykh parametrov techeniya potokov rabochey zhidkosti v drossel'nykh oknakh zolotnikovykh gidroraspredeliteley [A method for determining the characteristics of the dimensionless parameters of the actuating fluid current flow in the orifices of spool hydraulic valves]. Patent RF, no. 2282065, 2006.
- [7] Belonogov O.B. Ustroystvo dlya opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredelitel'ya [Device for determining working liquid efflux angle within throttling window sections of sleeve hydraulic valve]. Patent RF, no. 2220332, 2003.
- [8] Belonogov O.B. Ustroystvo dlya opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredelitel'ya [Device for deter-

mining working liquid efflux angle in throttling window sections of sleeve hydraulic valve] Available at: <http://russianpatents.com/patent/226/2265755.html> (accessed 09.09.2014). Patent RF, no. 2262010, 2005.

[9] Belonogov O.B. Sposob opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredeleya [Method for determination of working medium flows effluent angles in sections of throttle windows of slide hydraulic valves]. Available at: <http://russianpatents.com/patent/232/2329413.html> (accessed 09.09.2014). Patent RF, no. 2329413, 2008.

[10] Belonogov O.B. Experimental research and identification of flow efflux angles in extension orifices of spool valve actuators of rocket steering engines. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 1, pp. 35–48 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-35-48

[11] Belonogov O.B. Experimental research and identification method of nondimensional fluid flow parameters within orifices of spool-type hydraulic control valves. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 43–58 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-43-58

[12] Belonogov O.B. Study of effects of mechanical and adjustment specifications of electrohydraulic booster on static characteristics of control-surface actuator. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2009, iss. 3(56), pp. 169–173 (in Russ.).

[13] Belonogov O.B., Zharkov M.N., Kudryavtsev V.V., Shutenko V.I. Methods of computation of static characteristics of autonomous single-stage steering boosters with four-choke electrohydraulic underlapped valves. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1997, iss. 1, pp. 5–28 (in Russ.).

[14] Belonogov O.B., Zharkov M.N., Kudryavtsev V.V., Shutenko V.I. Methods of computation of static characteristics of autonomous single-stage two-choke steering boosters. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1998, iss. 3–4, pp. 132–177 (in Russ.).

[15] Belonogov O.B., Zharkov M.N. Seidel method adaptation for computation of static characteristics of steering boosters and electrohydraulic actuators. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1997, iss. 1, pp. 118–120 (in Russ.).

[16] Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 432 p.

[17] *Mosteller F., Tukey J. Data analysis and regression: a second course in statistics.* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1977.

[18] Belonogov O.B., Zharkov M.N., Kudryavtsev V.V., Shutenko V.I. An iterative method for calculating the parameters of the actuating fluid flow in the connecting pipes, ducts, valves and flow cell. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-and-Space Equipment]. Ser. XII, 1997, iss. 1, pp. 97–106 (in Russ.).

**Belonogov O.B.** — Cand. Sci. (Eng.), Chief of the Department of S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

#### Please cite this article in English as:

Belonogov O.B. Discharge and Non-Dimensional Parameters of Fluid Flows in Throttles of Spool Hydraulic Valves of Electro Hydraulic Amplifiers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 5, pp. 4–23. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-4-23