

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.78. 051.62–31/32.001.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ УГЛОВ ИСТЕЧЕНИЯ ПОТОКОВ В ДРОССЕЛЬНЫХ ОКНАХ ЗОЛОТНИКОВЫХ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ РУЛЕВЫХ МАШИН РАКЕТ

**О.Б. Белоногов**

ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”, г. Королёв,  
Московская обл., Российская Федерация  
e-mail: obelonogoff@mail.ru

*Приведены результаты экспериментальных исследований и идентификации углов истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей электрогидравлических усилителей рулевых машин в зависимости от относительного открытия дроссельных окон прямоугольной и сегментной формы. Исследования проведены с помощью оригинальной экспериментальной установки, позволяющей идентифицировать значения углов истечения потоков, близких к интегральным не только по величине открытия дроссельных окон, но и по глубине золотниковых камер, из которых эти потоки вытекают и в которые эти потоки втекают. Предложена сплайн-интерполяция–экстраполяция полученных в результате экспериментов зависимостей.*

**Ключевые слова:** угол истечения потока, электрогидравлический усилитель, рулевая машина.

## EXPERIMENTAL RESEARCH AND IDENTIFICATION OF FLOW EFFLUX ANGLES IN EXTENSION ORIFICES OF SPOOL VALVE ACTUATORS OF ROCKET STEERING ENGINES

**O.B. Belonogov**

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”  
Korolev, Moscow region, Russian Federation  
e-mail: obelonogoff@mail.ru

*The paper covers field research results and identification of working liquid efflux angles within throttling ports of spool valve-type hydraulic distributors for electrohydraulic driver of actuating unit vs relative opening of ports configured as a rectangular or segmental shape. Researches were carried out with the help of original pilot unit that allows identifying efflux angle values of flows that are close to integral ones not only by the ports opening value but by the valve chamber depth. It is the valve chamber that is the begging and the ending point of these flows. The authors suggest a spline Interpolation - Extrapolation of the dependences produced during the experiments.*

**Keywords:** efflux angle, electrohydraulic driver, actuating unit.

Большинство авторов, исследовавших гидродинамические силы, действующие на золотниковые плунжеры гидрораспределителей (ГР), обычно принимали углы наклона векторов скоростей потоков к осям

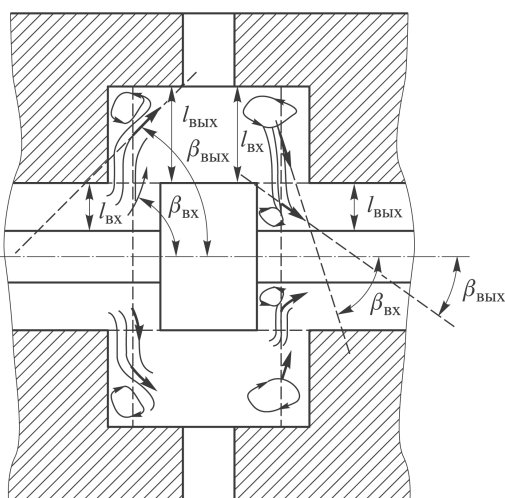
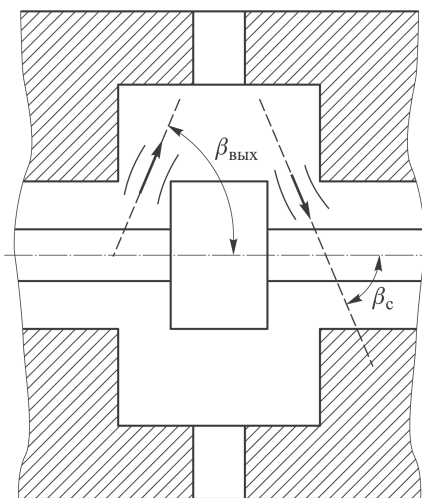
золотниковых плунжеров постоянными и равными  $69^\circ$  [1–3], но такое допущение возможно только для приближенных моделей, поскольку углы истечения в общем случае непостоянны [4].

Для золотниковых пар, состоящих из золотников с цилиндрическими поясками, имеющими острые кромки, и гильз с прямоугольными дроссельными отверстиями фон Мизесом в работе [5] были получены эмпирические зависимости углов истечения потоков в функции отношения открытия дроссельного окна к зазору между золотником и гильзой. Однако указанные зависимости справедливы только для случаев, когда размеры питающей и приемной золотниковых камер неограниченно велики [6]. В реальных ГР, имеющих золотниковые камеры ограниченных размеров, течение жидкости носит сложный характер из-за образования вихрей различного рода и отраженных потоков, оказывающих существенное влияние на углы истечения. Так, по данным работ [6], углы истечения в четырехдроссельных золотниковых ГР изменяются в зависимости от отношения мгновенных скоростей рабочей жидкости в золотниковой камере и дроссельном окне, при этом для прямого направления тока угол наклона потока увеличивается с  $69^\circ$ , а для обратного тока уменьшается с  $69^\circ$ , что противоречит выводам работы [7].

В работе [8], а затем в работе [9] показано, что закон изменения угла истечения в функции отношения открытия дроссельного окна к величине зазора между золотником и гильзой носит сложный характер. Вначале угол истечения увеличивается до максимального значения, а затем убывает практически по линейному закону. При этом по данным работы [9], максимальное значение угла истечения несколько превышает эмпирическое и теоретическое значение, определенное работами [5, 8]. Однако в работе [4], опубликованной значительно позднее, вновь приводятся данные экспериментов, в соответствии с которыми угол истечения при открытии дроссельного окна только возрастает.

Таким образом, приводимые в отечественной и зарубежной научно-технической литературе экспериментальные данные по углам истечения потоков весьма отличаются, а иногда и просто противоречат друг другу.

Несоответствие результатов экспериментов по определению углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотниковых ГР, приводимых разными авторами, по видимости, можно объяснить различием методов проводимых исследований. Так, например, в работах [4, 7] углы истечения определяются с помощью прозрачных моделей путем фотографирования потоков при введении в них струек контрастной жидкости, а в работе [9] — расчетным путем по эпюрам давлений. Кроме того, большинство подобных исследований проводилось при малых числах Рейнольдса, соответствующих



**Рис. 1.** Традиционная схема определения углов истечения потоков

**Рис. 2.** Схема определения углов истечения потоков, близких к интегральным как по величине открытия дроссельного окна, так и по глубинам камер

ламинарным режимам течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах.

Во всех рассмотренных случаях цель экспериментальных исследований — это определение углов истечения потоков в проходных сечениях дроссельных окон, образованных поверхностью пояска золотникового плунжера и внутренней поверхностью гильзы (рис. 1), т.е. определение значений углов истечения потоков, близких к интегральным только по значению открытия дроссельных окон. При моделировании и расчетах именно эти значения углов истечения потоков обычно используются в уравнениях стационарных составляющих гидродинамических сил.

Однако известно [10], что по мере удаления от сечений дроссельных окон в золотниковые камеры углы наклона потоков из-за действия отраженных от стенок камер потоков и образующихся при этом вихревых зон могут сильно изменяться (рис. 2).

С другой стороны, от углов наклона потоков в камерах перед дроссельными окнами также зависят результирующие значения углов истечения потоков.

Поэтому указанные методы определения углов истечения потоков применимы лишь в случаях, когда глубина камеры, из которой поток вытекает через дроссельное окно, равна глубине камеры, в которую этот поток втекает, или когда эти глубины неограниченных размеров. Но такие соотношения в технической практике встречаются чрезвычайно редко.

В связи с этим представляется целесообразным в уравнениях стационарных составляющих гидродинамических сил, действующих на

золотниковые плунжеры ГР, использовать значения углов истечения потоков, близкие к интегральным не только по величине открытия дроссельных окон, но и по глубине золотниковых камер, из которых эти потоки вытекают и в которые эти потоки втекают.

На определение именно таких значений углов истечения потоков в сечениях дроссельных окон золотниковых ГР и были направлены исследования, результаты которых излагаются ниже.

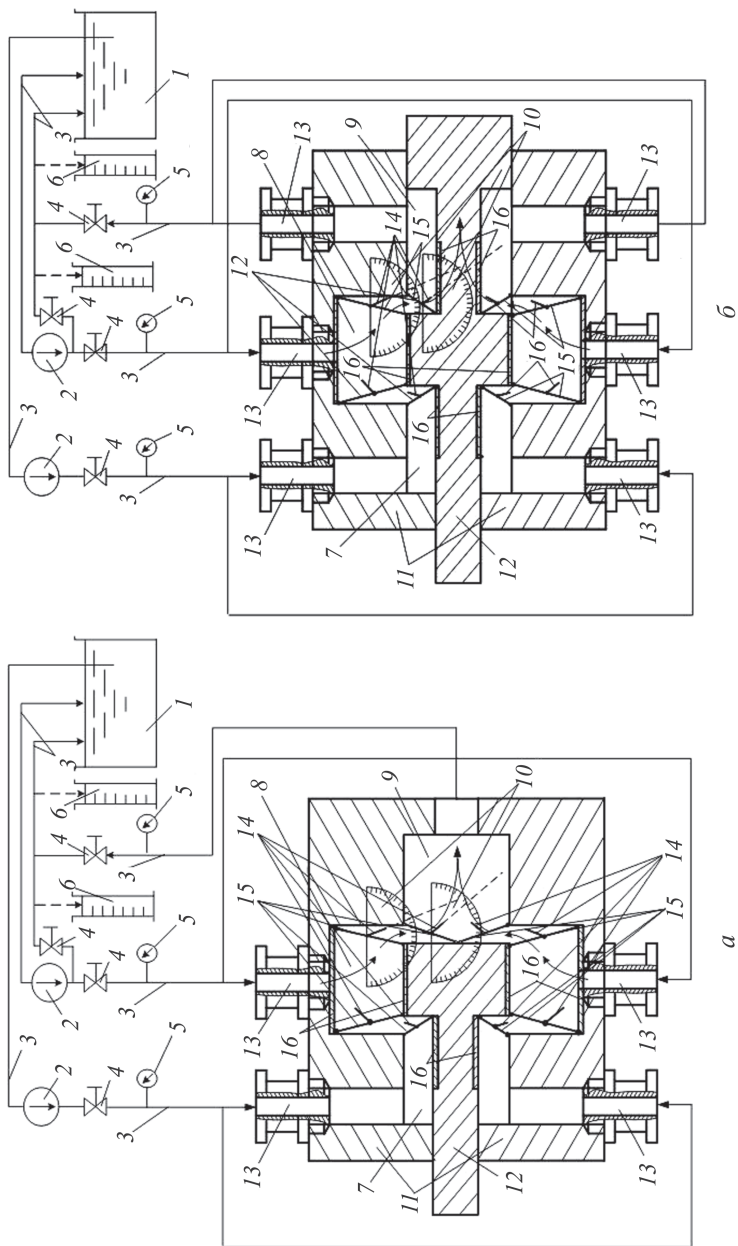
**Описание экспериментальной установки.** Для исследования поведения углов истечения потоков в дроссельных окнах золотниковых ГР были изготовлены экспериментальные установки, в основу которых положены устройства [11, 12] и способ [13], разработанные автором и защищенные патентами РФ.

Установки (рис. 3) включали в себя источник рабочей жидкости (электронасосный агрегат), гидравлическую арматуру (трубопроводы, вентили, манометры), а также мерные колбы, измеритель углов наклона потоков, в качестве которого использовался прозрачный транспортир, и прозрачные модели золотниковых ГР, представляющие собой плоские фрагменты золотниковых пар толщиной, соответствующей ширине дроссельных окон, выполненные в масштабе 100 : 1.

Прозрачные модели золотниковых ГР состояли из имитатора золотникового плунжера, имитатора гильзы, выполненных из алюминиевого сплава, и прозрачных боковых стенок из органического стекла. При этом неподвижные части макетов (имитаторы гильзы) имели штуцеры подвода рабочей жидкости к наливной и рабочей камерам, а также отвода рабочей жидкости из рабочей и сливной камер.

На поверхности пояска имитатора золотникового плунжера, а также в пазах его штоков, расположенных в наливной и сливной камерах, и в зазорах между пояском золотникового плунжера и внутренней поверхностью гильзы устанавливались наборы вкладышей, предназначенные для исследования влияния геометрических размеров камер ГР на углы наклона потоков.

Индикация углов наклона потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон исследуемых прозрачных моделей ГР осуществлялась флажковыми флюгерами, которые с помощью осей и пар растяжных элементов (тонких резиновых нитей) устанавливались в наливной, рабочей и сливной камерах таким образом, что при любом положении имитатора золотникового плунжера относительно имитатора гильзы основания флажковых флюгеров оказывались практически посередине дроссельных окон и практически посередине глубин золотниковых камер. Такая конструкция обеспечивала индикацию углов наклона потоков, близких к интегральным не только по величине открытия дроссельного окна, но и по глубине соответствующей камеры.



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки для определения углов истечения потоков в наливных и сливных дроссельных окнах прямоугольной (а) и сегментной (б) форм: 1 — резервуар рабочей жидкости; 2 — насос; 3 — трубопровод; 4 — вентиль; 5 — датчик давления; 6 — мерный сосуд; 7, 8 и 9 — наливная рабочая и сливная камеры; 10 — прозрачный транспорт; 11 и 12 — имитаторы гильзы и золотникового плунжера; 13 — штуцер; 14 — флажковый флюгер; 15 — растяжной элемент; 16 — набор вкладышей

Для облегчения установки имитатора золотникового плунжера в требуемое положение на поверхности прозрачных стенок были нанесены тонкие вертикальные риски с шагом 0,5 мм.

Установка, представленная на рис. 3, а, предназначена для исследования углов истечения потоков в дроссельных окнах прямоугольной и сегментной форм, а установка, представленная на рис. 3, б, предназначена для исследования углов истечения потоков в дроссельных окнах только прямоугольной формы.

**Описание проведенных экспериментов.** При проливках наливных дроссельных окон рабочая жидкость поступала в наливную камеру и сливалась из рабочей и сливной камер. При проливках сливных дроссельных окон рабочая жидкость поступала в рабочую камеру и сливалась из сливной камеры.

В процессе проведения экспериментов за счет числа устанавливаемых вкладышей изменялись значения глубины наливной  $l_n$ , рабочей  $l_p$  и сливной  $l_c$  золотниковых камер, а также размер, соответствующий радиусу пояса  $l_n$  имитатора золотникового плунжера. Углы наклона потоков измерялись при ступенчатом перемещении имитаторов золотниковых плунжеров как в сторону открытия дроссельных окон, так и в сторону их закрытия.

Проливки осуществлялись при различных фиксированных значениях расхода рабочей жидкости, подаваемой в прозрачную модель золотникового ГР, при этом расход рабочей жидкости контролировался с помощью мерных колб, устанавливаемых на выходах рабочей и (или) сливной камер, а регулировался с помощью вентиля, за счет чего обеспечивались требуемые значения давлений нагнетания и слива, при этом контроль давлений в полостях прозрачной модели ГР осуществлялся манометрами.

В качестве меры потоков использовалось число Рейнольдса, определяемое как

$$Re = (4Q) / (n\Pi\nu),$$

где  $Q$  — расход рабочей жидкости, протекающей через дроссельное окно;  $\Pi$  — смоченный периметр дроссельного окна;  $\nu$  — кинематическая вязкость рабочей жидкости;  $n$  — число одновременно проливаемых дроссельных окон.

**Результаты экспериментов.** В результате экспериментов и визуальных наблюдений установлено следующее.

При числах Рейнольдса до  $Re \approx 100$  углы наклона потоков в камерах за дроссельными окнами с увеличением открытия наливных и сливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной форм сначала монотонно возрастают, достигая максимума ( $\sim 69^\circ$ ), а затем убывают практически по линейному закону, что хорошо согласуется с данными

работы [7]. При этом характеристики углов наклона потоков наливных дроссельных окон достигают максимума при меньших значениях открытия, чем у сливных дроссельных окон, а характеристики углов наклона потоков дроссельных окон сегментной формы мало отличаются от характеристик углов наклона потоков дроссельных окон прямоугольной формы. С увеличением зазора между пояском золотникового плунжера и гильзой углы наклона потоков наливных и сливных дроссельных окон в общем случае уменьшаются, а градиенты уменьшения углов наклона потоков в зонах за максимумом увеличиваются. Влияние глубины камеры, в которую втекает поток рабочей жидкости, и формы дроссельного окна на характеристики зависимостей углов наклона потоков от открытия дроссельных окон при указанных числах Рейнольдса незначительно.

При числах Рейнольдса более  $Re \approx 600$ , зависимости углов наклона потоков в камерах за дроссельными окнами от открытия дроссельных окон существенно зависят от:

- глубины камеры, в которую втекает поток рабочей жидкости;
- зазора между пояском золотникового плунжера и гильзой;
- формы дроссельного окна;
- направления движения золотникового плунжера.

На характеристики углов наклона потоков сливных дроссельных окон дополнительно оказывает влияние наличие шейки и уплотнительного буртика золотникового плунжера в сливной камере гильзы (см. рис. 3, б). При малых значениях глубины рабочей камеры и открывании наливного дроссельного окна вначале наблюдается прилипание струи потока к стенке камеры (пристеночное течение), а в камере наблюдается одна вихревая зона. Дальнейшее перемещение золотникового плунжера в сторону открывания дроссельного окна приводит к отрыву струи потока от стенки камеры (отрывное течение) и образованию около нее второй вихревой зоны. При закрывании наливного дроссельного окна в камере постоянно наблюдаются две вихревые зоны. Поэтому при открывании наливного дроссельного окна углы наклона потоков больше чем при закрывании. Для сливных дроссельных окон указанное явление носит обратный характер. При открывании сливного дроссельного окна углы наклона потоков меньше чем при закрывании. Отмеченные явления могут являться дестабилизирующим фактором и указывают на возможность существования различных значений коэффициентов расхода и коэффициентов сжатия потоков в дроссельных окнах, соответствующих этим режимам. При увеличении глубины камеры, в которую втекает поток рабочей жидкости, разность между углами наклона потоков, соответствующих режимам открывания и закрывания, как для наливных, так и для сливных дроссельных окон уменьшается. При отсутствии у золотниковых ГР шейки и уплотнительного буртика в сливной камере гильзы

и наличии симметричных встречно направленных сливных дроссельных окон (см. рис. 3, *a*) такая неоднозначность углов наклона потоков не наблюдается, что объясняется взаимодействием потоков рабочей жидкости вдоль стенки камеры. Увеличение относительного зазора между пояском золотникового плунжера и гильзой в общем случае приводит к уменьшению углов наклона потоков как наливных, так и сливных дроссельных окон как прямоугольной, так и сегментной формы. Углы наклона потоков в наливных и сливных дроссельных окнах сегментной формы как правило больше углов наклона потоков в дроссельных окнах прямоугольной формы. Существенное влияние на характеристики углов наклона потоков имеет глубина камеры, в которую втекает поток рабочей жидкости из дроссельного окна, при этом, чем она меньше, тем в общем случае меньше углы наклона потоков. Кроме того, с уменьшением характеристик углов наклона потоков у сливных дроссельных окон при малой глубине сливной камеры и наличии у золотникового плунжера шейки и уплотнительного буртика в сливной камере (см. рис. 3, *б*) первый локальный минимум характеристики зависимости угла наклона потока от относительного открытия сливного дроссельного окна может достигать нулевых значений, что также может являться дестабилизирующим фактором.

При числах Рейнольдса до  $Re \approx 100$  углы наклона потоков в камерах перед дроссельными окнами с увеличением открытия наливных и сливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной формы монотонно убывают практически по линейному закону.

При числах Рейнольдса более  $Re \approx 600$  углы наклона потоков в камерах перед дроссельными окнами при открытии дроссельных окон убывают по криволинейному закону.

При числах Рейнольдса более  $Re \approx 100$  и менее  $Re \approx 600$  потоки как перед, так и за дроссельными окнами носят ярко выраженный пульсирующий характер, что сопровождается колебаниями флажковых флюгеров, при этом средние значения углов наклона потоков в фиксированных положениях золотникового плунжера относительно гильзы с увеличением числа Рейнольдса в указанном диапазоне сначала резко увеличиваются (или уменьшаются), а затем постепенно приближаются к значению, соответствующему турбулентному режиму.

Среднестатистический график изменения параметра  $K_{Re}$ , определяемый как

$$K_{Re} = \frac{\beta_{\Pi} - \beta_{\text{Л}}}{\beta_{\text{Т}} - \beta_{\text{Л}}},$$

от числа Рейнольдса  $Re$ , представлен на рис. 4 (здесь  $\beta_{\Pi}$  — угол наклона потока, соответствующий переходной области;  $\beta_{\text{Л}}$  — угол наклона потока при  $Re \leq 100$ ;  $\beta_{\text{Т}}$  — угол наклона потока при  $Re \geq 600$ ).



Идентификация углов истечения потоков в дроссельных окнах при ламинарном и турбулентном режимах течения потоков осуществлялась следующим образом:

— определялись углы  $\beta_{\text{вх}}$  и  $\beta_{\text{вых}}$  наклона потоков в камере перед и за дроссельным окном соответственно;

— определялись углы истечения потоков в дроссельных окнах по выражению

$$\beta = \frac{\beta_{\text{вх}} l_{\text{вх}} + \beta_{\text{вых}} l_{\text{вых}}}{l_{\text{вх}} + l_{\text{вых}}},$$

где  $l_{\text{вх}}$  и  $l_{\text{вых}}$  — глубина камеры перед и за дроссельным окном.

Результаты обработки данных экспериментов по приведенной методике для конфигураций реальных конструкций золотниковых ГР при трех значениях зазоров между золотниковым плунжером и гильзой и отсутствии прилипания потоков к стенкам камер и золотнику представлены на рис. 5. Поскольку золотниковые плунжеры ЭГУ рулевых машин располагаются во вращающихся осях трехшестеренных насосов, исполняющих роль гильз ГР, прилипания потоков к стенкам камер и золотнику исключается.

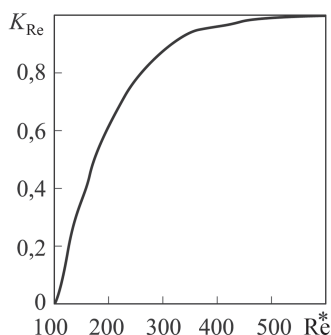
Для получения безразмерных параметров здесь значение открытия  $X$  наливного и сливного дроссельных окон нормированы значением зазора между имитатором золотникового плунжера и имитатором гильзы  $h_z$ , т.е.

$$\chi = X/h_z,$$

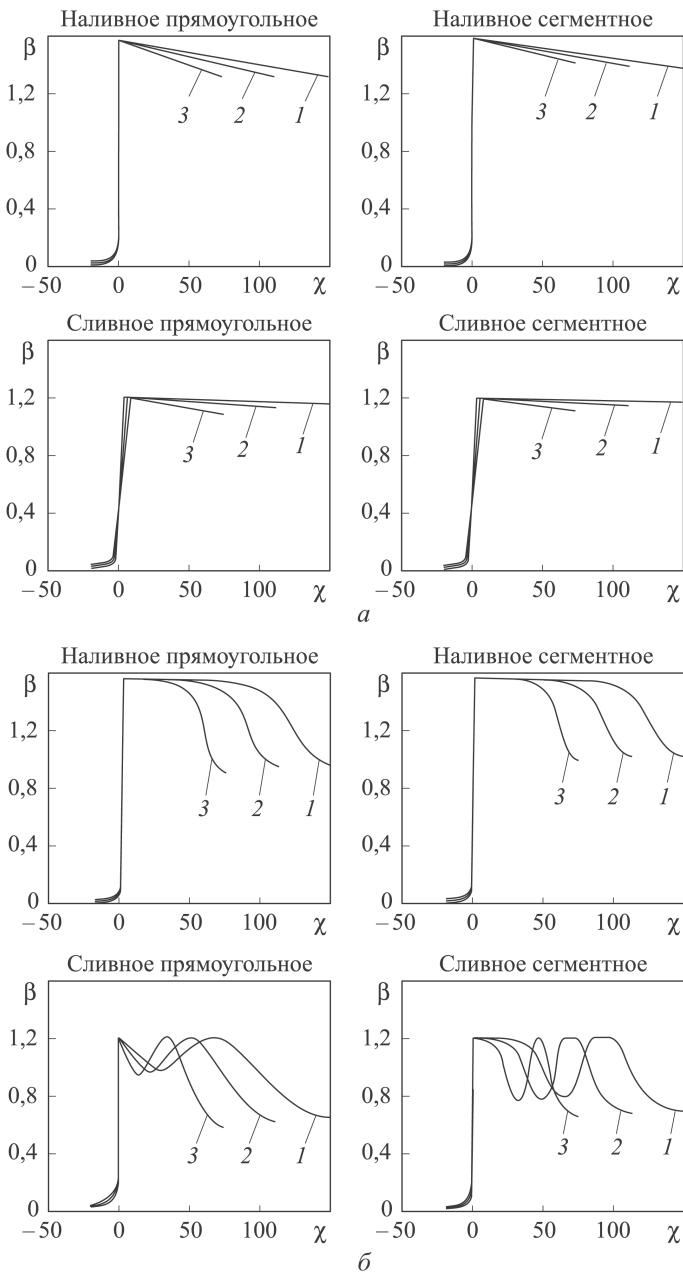
где  $\chi$  — относительное открытие дроссельного окна, а  $h_z$  определяется как  $h_z = l_\Gamma - l_\Pi$  (здесь  $l_\Gamma$  — размер, соответствующий радиусу внутренней поверхности гильзы,  $l_\Pi$  — размер, соответствующий радиусу пояса золотникового плунжера).

Для ГР с прямоугольными дроссельными окнами эмитируемые параметры составляли:  $l_\Gamma = 2,005$  мм;  $l_\Pi = 1,998 \dots 2,000$  мм;  $l_{\text{вх}} = 0,96 \dots 1,00$  мм и  $l_{\text{вых}} = 4,5 \dots 5,0$  мм для наливных дроссельных окон и  $l_{\text{вх}} = 4,5 \dots 5,0$  мм  $l_{\text{вых}} = 2$  мм для сливных дроссельных, а для ГР с сегментными дроссельными окнами:  $l_{\text{вх}} = 7$  мм;  $l_{\text{вых}} = 2,25$  мм;  $l_\Gamma = 2,25$  мм;  $l_\Pi = 2,2 \dots 2,25$  мм.

**Математические модели зависимостей углов истечения потоков в сечениях дроссельных окон золотниковых ГР от их относительного открытия.** На основании полученных результатов экспериментов зависимости углов истечения потоков в сечениях наливных дроссельных окон прямоугольной ( $\beta_{\text{н.п}}$ ) и сегментной ( $\beta_{\text{н.с}}$ ) форм, а



**Рис. 4. Среднестатистический график изменения параметра  $K_{\text{Re}}$  от числа Рейнольдса  $Re$**



**Рис. 5.** Зависимости результирующих углов истечения потоков в наливных прямоугольных, наливных сегментных, сливных прямоугольных и сливных сегментных окнах золотниковых ГР от их относительного открытия при ламинарном (*а*) и турбулентном (*б*) режимах истечения: 1, 2, 3 –  $h_z = 3, 4$  и 6 мкм соответственно

также сливных дроссельных окон прямоугольной ( $\beta_{с.п}$ ) и сегментной ( $\beta_{с.с}$ ) форм от относительного открытия дроссельных окон ( $\chi$ ) золотниковых ГР можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\beta_{н.п} &= \beta_{л.н} + K_{Re}(\beta_{т.н.п} - \beta_{л.н}); \\ \beta_{н.с} &= \beta_{л.н} + K_{Re}(\beta_{т.н.с} - \beta_{л.н}); \\ \beta_{с.п} &= \beta_{л.с} + K_{Re}(\beta_{т.с.п} - \beta_{л.с}); \\ \beta_{с.с} &= \beta_{л.с} + K_{Re}(\beta_{т.с.с} - \beta_{л.с}),\end{aligned}$$

где  $\beta_{л.н}$  и  $\beta_{л.с}$  — углы истечения потока в сечениях наливного и сливного дроссельных окон при ламинарном режиме течения рабочей жидкости;  $\beta_{т.н.п}$  и  $\beta_{т.н.с}$  — углы истечения потока в сечениях наливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной форм при турбулентном режиме течения рабочей жидкости;  $\beta_{т.с.п}$  и  $\beta_{т.с.с}$  — то же для сливных дроссельных;  $K_{Re}$  — коэффициент режима течения рабочей жидкости в дроссельном окне.

Для наиболее точной аппроксимации зависимостей углов истечения потоков от относительного открытия дроссельных окон и относительного зазора между пояском золотникового плунжера и гильзой может быть применен метод сплайн-интерполяции–экстраполяции, в соответствии с которым зависимости можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\beta_{л.н} &= spl(\chi, h_z); \\ \beta_{л.с} &= spl(\chi, h_z); \\ \beta_{т.н.п} &= spl(\chi, h_z); \\ \beta_{т.н.с} &= spl(\chi, h_z); \\ \beta_{т.с.п} &= spl(\chi, h_z); \\ \beta_{т.с.с} &= spl(\chi, h_z); \\ K_{Re} &= \begin{cases} 0 & \text{при } Re \leq 100; \\ spl(Re) & \text{при } 100 < Re < 600; \\ 1 & \text{при } Re \geq 600. \end{cases}\end{aligned}$$

**Заключение.** 1. Разработаны, изготовлены и применены для исследований новые устройства для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых ГР со стационарными гильзами, отличающиеся плоской прозрачной моделью золотникового ГР, в наливной, рабочей и сливной камерах которых с помощью осей и пар растяжных элементов установлены флажковые флюгеры, защищенные патентами РФ.

2. Разработан и применен для идентификации новый способ определения углов истечения потоков, отличающийся возможностью определения углов истечения, близких к интегральным, не только по величине открытия дроссельного окна, но и по глубинам наливной, рабочей и сливной камер, защищенный патентом РФ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

— определены представленные зависимости изменения углов истечения потоков рабочей жидкости в наливных и сливных дроссельных окнах золотниковых ГР прямоугольной и сегментной форм от их относительного открытия при ламинарном, турбулентном и переходном режимах течения потоков;

— предложена сплайн-интерполяция–экстраполяция полученных зависимостей;

— показано, что у золотниковых ГР со стационарными гильзами углы истечения потоков в сливных дроссельных окнах сегментной формы при одних и тех же условиях в общем случае больше, чем в сливных дроссельных окнах прямоугольной формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Backe W.* Systematik der hydraulischen Widerstandsschaltungen in Ventilen und Regelkreisen // Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz, 1974. 223 s.
2. *Ikebe Y., Ohuchi H.* Generalized Formulation of Momentum Theory // Fluidic Quarterly. 1978. No. 10. P. 27–46.
3. *Taft C.K., Twill J.P.* An Analysis of the Three-Way Underlepped Hydraulic Spool Servovalve // Transaction of ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 100, June 1978. P. 117–123.
4. *Palczak E.* Experimentelles Bestimmen der Durchflubzahl von hydraulischen Wegeventilen // Maschinenmarkt. 1993–1999. No. 88, 90, 93.
5. *Von Mises R.* Berechnung von Ausfluss- und Ueberfallzahlen, VDI, Band 61. No. 21, 22, 23, 1917.
6. *Данилов Ю.А., Кириловский Ю.Л., Колпаков Ю.Г.* Аппаратура объемных гидроприводов. Рабочие процессы и характеристики. М.: Машиностроение, 1990. 274 с.
7. *Захаров Ю.Е.* К вопросу о гидродинамике золотников // Изв. вузов СССР. Машиностроение. 1960. № 9. С. 45–58.
8. *Чупраков Ю.И.* Гидропривод и средства гидроавтоматики. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.
9. *Валивахин С.А.* Измерение гидродинамического усилия и угла истечения потока в плунжерной паре с проточным золотником // Вестник машиностроения. 1988. № 11. С. 19–21.
10. *Блэкборн Дж., Ритхоф Г., Шерер Дж.* Гидравлические и пневматические силовые системы управления. М.: ИИЛ, 1962. 615 с.
11. *Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя:* пат. 2220332 РФ / О.Б. Белоногов; заявл. 21.01.2002; опубл. 27.12.2003. Бюлл. № 36.
12. *Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя:* пат. 2262010 РФ / О.Б. Белоногов; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.10.2005. Бюлл. № 28.
13. *Способ определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя:* пат. 2329413 РФ / О.Б. Белоногов, заявл. 03.03.2006; опубл. 20.07.2008. Бюлл. № 20.

## REFERENCES

- [1] Backe W. Systematik der hydraulischen Widerstandsschaltungen in Ventilen und Regelkreisen [Classification of hydraulic circuits of resistance at valves and control circuits]. Mainz, Krausskopf-Verlag GmbH, 1974. 223 p.
- [2] Ikebe Y., Ohuchi H. Generalized formulation of momentum theory. *Fluidic Quarterly*, 1978, no. 10, pp. 27–46.
- [3] Taft C.K., Twill J.P. An analysis of the three-way underlapped hydraulic spool servovalve. *Transaction of ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 1978, vol. 100, pp. 117–123. DOI:10.1115/1.3426353
- [4] Palczak E. Experimentelles Bestimmen der Durchflubzahl von hydraulischen Wegeventilen [Experimental determination of the discharge coefficient for hydraulic valves] *Maschinenmarkt*, 1993–1999, no. 88, 90, 93 (in Ger.).
- [5] Mises R. von. Berechnung von Ausfluss und Ueberfallzahlen [Computation of discharge and overfall coefficients]. *Z. ver. Deuts. Ing. (VDI)*, 1917, vol. 61, p. 447 (in Ger.).
- [6] Danilov Yu.A., Kirilovskiy Yu.L., Kolpakov Yu.G. Apparatura ob'emnykh gidroprivodov: Rabochie protsessy i kharakteristiki [Equipment for fluid power drive. Operating procedure and characteristics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 272 p.
- [7] Zakharov Yu.E. On the hydrodynamics of valves. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinostr.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1960, no. 9, pp. 45–58 (in Russ.).
- [8] Chuprakov Yu.I. Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki [Hydraulic drive and facilities of hydro automatic]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 232 p.
- [9] Valivakhin S.A. Measurement of hydrodynamic force and efflux angle at the pump element with open-centre valve. *Vestn. Mashinostr.* [Russ. Eng. Res.], 1988, pp. 19–21 (in Russ.).
- [10] Blackburn J.F., Reethof G., Shearer J.L. Fluid power control. MIT Press and John Wiley & Sons, 1960. 710 p. (Russ. Ed.: Blekborn Dzh, Khokhlov V.A., eds. Gidravlicheskie i pnevmaticheskie silovye sistemy upravleniya [Hydraulic and pneumatic power control systems]. Moscow, IL Publ., 1962. 615 p.).
- [11] Belonogov O.B. Ustroystvo dlya opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredelatelya [Device for determining working liquid efflux angle within throttling window sections of sleeve hydraulic valve]. Patent RF, no. 2220332, 2003.
- [12] Belonogov O.B. Ustroystvo dlya opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredelatelya [Device for determining 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.
- [13] Belonogov O.B. Sposob opredeleniya uglov istecheniya potokov rabochey zhidkosti v secheniyakh drossel'nykh okon zolotnikovogo gidroraspredelatelya [Method for determination of working medium flows effluent angles in sections of throttle windows of slide hydraulic valves]. Available at: [russianpatents.com/patent/232/2329413.html](http://russianpatents.com/patent/232/2329413.html) (accessed 09.09.2014)]. Patent RF, no. 2329413, 2008.

Статья поступила в редакцию 10.02.2014

Белоногов Олег Борисович — канд. техн. наук, начальник сектора ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”. Автор 39 научных работ и 34 свидетельств и патентов на изобретения в области расчетов характеристик и идентификации параметров электрогидравлических и электропневматических систем и приводов ракет и космических аппаратов.

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва”, Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

Belonogov O.B. — Cand. Sci. (Eng.), chief of department of S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”. Author of 39 publications, 34 patents and inventor’s certificates in the fields of analysis and calculation of characteristics and identification of parameters for electrohydraulic and electropneumatic systems and actuators of rockets and space vehicles.

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.