



Е. А. КРЕСТИН  
Г. В. СЕРЕБРЯКОВ

### АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ПРИВОДОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

ANALYSIS OF THE OPERATING CONDITIONS OF CONTACTLESS  
SEALS DURING RECIPROCATING MOTION OF PLUNGER PAIRS  
OF DRIVES OF CONSTRUCTION MACHINES

Гидравлический привод строительных машин и механизмов, используемых в технологических строительных процессах, находит все более широкое применение в строительной индустрии. Это обусловлено небольшой массой и малыми габаритными размерами на единицу мощности привода, незначительной инерционностью подвижных частей, хорошими динамическими характеристиками, легкостью реверсирования, плавностью хода, долговечностью механизмов вследствие самосмазываемости, простоте и надежности работы. Надежность работы гидравлического привода строительных машин во многом определяется эффективностью системы смазки бесконтактных уплотнений подвижных соединений. Стабильность характеристик, коэффициента полезного действия и безопасность эксплуатации механизмов и гидравлического привода, в частности, зависит от качества смазки поверхностей скольжения. С целью повышения качества и долговечности работы гидропривода для определенного диапазона диаметров плунжеров и перепадов давления в гидроагрегатах наиболее рациональным средством борьбы с силами сухого трения является щелевое бесконтактное уплотнение.

**Ключевые слова:** гидропривод, строительные машины, технология строительства, щелевые уплотнения, зазоры, плунжер, возвратно-поступательное движение, лабиринтные уплотнения, гидроагрегаты

Hydraulic drive of construction machines and mechanisms used in technological construction processes is increasingly being used in the construction industry. This is due to the small weight and small overall dimensions per unit of drive power, insignificant inertia of moving parts, good dynamic characteristics, ease of reversing, smooth running, durability of mechanisms due to self-lubricity, simplicity and reliability of operation. The reliability of the hydraulic drive of construction machines is largely determined by the effectiveness of the lubrication system of contactless seals of movable joints. The stability of characteristics, efficiency and safety of operation of mechanisms and hydraulic drive, in particular, depends on the quality of lubrication of sliding surfaces. In order to improve the quality and durability of the hydraulic drive for a certain range of plunger diameters and pressure drops in hydraulic units, the most rational means of combating dry friction forces is a slit non-contact seal.

**Key words:** hydraulic drive, construction machines, construction technology, slot seals, gaps, plunger, reciprocating motion, labyrinth seals, hydraulic units

Анализ работы уплотнений для соединений с возвратно-поступательным движением говорит о том, что создание надёжной конструкции уплотнений является одной из важнейших в мировой технике. Стабильная работа уплотнений определяет возможные рабочие параметры, ресурс и надёжность привода гидравлических систем и его элементов, а также последующее развитие механизмов с гидроприводом.

Патентные исследования и литературные источники [1–6] показывают основные тенденции развития конструкций уплотнений подвижных соединений:

- увеличение надёжности и долговечности;
- применение современных материалов повышенной износостойкости в экстремальных условиях работы;
- совершенствование работы уплотнений без смазки или в средах, имеющих плохие смазывающие свойства;
- оптимизация технологии изготовления и снижение стоимости производства конструкции;
- создание долговечных уплотняющих элементов с повышенными характеристиками для различных условий функционирования гидравлических приводов строительных машин и механизмов [7–11].

При эксплуатации гидравлических систем [12] число отказов, связанных с потерей герметичности, составляет 66 %. Выход из строя узлов гидравлических агрегатов чаще всего происходит из-за нарушения работы уплотнений.

Строительные машины, механизмы и агрегаты эксплуатируют в экстремальных условиях: сильной запыленности, высокой влажности, резкого изменения температуры, ударных нагрузок, вибрации и т. д. Поэтому необходимо, чтобы гидравлические уплотнения в конкретных условиях работы машин и механизмов соответствовали следующим требованиям [12]:

- надёжная степень герметизации как в состоянии покоя, так и при возвратно-поступательном движении уплотняемых сопрягаемых поверхностей;
- износоустойчивость, продиктованная установленным числом рабочих циклов и сроком службы агрегата;
- высокий КПД исполнительного механизма при минимальных утечках рабочей жидкости;
- сопротивление к пульсациям рабочего давления, ударным нагрузкам и вибрациям;
- минимальные усилия, необходимые для страгивания с места подвижных соединений;
- невосприимчивость к химическому воздействию по отношению к соприкасающимся деталям и жидкостям;

– компактные габаритные размеры, технологичность конструкции, доступность ремонта, сборки и регулировки;

– универсальность использования в различных сферах.

При проектировании и эксплуатации уплотнений подвижных соединений следует принимать компромиссное решение между долговечностью и утечками [12].

Все существующие типы уплотнений подразделяются на две группы. В уплотнениях первой группы герметичность достигается за счёт контакта и «поджима» поверхностей с использованием уплотняющего элемента: кольца, манжеты, прокладки, диафрагмы и т. д. Такие уплотнения называются контактными. Вторая группа – бесконтактные уплотнения, в которых между уплотняемыми поверхностями всегда существует малый зазор. Сквозь этот зазор всегда неизбежна утечка жидкости с небольшим расходом. Уплотняющий эффект, регулирующий величину утечки, в бесконтактных уплотнениях достигается за счёт возникновения гидравлического сопротивления при течении через малый зазор вязкой жидкости [11]. Бесконтактные уплотнения подразделяются на щелевые и лабиринтные. Щелевым уплотнением называют зазор между сопрягаемыми деталями, который необходим для обеспечения малой силы трения при относительном перемещении уплотняемых деталей.

Щелевые уплотнения применяют в механизмах с малыми диаметрами плунжеров и валов, не более 100 мм, при давлениях до 60 МПа. В таких уплотнениях сложно достичь абсолютной герметичности при любом малом зазоре, из-за чего подобные соединения используют только в тех случаях, когда не требуется полная герметичность [5, 11].

За счёт отсутствия прямого контакта между сопрягаемыми деталями, в щелевых уплотнениях не только снижаются механические потери на трение, но и значительно повышается надёжность и износостойкость деталей.

Для агрегатов с контактными уплотнениями также почти невозможно обеспечить абсолютную герметичность при подвижных соединениях. Например, при прямолинейном возвратно-поступательном движении некоторый объём жидкости будет подвергаться переносу подвижной уплотняемой деталью в виде жидкостной пленки. В этом случае уплотнительный элемент удаляет с поверхности гильзы эту пленку и со временем образуются отрывающиеся капли. В данной конструкции уплотнения обычного движения жидкости не происходит. Здесь наблюдается только заполнение жидкостью микрокамер на поверхности дви-

жущейся детали в уплотняемой среде под действием перепада давления, а затем – частичное опорожнение этих камер вследствие расширения жидкости при выходе этой поверхности в не уплотняемую среду с меньшим давлением [11].

Конкретные условия работы и нагружения механизмов требуют различные типы уплотнений. После всестороннего анализа особенностей работы системы и агрегатов выбирается рациональный вид уплотнения. В работе [12] отдаётся предпочтение применению контактных уплотнений с эластичными герметизирующими элементами в современных гидросистемах, однако контактные уплотнения не используются в управляющих устройствах следящих гидроприводов, у которых для достижения заданных силовой и расходной характеристик необходимы профили проходных щелей и перекрытий определенной формы, измеряемые величинами в несколько микрометров. В механизмах с возвратно-поступательным движением деталей контактные уплотнения создают силу трения, которая зависит от перепада давления жидкости. С увеличением давления жидкости сила трения повышается. Такие механизмы быстро изнашиваются и очень чувствительны к наличию частиц загрязнений жидкости. Довольно серьёзным недостатком уплотнений, выполненных из эластичных материалов, является их низкая теплостойкость.

Анализируя силы трения и величины утечек в эластомерных уплотнениях при возвратно-поступательном движении, выявлено, что эти два параметра уплотнений являются основной проблемой гидравлической уплотнительной техники [13]. Опираясь на теоретические исследования и практику эксплуатации уплотнений, автор получил нелинейную зависимость возрастания утечек от роста вязкости жидкости и скорости скольжения сопрягаемых деталей.

Повышение рабочего давления в гидроприводе увеличивает его быстродействие, уменьшает вес, но приводит к быстрому выходу из строя контактных уплотнений. При уменьшении плотности контакта увеличивается утечка, а коэффициент трения уменьшается, т. е. совершается постепенный переход от сухого к жидкому трению [14]. В этом случае утечки незначительны в сравнении с общим расходом жидкости и относительные потери мощности от них составляют менее одного процента, а сила трения и потеря мощности – десятки доли процентов.

Обычно стойкость контактных уплотнений составляет 0,5–1,0 млн двойных ходов [6]. Причина износа – трение, обусловленное самой конструкцией и назначением контактного

уплотнения. Исследования сил трения в таких уплотнениях [4] показывают, что их величина составляет до 10–15 % от движущей силы.

В гидросистемах, работающих в широком диапазоне температур при больших рабочих давлениях и при больших скоростях возвратно-поступательного движения поверхностей уплотняемых деталей, щелевые уплотнения имеют определённые преимущества над остальными видами уплотнений. В этих системах эластомерные контактные уплотнения при совместном действии высокого давления и температуры выходят и строя [12].

Таким образом, уплотнение плунжера в гидроприводах с его возвратно-поступательным движением является важной задачей, её реализация гарантирует долговечность и надёжность гидромеханизма и определяет коэффициент полезного действия агрегата. КПД установок с гидравлическим приводом будет определяться гидравлическими потерями мощности в соединительных трубопроводах, распределителе, арматуре, аккумуляторе, механическими потерями в трущихся парах и т. д.

Таким образом, наиболее рациональным видом уплотнения для малых диаметров плунжеров и перепадах давления не более 50–60 МПа является бесконтактное, в котором сухое трение переходит в чисто жидкостное трение, величина которого на несколько порядков ниже величины трения Кулона. Основная часть объёмных потерь в насосах, распределителях, гидродвигателях, в гидравлических автоматизированных системах управления происходит именно в подвижных соединениях, работающих при возвратно-поступательном движении.

В настоящее время в области гидравлических приводов электроэнергетики, машиностроения, горнорудной промышленности, в строительстве и т. д. ведутся исследования по модернизации и усовершенствованию гидродвигателей возвратно-поступательного движения [13]. При расчете таких механизмов необходимо определить величину объёмного КПД, учитывающего утечки жидкости, которые происходят в сопряжениях золотник – корпус золотника, цилиндр – поршень, гильза – плунжер. Кроме того, движение жидкости в щелевых зазорах бесконтактных уплотнений носит нестационарный характер.

**Выводы.** 1. С целью повышения надёжности и долговечности работы гидропривода для определенного диапазона диаметров плунжеров и перепада давления в гидроагрегатах наиболее рациональным средством борьбы с силами сухого трения является щелевое бесконтактное уплотнение.

2. В процессе проектирования и отладки указанного бесконтактного уплотнения необходимо выполнить гидродинамический расчет жидкости, протекающей через зазоры, с учетом нестационарности процесса.

3. В результате гидродинамического расчета необходимо определить распределение скоростей по зазору, выявить закон изменения давления как по длине канала, так и в поперечном направлении, а также найти утечку жидкости через зазор, силу вязкого трения на стенках канала при пульсирующих изменениях давления и осцилляциях стенки канала.

4. Большие усилия на экспериментальную доводку гидроаппаратуры и получение конструкций, далеких от совершенства, обусловлено отсутствием надежных методов расчета и проектирования щелевых и лабиринтных уплотнений.

5. Исследование гидродинамических параметров течения рабочей жидкости в зазорах бесконтактных, щелевых и лабиринтных уплотнений является актуальной задачей, продиктованной разработкой новой техники.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крестин Е.А. Определение утечек жидкости через зазор бесконтактного уплотнения поршня гидравлического вибратора // Научное обозрение. 2014. №5. С. 108–110.
2. Васильев В.А. Метод расчета гидродинамических сил в щелевых уплотнениях роторов мощных питательных насосов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2004. № 5. С. 115–120.
3. Эрнст В. Гидропривод и его промышленное применение: пер. с англ. М.: Машгиз, 1963. 100 с.
4. Никитин Г.А., Черкун В.Е., Дидур В.А. Повышение качества сборки плунжерных пар золотниковых распределителей // Технология и организация производства. Киев, 1971. № 1. С. 77–80.
5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта и др. 5-е изд., стер. М.: Альянс, 2011. 422 с.
6. Уплотнительные устройства в машиностроении / Б. Жирных [и др.]. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2017. 24 с.
7. Крестин Е.А., Серебряков Г.В. Гидродинамический расчет бесконтактных уплотнений с плоскими щелевыми зазорами приводов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. №2. С. 171–177. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.22.
8. Зайченко Е. Т. Нестационарное течение вязкой жидкости в щели постоянной ширины // Гидравлические машины: сборник статей. Киев: Техника, 1971. Вып. 4. С. 123–129.
9. Численное исследование устойчивости течения Тейлора между двумя цилиндрами в двумерном случае / О. М. Белоцерковский [и др.] // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2009. № 4. С. 754–768.
10. Крестин Е. А. Гидродинамический расчет бесконтактных уплотнений плунжерных пар // Научное обозрение. 2014. № 10–2. С. 430–436.
11. Машиностроительный гидропривод / под ред. В. Н. Прокофьева; авт.: Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев, В. Я. Скрицкий, В. Л. Сосонкин. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.
12. Никитин О.Ф. Рабочие жидкости и уплотнительные устройства гидроприводов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 288 с.
13. Чмиль В.П. Гидропневмопривод строительной техники. Конструкция, принцип действия, расчет. СПб.: Лань, 2011. 320 с.
14. Мокин Н.В. Гидравлические и пневматические приводы. Новосибирск: СГУПС, 2004. 353 с.

## REFERENCES

1. Krestin E.A. Determination of fluid leaks through the non-contact seal gap of the hydraulic vibrator piston. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2014, no. 5, pp. 108–110. (in Russian)
2. Vasiliev V.A. Method of calculation of hydrodynamic forces in slot seals of rotors of high-power feed pumps. *Vestnik JuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of SUSU. Ser. Mechanical engineering], 2004, no. 5, pp. 115–120. (in Russian)
3. Ernst W. *Gidroprivod i ego promyshlennoe primenenie* [Hydraulic drive and its industrial application]. Moscow, Mashgiz, 1963. 100 p.
4. Nikitin G.A., Cherkun V.E., Didur V.A. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva* [Technology and organization of production], Kiev, 1971, no. 1, pp. 77–80.
5. Bashta T.M. *Gidraulika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, Alliance, 2011. 422 p.
6. Zhirnyh B. *Uplotnitel'nye ustrojstva v mashinostroenii* [Sealing devices in mechanical engineering]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2017. 24 p.
7. Krestin E.A., Serebryakov G.V. Hydrodynamic calculation of contactless seals with plane slots in drives of electric power systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 171–177. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.22
8. Zaichenko E.T. Transient flow of viscous fluid in slots of constant width. *Gidraulicheskie mashiny: sbornik statej*. Kiev: Tehnika [Hydraulic machines: a collection of articles. Kyiv: Technology], 1971, I. 4, pp. 123–129. (in Russian)
9. Belocerkovskij O.M. Numerical study of Taylor current stability between two cylinders in the two-dimensional case. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2009, no. 4, pp. 754–768. (in Russian)

10. Krestin E.A. Hydrodynamic calculation of non-contact seals of plunger pairs. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2014, no. 10–2, pp. 430–436. (in Russian)

11. Kondakov L.A., Nikitin G.A., Prokofiev V.N., Skritsky V.Ya., Sosonkin V.L. *Mashinostroitel'nyj gidroprivod* [Machine-building hydraulic drive]. Moscow, Mechanical Engineering, 1978. 495 p.

12. Nikitin O.F. *Rabochie zhidkosti i uplotnitel'nye ustrojstva gidroprivodov* [Operating fluids and sealing devices of hydraulic drives]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, 2013. 288 p.

13. Chmil' V.P. *Gidropnevmoprivod stroitel'noj tehniki. Konstrukcija, princip dejstvija, raschet* [Hydropneumatic drive of construction equipment. Design, principle of operation, calculation]. St. Petersburg, Lahn Publishing House, 2011. 320 p.

14. Mokin N.V. *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie privody* [Hydraulic and pneumatic drives]. Novosibirsk, SGUPS Publishing House, 2004. 353 p.

Об авторах:

**КРЕСТИН Евгений Александрович**

кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: krestin@bk.ru

**KRESTIN Evgeny A.**

PhD in Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: krestin@bk.ru

**СЕРЕБРЯКОВ Григорий Владимирович**

инженер производственно-технического отдела (ПТО) ООО «Весна» 446442, Россия, г. Кинель, пгт. Усть-Кинельский, ул. 4-я Парковая, 2 к. г. E-mail: karately123@mail.ru

**SEREBRYAKOV Grigoriy V.**

Engineer of Production and Technical Department (PTD) LLC «Vesna» 446442, Russia, Kinel, Ust-Kinelsky, 4th Park Street, 2 k. g. E-mail: karately123@mail.ru

Для цитирования: Крестин Е.А., Серебряков Г.В. Анализ условий функционирования бесконтактных уплотнений при возвратно-поступательном движении плунжерных пар приводов строительных машин // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 3. С. 65–69. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.09.

For citation: Krestin E.A., Serebryakov G.V. Analysis of the operating conditions of contactless seals during reciprocating motion of plunger pairs of drives of construction machines. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 65–69. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.09.