

Техническая информация

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-1-70-78

УДК 621.22

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УТЕЧКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ С УПЛОТНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ю. А. АНДРЕЕВЕЦ¹⁺, А. С. ДАВЫДОВ²

¹Гомельский Государственный Технический университет имени П. О. Сухого, Пр-т Октября, 48, 246746, г. Гомель, Беларусь

²ООО «Гидросила Белар», ул. Шилова, 8, 246007, г. Гомель, Беларусь

Проведен анализ видов уплотнений гидроцилиндров для средних режимов работы гидродвигателей (рабочее давление 12,5–16,0 МПа). Представлены современные полимерные материалы, применяемые при изготовлении элементов уплотнений, проанализированы их характеристики. Выбран комплекс уплотнений, соответствующий режиму работы гидроцилиндра и обеспечивающий максимальную герметичность, требуемые КПД, надежность и долговечность работы гидродвигателя. Для снижения затрат на испытания кафедрой «Гидропневмоавтоматика» УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» совместно с ООО «Гидросила Белар» (Беларусь) разработан испытательный комплекс, имитирующий приемосдаточные испытания проектируемых гидроцилиндров, конструкция которого приведена в статье.

Разработана методика определения утечки рабочей жидкости при испытаниях гидроцилиндра, которая успешно использована на производстве (составлен акт внедрения), позволяющая значительно уменьшить время на обработку результатов испытаний. Сопоставление результатов расчетных данных с экспериментальными свидетельствуют о том, что предложенная методика согласуется с результатами эксперимента и требованиями нормативно-технической документации. Применение представленной методики позволяет без трудоемких промышленных испытаний подобрать оптимальные по критерию минимизации утечки рабочей жидкости конструкцию и материал уплотнений. Разработанный испытательный комплекс для одновременной проверки 8 гидроцилиндров совместно с предложенной методикой позволяет снизить временные и энергозатраты при испытаниях и, как следствие, себестоимость гидроцилиндра в целом.

Ключевые слова: испытание гидроцилиндров, полимерные уплотнения и манжеты, герметичность, испытательный комплекс.

THE APPLICATION OF LEAKAGE CALCULATION TECHNIQUE WHEN DESIGNING A HYDRAULIC CYLINDER WITH SEALING ELEMENTS MADE OF POLYMER COMPOSITES

U. A. ANDREYEVETS¹⁺, A. S. DAVYDOV²

¹Pavel Sukhoy Gomel State Technical University, Octiabria Ave, 48, 246746, Gomel, Belarus

²Hydrosila Belar Ltd, Shilov St., 8, 246007, Gomel, Belarus

The analysis of the types of hydraulic cylinder seals for medium operating modes of hydraulic motors (working pressure of 12.5–16.0 MPa) was carried out. Modern polymer materials are introduced to be used in the sealing elements production, their characteristic features were analyzed. A selected set of seals corre-

+ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: andrejevets@gstu.by

sponds to the operation mode of the hydraulic cylinder and ensures maximum tightness, required efficiency, reliability and durability of the hydraulic motor operation. To decrease the testing costs the Hydro pnevmavtomatika Department of the educational establishment «Sukhoi Gomel State Technical University» along with «Hydrosila Belar» LTD (Belarus) developed a testing complex simulating acceptance tests of designed hydraulic cylinders, the design of which is given in the article.

A technique was developed to determine any leakage during a hydraulic cylinder testing, which is successfully used in production (an implementation report has been drawn up), permitting the time for testing data processing to be considerably declined. Comparing the results of calculated data with experimental evidence suggests that the proposed methodology corresponds to experimental data and standards of technical documentation. The use of leakage calculation methods in practice allows selecting the design and material of seals optimal by the criterion of minimizing leakage of working fluid as well as without time-consuming industrial tests. The developed test complex for simultaneous testing of 8 hydraulic cylinders allows decreasing the testing time- and energy-consuming costs and, as a result, the production cost of a hydraulic cylinder in whole.

Keywords: testing of hydraulic cylinders, polymer seals and cuffs, tightness, test complex.

Введение

Гидравлические и пневматические машины и агрегаты широко применяются в химическом и энергетическом машиностроении, авиации, судостроении, автомобильной промышленности и других отраслях техники. При проектировании таких устройств часто требуется создание новых гидравлических схем, применение новых материалов, конструкций и проведение теоретических и экспериментальных исследований. Причем решающее значение во многих случаях имеют надежность и долговечность гидравлических устройств [1–5].

Надежность и долговечность гидроцилиндров различного назначения, их основные характеристики и КПД в большой степени зависят от применяемых уплотнений. В настоящее время применяют различные виды уплотнений: в виде резиновых, чугунных или текстолитовых колец; манжет из резины, полимерных или других материалов различных конструкций. Все они обеспечивают удовлетворительные эксплуатационные характеристики гидроцилиндров, однако полностью не решают задачи герметичности, долговечности и ремонтпригодности.

Как показывает опыт эксплуатации, потребность в разборке узла для замены изношенных деталей также в значительной степени определяется состоянием уплотнительных элементов. Величина утечки жидкости через уплотняемое соединение при работе механизма является одной из важнейших характеристик уплотнения [2, 3, 6, 7]. При отсутствии движения, в состоянии покоя штока, при положительных и отрицательных температурах все мягкие контактные уплотнения, как правило, обеспечивают надежное запирание жидкости. Во время движения все уплотнительные устройства допускают ту или иную утечку, которая напрямую зависит от материала уплотнения, а предотвращение внешней утечки рабочей жидкости из гидроцилиндра обеспечивается главным образом за счет использования манжеты.

Для контактных уплотнений, работающих при наличии граничного трения, утечка при движении штоков происходит за счет заполнения жидкостью

микронеровностей, возникающих вследствие некачественной механической обработки цилиндров, штоков и поршней или износа контактирующих поверхностей; из-за недостаточного предварительного поджатия уплотнительного элемента к уплотняемой поверхности. Возможно также влияние макроотклонений, обусловленных технологическими проблемами на стадии проектирования и изготовления детали: овальности, волнистости, конусности и т. п.

Уплотнительные элементы производят из таких материалов, которые изменяют свою форму под воздействием силы (эластомеры, термопласты или термопластичные эластомеры) (рис. 1, а, б) и принимают первоначальную форму при снятии нагрузки (рис. 1, в) [1, 6–9].

В гидроцилиндрах подвижное соединение букса–шток уплотняется целым комплектом уплотнений, каждое из которых выполняет определенные функции. Набор комплекта уплотнений выбирают в соответствии с рекомендациями фирм-производителей и режимом работы силового гидроцилиндра [10–12]. Средний режим работы соответствует условиям эксплуатации гидроцилиндров в сельскохозяйственных, дорожно-строительных и других мобильных машинах. Оптимальный набор комплекта уплотнений, который удовлетворяет требованиям герметичности и надежности работы при давлениях 12,5–16,0 МПа содержит: грязесъемник для защиты внутренних полостей от пыли, различные уплотнительные кольца (манжеты и кольца круглого сечения) в совокупности с защитными и опорными кольцами (рис. 2) [10].

Элементы уплотнений производят из различных материалов, правильный выбор которых обеспечивает надежную работу гидродвигателя при заданных условиях эксплуатации [8, 11, 13].

Бутадиен-нитрильный каучук (NBR) — продукт полимеризации бутадиена с акрилонитрилом (ACN). Рекомендуют использовать в большинстве уплотнительных элементов.

Процентное соотношение акрилонитрила в нитрильном соединении колеблется между 30% и 50%. Изменение процентного соотношения акрилонитрила

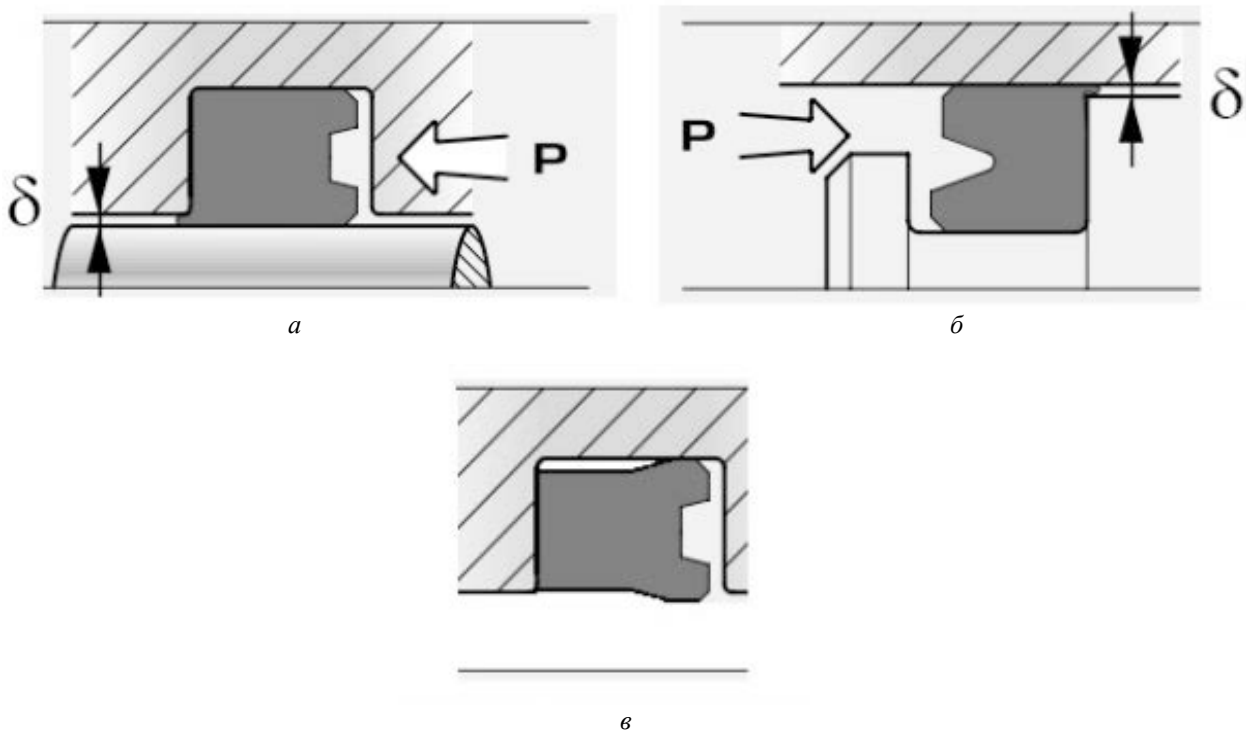


Рисунок 1 — Уплотнительный элемент: *a, б* – под давлением; *в* – в свободном состоянии
 Fig. 1 — A sealing element: *a, б* – under pressure; *в* – in a free state

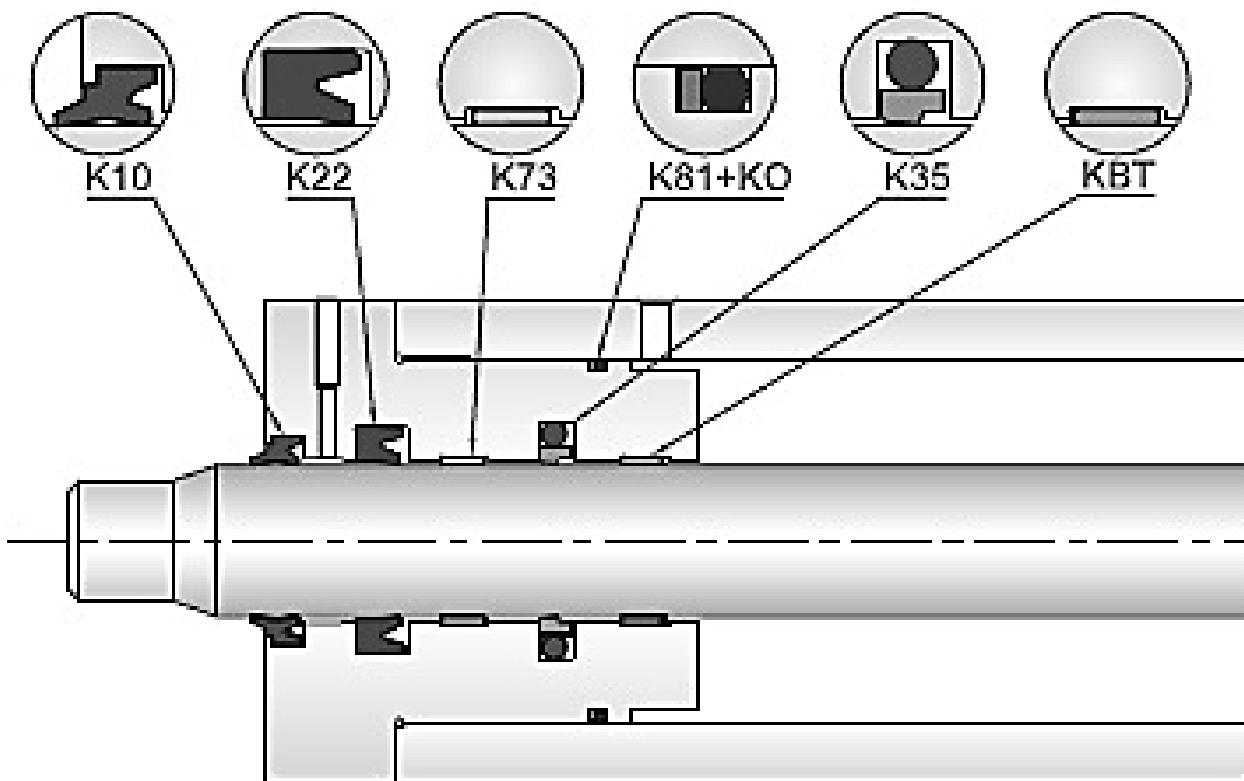


Рисунок 2 — Пример конструкции уплотнительного узла гидроцилиндра для среднего режима работы: K10 – двойной грязеъемник; K22 – уплотнение штока (манжета); K35 – уплотнение штока; K73 – направляющее кольцо штока; K81 – опорное кольцо; KO – уплотнительное кольцо круглого сечения; KBT – направляющее кольцо штока, содержащее бронзу
 Fig. 2 – A sample of the structure of a sealing unit of a medium duty hydraulic cylinder: K10 – double scraper; K22 – a rod seal (a cuff seal); K35 – a rod seal; K73 – a sealing rod guide ring; K81 – a support ring; KO – a sealing ring of a round section; KBT – a sealing rod guide ring containing bronze

приводит к изменению объема, газопроницаемости, эластичности и сжимаемости соединений, используемых в минеральных маслах, смазке и топливе.

Нитрил устойчив к алифатическим углеводородам (например пропану, бутану, нефти и т. д.); минеральным маслам (смазочным маслам; гидравлическим маслам без присадок (*H*), с ингибиторами коррозии и антиокислительными присадками (*HL*), с ингибиторами коррозии и противоизносными присадками (*HLP*)); огнестойким гидравлическим жидкостям: эмульсии «масло в воде» (*HFA*), эмульсии «вода в масле» (*HFB*), растворы мономеров и полимеров (на основе полигликолей) (*HFC*); пластичным смазкам; растительным и животным маслам; легкому печному топливу и дизельному топливу. Стандартное нитрильное соединение рекомендуют использовать при температуре от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Гидрированный бутадиен-нитрильный каучук (HNBR) – продукт, получаемый частичным или полным гидрированием *NBR*. Устойчив к высокой температуре и окислению. Имеет более высокую термостойкость и лучшие механические свойства, чем *NBR*. Изделия из *HNBR* рекомендуют использовать при температуре от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, особенно в автомобильной технике и для специальных применений в мобильной гидравлике.

Силикон (MVQ) сохраняет свою эластичность от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устойчив к окислению. Подвержен деградации при использовании смазочных материалов и модификаторов трения. Не рекомендуют использовать в динамических устройствах.

Фторэластомер (FKM) устойчив ко многим химическим веществам. Не устойчив к воздействию пара, горячей воды, метанола и других полярных растворителей. Обладает низкой газопроницаемостью. Механические свойства и диапазон температур могут быть улучшены при применении специальных добавок.

Полиуретан (PU) широко используют в уплотнительных элементах благодаря усадке при сжатии. Имеет отличную стойкость к излому, разрыву и износу в диапазоне температур от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устойчив к воздействию минеральных масел, жиров и алифатических углеводородов. Не устойчив к полярным растворителям, ароматическим соединениям, кислотам и щелочам, силиконовым жидкостям. Главным образом *PU* используют для очистки штока и в качестве уплотнительного элемента для высокой герметизации.

Этилен-пропиленовый каучук (EPDM) используют при температуре от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устойчив к тормозным жидкостям, смазочным материалам на основе сложных эфиров, горячей воде и пару.

Бутадиен-стирольный каучук (SBR) устойчив к органическим и неорганическим кислотам, полярным растворителям в температурном диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Натуральный каучук (NR) используют при температуре от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в устройствах, где требуется высокая эластичность.

Политетрафторэтилен (PTFE) имеет низкий

коэффициент трения, высокую износостойкость, способен работать как в условиях недостаточной смазки, так и при высокой скорости скольжения при температуре от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устойчив к химическим веществам, за исключением щелочных металлов и фторпроизводных.

Полиамид (PA) используют при температуре от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, может работать в условиях недостаточной смазки, имеет высокую износостойкость. Изделия из *PA* применяют в качестве направляющих элементов в гидравлических и пневматических системах.

Полиоксиметилен (POM) обладает высокой стабильностью формы при температуре от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Используют для изготовления направляющих и опорных колец в гидравлических и пневматических системах.

Термопластичный полиэфирный эластомер (TPE) широко используют в качестве материала для опорных и нажимных колец с уплотнительными элементами в гидравлических и пневматических системах. Имеет более высокую устойчивость к гидравлическим маслам, по сравнению с другими материалами, в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики материалов, наиболее часто используемых в гидравлических системах [11, 13].

Следует отметить, что, несмотря на применение в конструкциях гидроцилиндров уплотнительных элементов, некоторая утечка все же имеет место. Перед конструкторами стоит нетривиальная задача подбора материалов уплотнительных элементов, способных минимизировать утечку даже при воздействии максимального давления рабочей жидкости.

Таблица 1 — Характерные особенности материалов
Table 1 — Characteristic features of materials

Характеристики материалов	<i>PU</i>	<i>PTFE</i>
Предел прочности	Отлично	Плохо
Удлинение при разрыве	Отлично	Плохо
Гибкость	Хорошо	Плохо
Износостойкость	Отлично	Отлично
Сопrotивление разрыву	Отлично	Отлично
Сопrotивление старению	Хорошо	Отлично
Озоностойкость	Хорошо	Отлично
Топливостойкость	Очень плохо	Отлично
Стойкость к действию жиров и масел	Отлично	Отлично
Стойкость к кислотам	Очень плохо	Отлично
Стойкость к щелочам	Очень плохо	Отлично
Стойкость к горячей воде	Достаточно хорошо	Отлично
Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	+100	+260
Минимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	-30	-200

Цель работы — предложить методику расчета утечки рабочей жидкости гидроцилиндра среднего режима работы через уплотнения штока, изготовленные из современных полимерных материалов. Экспериментально оценить возможность ее применения для прогнозирования герметизирующих характеристик уплотнений проектируемых гидроцилиндров.

Материалы и методы исследований

Опираясь на опыт применения уплотнительных элементов при производстве гидроцилиндров на ООО «Гидросила. Белар» (Беларусь), предотвращение утечки рабочей жидкости из внутренней полости цилиндра достигали, используя два уплотнительных элемента: составное уплотнение штока К35 (рис. 3, *а*) и манжету К22 (рис. 3, *б*). Таким образом, исследование утечек, возникающих в процессе работы гидроцилиндра, целесообразно проводить только для этих двух элементов комплекта уплотнений.

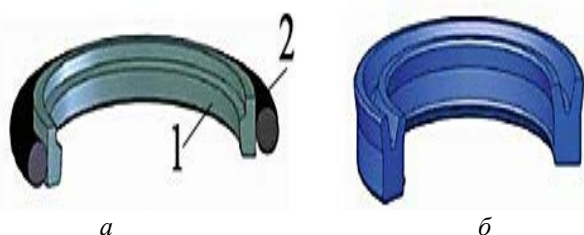


Рисунок 3 — Уплотнение штока (*а*), манжета (*б*)
Fig. 3 — F rod seal (*a*), a cuff seal (*b*)

Составное уплотнение штока (рис. 3, *а*) состоит из двух частей: резинового кольца (1) в качестве усилительного элемента и профильного кольца из PTFE (2), наполненного бронзой.

Манжету (рис. 3, *б*) изготавливают из PU, который широко используется в уплотнительных элементах благодаря усадке при сжатии. Применение данного материала обеспечивает стойкость манжеты к деформациям и стойкость к воздействию рабочих жидкостей в широком диапазоне температур.

Данные элементы дополняют друг друга. Манжета из PU обеспечивает практически полную герметичность соединения, предотвращает утечку, обусловленную возможными повреждениями составного уплотнения при монтаже, защищает составное уплотнение от возможных загрязнений со стороны грязесъемника благодаря наличию дополнительной уплотняющей кромки. Составное уплотнение штока из PTFE в свою очередь частично герметизирует соединение, уменьшает или предотвращает воздействие на манжету нежелательных примесей в рабочей жидкости, таких как продукты окисления масла, щелочи или топливо. Благодаря низкой теплопроводности уменьшает воздействие высоких температур рабочей жидкости на манжету. Этим оправдывается совместное использование данных уплотнений.

Исследование утечек по штоку гидроцилиндра проводили на испытательном комплексе,

имитирующем приемосдаточные испытания гидроцилиндра, специально разработанном в соответствии с ГОСТ 18464 [14] на кафедре «Гидропневмоавтоматика» УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» совместно с ООО «Гидросила Белар» (Беларусь). Основными узлами разработанного комплекса (рис. 4) являются: гидростанция (1), стенд испытательный (2), испытываемые гидроцилиндры с исследуемыми элементами уплотнений (3), приводной электродвигатель с насосом (4), трубопроводы (5), контрольно-измерительные устройства (6), корпус (7) с установленной внутри гидроаппаратурой (в том числе и с гидроаккумуляторами) и испытываемыми гидроцилиндрами. Проектируемый гидроцилиндр работает при номинальном/максимальном давлении 16/20 МПа, скорость движения поршня — 0,2 м/с, ход поршня — 400 мм.

Гидростанция обеспечивает необходимые параметры гидросистемы для испытания гидроцилиндров с испытываемыми уплотнениями: при режиме движения без нагрузки давление составляет 5 МПа, а подача рабочей жидкости — 47 л/мин; испытание на герметичность (опрессовка) происходит при давлении 25 МПа за счет действия гидропневмоаккумуляторов.

Стенд для испытания гидроцилиндров на герметичность и внутренние утечки работает в автоматическом режиме, позволяющем одновременно испытывать восемь цилиндров. Стенд управляется с помощью специального программного обеспечения, установленного на персональном компьютере, который связан с датчиками давления и управляющими электромагнитами посредством аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей.

Ввиду того, что утечка через уплотнение штока ничтожно мала, не представляется возможным измерить ее в процессе одного двойного хода штока. Поэтому при измерении утечки применили следующую последовательность действий: шток и грязесъемник предварительно очищали от масла; выполнялось сто двойных ходов штока; измеряли объем жидкости, собравшейся за это время на грязесъемнике. Утечку жидкости определяли гравиметрически с точностью до 0,1 мг на аналитических весах «ХА6/21/У» («Radwag Wagi Elektroniczne», Польша).

Расчетная часть. Результаты и их обсуждение

Непосредственные утечки жидкости через зазоры в парах трения силовых гидроцилиндров пропорциональны перепаду давления и не зависят от частоты рабочих ходов. Для практических целей в большинстве случаев достаточно ограничиться приближенным расчетом потерь. При введении ряда допущений задача сводится к определению расхода жидкости через плоскую щель [15]:

– ламинарное течение жидкости в зазорах – установившееся и изотермическое;

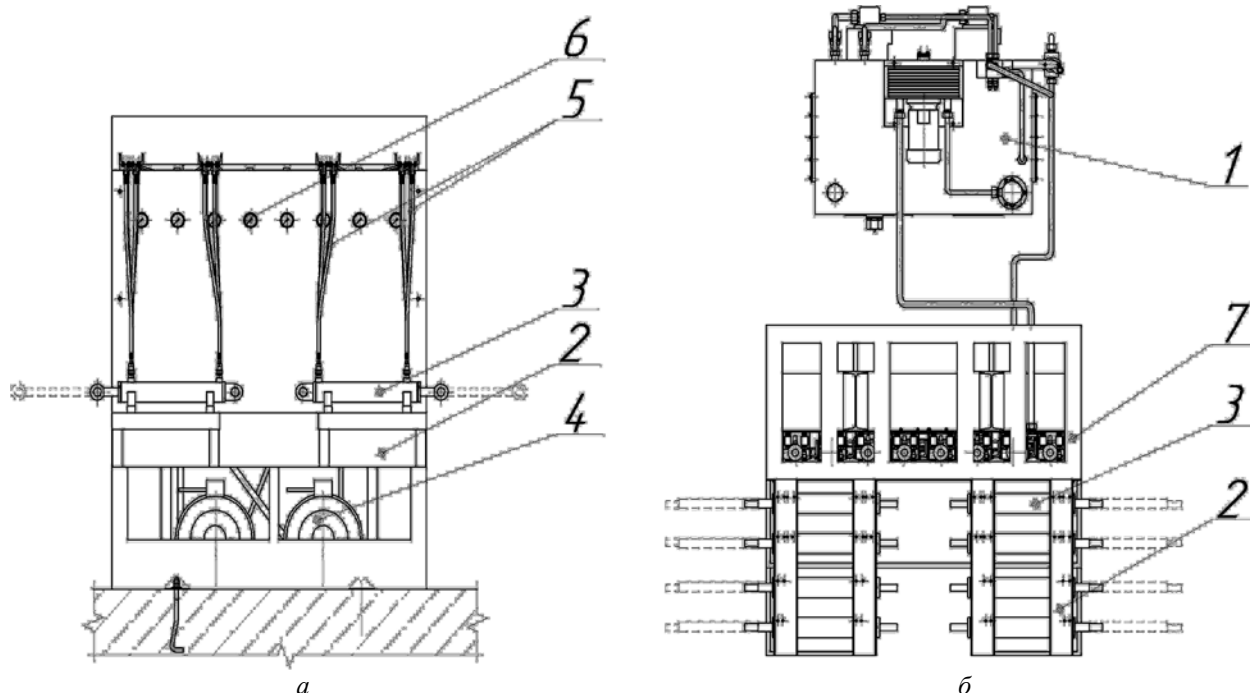


Рисунок 4 — Испытательный комплекс: *a* – вид спереди, *б* – вид сверху
 Fig. 4 — A testing complex: *a* – the front view; *б* – the above view

– форма поверхностей, образующих канал утечки – совершенна (отсутствуют отклонения формы);
 – шероховатость поверхностей во внимание не принимают.

Предполагая, что параметры каналов утечки остаются постоянными, расход жидкости через поперечное сечение зазора в единицу времени определяли по следующей формуле [15]:

$$\Delta Q_1 = b \cdot \left(\frac{\Delta p \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot l} \pm \frac{v \cdot \delta}{2} \right), \quad (1)$$

где b , м — ширина зазора в направлении, перпендикулярном к направлению потока жидкости; δ , м — зазор между деталями соединения; l , м — длина зазора в направлении потока жидкости; $\mu \approx 40,94$ Па·с — динамический коэффициент вязкости жидкости; v , м/с — относительная скорость перемещения одной из стенок, ограничивающих щель (знак плюс относится к случаю перемещения стенки в сторону зоны с пониженным давлением, минус — в противоположном направлении).

Величина утечки жидкости при движении штока определяется геометрией манжеты и материалом, из которого она изготовлена [3, 16]:

$$Q_v = \pi \cdot D \cdot v_1 \cdot q, \quad (2)$$

где D , м — уплотняемый диаметр (диаметр штока); v_1 , м/с — скорость движения штока; q , м — функция, выражающая величину утечки жидкости через соединение, приходящуюся на единицу поверхности штока, проходящей мимо уплотнения.

$$q = \frac{1,1 \cdot 10^{-11} \cdot (1,5 - 2^{-0,01 \cdot p})}{\mu \cdot l_1 \cdot \left(\frac{p_r}{p_c} \right)^3 \cdot (1 - 2^{-(20 \cdot p_0 + 1)})} \cdot C_3, \quad (3)$$

где p , Па — давление запираемой жидкости; μ , Па·с — динамический коэффициент вязкости жидкости; l_1 , м — длина уплотнительного элемента; p_r/p_c — отношение давлений на запираемой поверхности; p_0 , Па — предварительное удельное давление в уплотнении; $C_3 = 20$ — коэффициент, учитывающий изменение вязкости жидкости и других параметров в условиях низких температур [3].

Отношение давлений на запираемой поверхности [3, 16]:

$$\frac{p_r}{p_c} = \frac{3,44 \cdot r_n^2 + r_b^2}{3,22 \cdot r_n^2 + 1,22 \cdot r_b^2}, \quad (4)$$

где r_n и r_b , м — наружный и внутренний радиусы манжеты (рис. 5); p_r и p_c , Па — удельное давление на запирающей поверхности и рабочее давление запираемой среды.

Предварительное удельное давление в уплотнении [3, 16]:

$$p_0 = \frac{1,5 \cdot E \cdot \varepsilon_t \cdot (r_n^2 - r_b^2)}{r_n^2 + 2 \cdot r_b^2}, \quad (5)$$

где $E=10$ МПа — модуль упругости материала манжеты (PU) [9]; $\varepsilon_t = \frac{\Delta r}{r_b}$ — коэффициент величины предварительного поджатия манжеты (рис. 5, б);

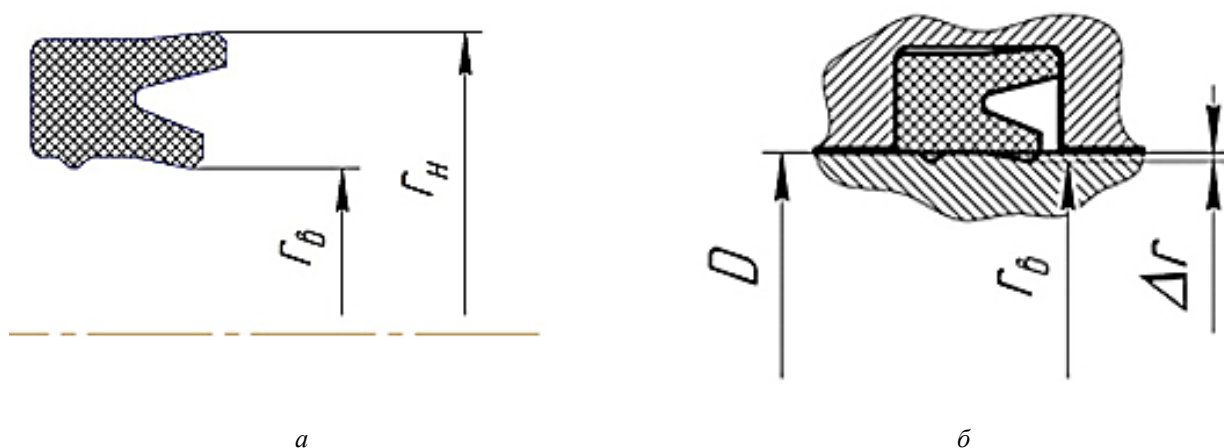


Рисунок 5 — Расчетные схемы манжеты: *a* — радиальные размеры манжеты; *б* — схема предварительного поджатия
 Fig. 5 — Calculation schemes of a cuff seal: *a* — cuff radial dimensions; *б* — a pre-compression scheme

$\Delta r = \frac{D}{2} - r_b$, м — изменение внутреннего радиуса манжеты вследствие натяга; $D = 40$ мм — диаметр штока гидроцилиндра.

Для экспериментальной оценки утечки применяли следующие вспомогательные расчеты. Рассчитывали площадь поверхности штока, которая пройдет через уплотнение штока за сто двойных ходов [16]:

$$S = (\pi \cdot D \cdot h) \cdot 2 \cdot 100, \quad (6)$$

где h , м — ход штока.

Объем вынесенной жидкости при работе гидроцилиндра после взвешивания при известной плотности жидкости (рекомендуемая рабочая жидкость — масло МГЕ-46):

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (7)$$

где $\rho = 894$ кг/м³ — плотность рабочей жидкости.

Объем утечки, приходящийся на 1 м² поверхности штока, проходящей через уплотнение при работе гидроцилиндра:

$$Q_s = \frac{V}{S}. \quad (8)$$

В результате расчетов упрощенной модели с использованием формул 1–5 получили зависимость расчетных утечек рабочей жидкости через уплотнения штока от давления (рис. 6, кривая 1). Кривая 2 на рис. 6 показывает экспериментально полученные утечки. Диапазон давления рабочей жидкости в пределах от 0 МПа до 25 МПа (учитывая значение номинального давления 16 МПа).

Графическое отображение результатов расчета и экспериментов показывает увеличение расхождения величин теоретической и экспериментально полученной утечки с ростом давления, что связано, вероятно, с влиянием условий эксплуатации на герметизирующие характеристики кромки манжеты в ре-

альных условиях. Экспериментальная утечка незначительно, на 0,05%, превышает расчетную, вероятно, вследствие выше указанных допущений.

Исследования показали, что расчетная величина утечки при использовании манжет из PU для среднего режима работы (давление 16 МПа) составляет $Q_v = 3,2752 \cdot 10^{-11}$ м³/с (или приходящийся на 1 м² поверхности штока $Q_s = 1,291 \cdot 10^{-9}$ см³/м²). Утечка, полученная в результате проведения эксперимента на разработанном испытательном комплексе, составляет $Q_{s, \text{экс}} = 1,356 \cdot 10^{-9}$ см³/м². Величины утечек (теоретическая и экспериментальная) удовлетворяют требованиям, указанным в нормативно-технической документации для приемо-сдаточных испытаний гидроцилиндров (0,003 см³/м² [17]).

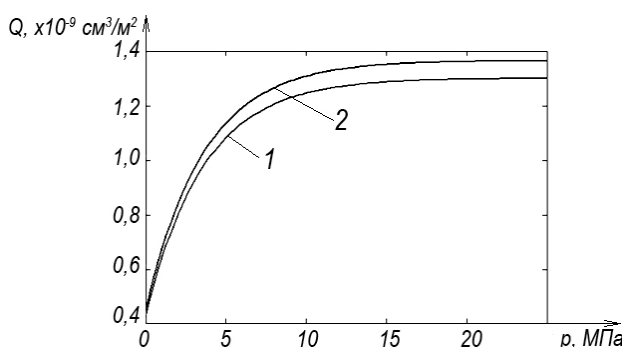


Рисунок 6 — Зависимость утечки от давления: 1 — теоретическая; 2 — экспериментальная
 Fig. 6 — The leakage dependence on pressure: 1 — theoretical, 2 — experimental

Выводы

Разработана методика определения утечки при испытаниях гидроцилиндра, которая успешно использована на производстве (составлен акт внедрения). Результаты расчетных исследований согласуются с экспериментальными и соответствуют нормативно-технической документации. Применение методики расчета утечек на практике позволяет зна-

чительно уменьшить время на обработку результатов испытаний. Разработанный испытательный комплекс для одновременной проверки 8 гидроцилиндров совместно с предложенной методикой расчета утечки позволяет снизить временные и энергозатраты при испытаниях и, как следствие, себестоимость гидроцилиндра в целом.

Представленную методику расчета целесообразно использовать при выборе по критерию минимальной утечки рабочей жидкости полимерных композиционных материалов для создания уплотнений гидроцилиндров.

Обозначения

b , м — ширина зазора в направлении, перпендикулярном к направлению потока жидкости; C_3 — коэффициент, учитывающий изменение вязкости жидкости и других параметров в условиях низких температур; D , м — диаметр штока гидроцилиндра; E , МПа — модуль упругости материала; *EPDM* — этиленпропиленовый каучук; *FKM* — фторэластомер; *HNBR* — гидрированный бутадиен-нитрильный каучук; h , м — ход штока; l , м — длина зазора в направлении потока жидкости; l_1 , м — длина уплотнительного элемента; m , кг — масса вынесенной жидкости при работе гидроцилиндра; *MVQ* — силикон; *NBR* — бутадиен-нитрильный каучук; *NR* — натуральный каучук; p , Па — давление запираемой жидкости; p_0 , Па — предварительное удельное давление в уплотнении; p_r и p_c , Па — удельное давление на запирающей поверхности и рабочее давление запираемой среды; *PA* — полиамид; *POM* — полиоксиметилен; *PTFE* — политетрафторэтилен; *PU* — полиуретан; Q_y , м³/с — утечки жидкости при движении штока; Q_s , см³/м² — объем утечки, приходящийся на 1 м² поверхности штока, проходящей через уплотнение при работе гидроцилиндра; q , м — функция, выражающая величину утечки жидкости через соединение, приходящуюся на единицу поверхности штока, проходящей мимо уплотнения; r_n и r_b , м — наружный и внутренний радиусы манжеты; S , м² — площадь поверхности штока, которая проходит через уплотнение штока за сто двойных ходов; *SBR* — бутадиен-стирольный каучук; *TPE* — термопластичный полиэфирный эластомер; V , м³ — объем вынесенной жидкости при работе гидроцилиндра; v , м/с — относительная скорость перемещения одного из элементов подвижного соединения; v_1 , м/с — скорость движения штока; ΔQ_1 , м³/с — расход жидкости через поперечное сечение зазора; Δr , м — изменение внутреннего радиуса манжеты вследствие натяга; δ , м — зазор между деталями соединения; ε_i — коэффициент величины предварительного поджатия манжеты; μ , Па·с — динамический коэффициент вязкости жидкости; ρ , кг/м³ — плотность рабочей жидкости.

Литература

1. Нагорских В. С. Полимерные уплотнения подвижных соединений для силовых гидроцилиндров сельскохозяйственных машин: монография. Екатеринбург: УрГАУ, 2014. 116 с.

2. Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
3. Макаров Г. В. Уплотнительные устройства. Ленинград: Машиностроение, 1973. 232 с.
4. Шекунов А., Васильченко В. Конструктор для машиностроителей. Поршневые гидроцилиндры // Основные Средства. 2005. № 7. С. 1–4.
5. Шекунов А., Васильченко В. Конструктор для машиностроителей. Уплотнения штоков и поршней // Основные Средства. 2005. № 8. С. 1–4.
6. Продан В. Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды: учебное пособие Тамбов: ТГТУ, 2012. 280 с.
7. Буренин В. В. Уплотнения из резины и других материалов для соединений с возвратно-поступательным движением машин и механизмов. Москва: ЦНИИТЭНефтехим, 1993. 80 с.
8. Александров Б. А., Буялич К. Г. Влияние геометрических параметров уплотнительного узла на величину выдавливания в зазор // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. Вып. 3: Горное машиностроение. С. 88–92.
9. Дяшкин А. В. Уплотнительные устройства возвратно-поступательного действия повышенного давления рабочей среды: монография. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2014. 156 с.
10. Гидравлические и пневматические уплотнения Kastas. Технический каталог [Электронный ресурс]. URL: http://www.kastas.com.tr/images2/img/1980/File/Kastas_TechnicalCatalogue_RU.pdf (дата обращения: 15.10.2017).
11. Общий каталог фирмы Simrit [Электронный ресурс]. URL: <http://www.motion-products.ru/upload/iblock/a99/a99e26d3a2ea1a0070a68148b9faa2a2.pdf> (дата обращения: 10.10.2018).
12. Гидравлические уплотнения возвратно-поступательного движения TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS. Электронный каталог [Электронный ресурс] URL: <https://www.tss.trelleborg.com/en/resources/catalogs-and-brochures> (дата обращения: 09.11.2018).
13. Обзор материалов Kastas. [Электронный ресурс] URL: http://www.kastas.com.tr/images2/img/1980/File/TPU%20Overview_2015_07.pdf (дата обращения: 15.10.2017).
14. ГОСТ 18464-96. Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытаний. Введ. 2002-01-01. М.: Межгосударственный стандарт: Изд-во стандартов, 2001. 12 с.
15. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашин и передачи: учебное пособие для вузов. / под ред. В. В. Гуськова. Минск.: Вышэйшая школа, 1987. 310 с.
16. Давыдов А. С. Методика расчета утечки при проектировании уплотнительного узла гидроцилиндров // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, 21–22 декабря 2017 г. Гомель. Гомель, 2017. С. 89–91.
17. ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования. Введ. 2002-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2001. 7 с.

References

1. Nagorskih V. S. *Polimernye uplotneniya podvizhnykh soedineniy dlya silovykh gidrotsilindrov sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Polymer seals for mobile connections for power cylinders of agricultural machines]. Ekaterinburg: UrGAU Publ., 2014. 116 p.
2. Kondakov L. A. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika* [Seals and sealing technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p.
3. Makarov G. V. *Uplotnitel'nye ustroystva* [Sealing devices]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1973. 232 p.
4. Shekunov A., Vasil'chenko V. *Konstruktor dlya mashinostroiteley. Porshnevye gidrotsilindry* [Designer for machine builders. Piston hydraulic cylinders]. *Osnovnyye Sredstva* [Fixed Assets], 2005, no. 7, pp. 1–4.
5. Shekunov A., Vasil'chenko V. *Konstruktor dlya mashinostroiteley. Uplotneniya shtokov i porshney* [Designer for machine

- builders. Rod and piston seals]. *Osnovnye Sredstva* [Fixed Assets], 2005, no. 8, pp. 1–4.
6. Prodan V. D. *Germetichnost' raz'emnykh soedineniy oborudovaniya, ekspluatiruemogo pod davleniem rabochey sredy* [Tightness of detachable joints of equipment operated under pressure of the working environment]. Tambov: ITGTU Publ., 2012. 280 p.
 7. Burenin B. B. *Uplotniya iz reziny i drugih materialov dlya soedineniy s vozvratno-postupatel'nyim dvizheniem mashin i mekhanizmov* [Seals made of rubber and other materials for joints with reciprocating motion of machines and mechanisms]. Moscow: TsNIITENeftekhim Publ., 1993. 80 p.
 8. Aleksandrov B. A., Bujalich K. G. Vliyaniye geometricheskikh parametrov uplotnitel'nogo uzla na velichinu vydavlivaniya v zazor [The influence of the geometrical parameters of the sealing unit on the amount of extrusion into the gap]. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2010, no. 3, pp. 88–92.
 9. Djashkin A. V. *Uplotnitel'nye ustroystva vozvratno-postupatel'nogo deystviya povyshennogo davleniya rabochey sredy* [Reciprocating devices for the increased pressure of the working medium]. Volgograd: Volgogradskiy GAU Publ., 2014. 156 p.
 10. Gidravlicheskie i pnevmaticheskie uplotneniya Kastas. Tekhnicheskiy katalog (Hydraulic and pneumatic seals Kastas. Technical catalog). Available at: http://www.kastas.com.tr/images2/img/1980/File/Kastas_TechnicalCatalogue_RU.pdf (accessed 15 October 2017).
 11. Obshchiy katalog firmy Simrit (The general catalog of the company Simrit). Available at: <http://www.motion-products.ru/upload/iblock/a99/a99e26d3a2ea1a0070a68148b9faa2a2.pdf> (accessed 10 October 2018).
 12. Gidravlicheskie uplotneniya vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS (Hydraulic seals reciprocating motion TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS). Available at: <https://www.tss.trelleborg.com/en/resources/catalogs-and-brochures> (accessed 9 November 2018).
 13. Obzor materialov Kastas (Review of Kastas materials). Available at: http://www.kastas.com.tr/images2/img/1980/File/TPU%20Overview_2015_07.pdf (accessed 15 October 2017).
 14. GOST 18464-96. Gidroprivody ob'emnye. Gidrotilindry. Pravila priemki i metody ispytaniy. [State Standard 18464-96. Volumetric hydraulic drives. Hydraulic cylinders. Acceptance rules and test methods]. Moscow: Mezhsudarstvennyy standart Publ.: Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 12 p.
 15. Andreev A. F., Bartashevich L. V., Bogdan N. V., Korol'kevich A. V., Mamonov M. I., Romanchik E. A., Sabadakh B. V. *Gidropnevmomatika i gidroprivod mobil'nykh mashin. Ob'emnye gidro- i pnevmomashiny i peredachi* [Hydropneumatic automation and hydraulic drive of mobile machines. Volumetric hydraulic and pneumatic machines and transmissions]. Minsk: Vysheyschaya shkola Publ., 1987. 310 p.
 16. Davydov A. S. Metodika rascheta utechki pri proektirovanii uplotnitel'nogo uzla gidrotsilindrov [Methods of calculating leakage in the design of the hydraulic cylinders sealing unit]. *Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse — segodnya i zavtra: sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative technologies in the agro-industrial complex – today and tomorrow: a collection of abstracts of reports from an international scientific-practical conference]. Gomel', 2017. pp. 89–91.
 17. GOST 16514-96 Gidroprivody ob'emnye. Gidrotilindry. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [State Standard 16514-96. Volumetric hydraulic drives. Hydraulic cylinders. General technical requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 7 p.

Поступила в редакцию 08.11.2018

© Ю. А. Андреев, А. С. Давыдов, 2019