

УДК 62-34

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ КАНАВОК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ СИЛУ ПОТОКА

Ю.И. Железнякова, Д.Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Эффективность и точность управления в гидравлических системах напрямую зависят от поведения золотникового клапана. Ключевым фактором, влияющим на это поведение, является гидродинамическая сила потока рабочей жидкости, действующая на управляющий элемент (золотник). Данная сила создает нагрузку, противодействующую перемещению золотника, что может снижать точность позиционирования и стабильность системы. Традиционно используемые геометрии дросселирующих канавок (U-образные, треугольные, К-образные) на цилиндрической поверхности запорного элемента обеспечивают ограниченный контроль над этим параметром [1]. В связи с этим актуальной задачей является поиск и исследование новых перспективных конструкций, таких как наклонные канавки, позволяющих кардинально улучшить характеристики системы за счет плавного управления силой потока.

Цель исследования. Исследование влияния геометрии дросселирующих канавок на цилиндрической поверхности запорного элемента, в частности, перспективной конструкции наклонных канавок, на величину и характер изменения гидродинамической силы потока в золотниковых распределителях для повышения точности и плавности управления гидравлическими системами.

Постановка задачи. Сила потока жидкости, возникающая при работе золотникового распределителя, является критическим фактором, влияющим на точность и стабильность системы управления. Она действует против направления движения золотника, стремясь закрыть клапан, что создает дополнительную нагрузку на управляющие элементы и может снизить точность позиционирования.

Экспериментально установлено, что сила потока минимальна, когда угол наклона струи жидкости, вытекающей из щели клапана, составляет приблизительно 69° [2]:

$$F_{ГД} = \rho \cdot Q \cdot v \cdot \cos \theta ,$$

где $F_{ГД}$ – гидродинамическая сила, направленная вдоль оси золотника; ρ – плотность рабочей жидкости; Q – расход жидкости через рассматриваемое сечение; v – скорость потока жидкости; θ – угол наклона струи жидкости.

Конструкция с перпендикулярными стенками создает хаотичное поле скоростей, зоны высокого давления и турбулентность, что увеличивает силу воздействия на золотник. Прорывным решением стало применение плавного, изогнутого перехода на внутренней стенке золотника (рис. 1, а), что позволило снизить гидродинамическую силу на золотник почти на 60% [2]. Однако, когда требования к плавности хода и точности позиционирования становятся критичными (например, при работе на полях с высокой неровностью), и таких решений недостаточно.

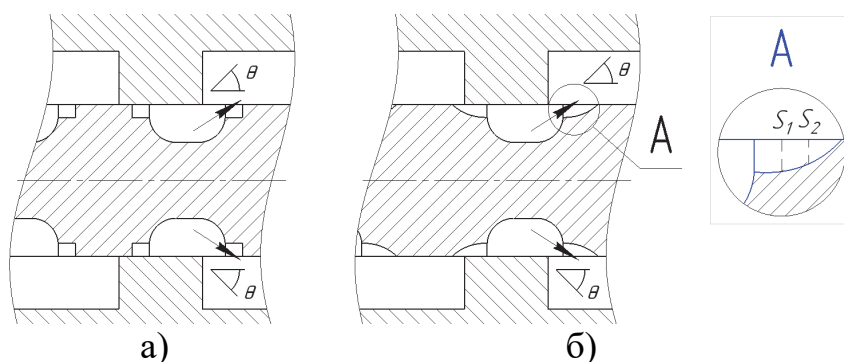


Рис. 1 – Конструкция золотникового распределителя:
а – традиционная конструкция; б – оптимизированная конструкция

Методы исследований. Основным инструментом управления силой потока является конструкция дроселирующих канавок на цилиндрической поверхности золотника. Разная геометрия канавок по-разному влияет на характеристики системы: треугольные и U-образные канавки демонстрируют почти линейный рост силы потока с увеличением открытия клапана, К-образные канавки обеспечивают лучшую линейность расхода, что является желательной характеристикой для точного управления, комбинированные канавки (U+К) могут вызывать колебания расхода в точке перехода между формами. Моделирование (CFD-анализ) и эксперименты показывают, что вблизи полного открытия клапана картина резко меняется: сопротивление потоку падает, а сила потока может скачкообразно возрастать [3].

Однако недостатком типов таких канавок является то, что их пропускная способность и, как следствие, формируемая сила потока определяются исключительно площадью проходного сечения, открываемого при смещении золотника. Повышение точности и плавности управления потоком достигается за счет применения наклонных канавок на цилиндрической поверхности золотника. В отличие от типов канавок с постоянным профилем, у наклонной канавки глубина и/или угол наклона стенки плавно изменяются по квадратичной зависимости и поперек оси, и по длине золотника:

$$S_n = S_{n+1}^2,$$

где S_n – площадь поперечного сечения канавки в сечении n (рис. 1, б).

Это позволит точно проектировать изменение гидродинамической силы в зависимости от хода золотника, что приведет к более линейному изменению скорости потока и давления в межзолотниковой полости и позволит уменьшить пиковое значение силы потока на определенный участок хода, снизив максимальную нагрузку на управляющий элемент и повысив точность.

Результаты и обсуждение. Таким образом, установлено, что традиционные геометрии канавок (треугольные, U-образные) на цилиндрической поверхности запорного элемента демонстрируют почти линейный рост силы потока, а K-образные и комбинированные (U+K) могут вызывать колебания расхода в точке перехода между формами. CFD-анализ показал, что вблизи полного открытия клапана сопротивление потоку падает, а сила потока может скачкообразно возрасти. Конструкция с перпендикулярными стенками создает хаотичное поле скоростей, зоны высокого давления и турбулентность, что увеличивает силу воздействия на золотник. Применение плавного, изогнутого перехода на внутренней стенке является эффективным решением для ее снижения.

На основании этого предложена конструкция наклонной канавки на цилиндрической поверхности золотника, у которой глубина и/или угол наклона стенки плавно изменяются по квадратичной зависимости как вдоль оси золотника, так и поперек. Это позволяет не просто управлять площадью проходного сечения, а точно проектировать закон изменения гидродинамической силы в зависимости от хода золотника. Также показано, что ключевым преимуществом наклонных канавок является возможность снижения пикового значения силы потока на определенных участках хода, что ведет к снижению максимальной нагрузки на управляющий элемент. Это, в свою очередь, позволяет добиться более линейного изменения скорости потока и давления, повышая точность и плавность управления.

Выводы. Гидродинамическая сила потока является критическим параметром, определяющим точность и стабильность работы золотниковых распределителей, и требует активного управления путем оптимизации геометрии дросселирующих канавок. Традиционные геометрии канавок на цилиндрической поверхности запорного элемента не позволяют гибко управлять силой потока по ходу золотника и могут приводить к ее скачкообразным изменениям. Конструкция наклонных канавок, основанная на плавном изменении профиля по квадратичному закону, представляет собой эволюционный шаг в проектировании, обеспечивающий точный контроль над характеристиками клапана. Применение наклонных канавок является перспективным направлением для создания высокоточных и надежных гидравлических систем, где предъявляются повышенные требования к плавности хода, точности позиционирования и снижению шума во всем рабочем диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стасенко, Д. Л. Теоретические положения формирования проточной части гидроаппаратуры при форсировании по давлению / Д. Л. Стасенко, Д. В. Лаевский. – Минск: Актуальные вопросы машиноведения. Выпуск 1, 2012. – 282 с.
2. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика / Т. М. Башта – М.: Машиностроение, 1971. – 350 с.
3. Ye, Y.; Yin, C.-B.; Li, X.-D.; Zhou, W.-J.; Yuan, F.-F. Effects of groove shape of notch on the flow characteristics of spool valve. *Energy Convers. Manag.* 2014, 86, 1091–1101. [CrossRef].