

Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: CVJYWU
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-462-471

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса

С.А. Базанов^{1✉}, В.Н. Анферов²

¹ООО «Валсиб», г. Новосибирск, Россия

²Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Цель работы – проверить работоспособность, надежность и технические возможности закрытой гидропередачи, повышающей долговечность гидропривода путем изоляции рабочей жидкости от атмосферного воздуха и обеспечения избыточного давления на входе в насос. Объектом исследования выбрана схема закрытой гидропередачи, в которой возврат дренажных утечек осуществляется эжекторным насосом, а поддерживающим избыточное давление в системе и выполняющим функцию закрытого гидробака элементом является пневмогидроаккумулятор. Теоретические соотношения характеристик проектируемых элементов гидросистемы получены методами математического моделирования с применением уравнения нормальных безразмерных гидравлических характеристик и пакета Microsoft Excel. При проектировании конструкции стенда использованы методы прототипирования и модификации. На основе существующих исследований определена степень влияния различных засорителей на характер неисправностей системы, установлено положительное влияние чистоты рабочей жидкости на долговечность и надежность гидропривода. В результате проведенного обзора существующих открытых, комбинированных открыто-закрытых и закрытых гидропередач выявлены их недостатки в области обеспечения чистоты рабочей жидкости. Предложена принципиальная гидравлическая схема, на основе которой спроектирован и изготовлен стенд для исследования закрытой гидропередачи. Определены условия подбора пневмогидроаккумулятора, обоснована методика расчета параметров и разработана универсальная конструкция эжекторного насоса, работающего в различных режимах давлений рабочего потока. В конструкции эжекторного насоса предусмотрена замена основных частей проточной части (сопла, камеры смешения, горловины и конфузора). Сформированная программа и методика испытаний включает в себя четыре алгоритма проведения испытаний (подготовки стенда к работе; испытаний при отсутствии дренажных утечек; испытаний при максимально допустимых дренажных утечках; испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек) и сто шестьдесят экспериментов. Проведенное исследование позволяет проверить возможность применения представленной закрытой гидропередачи в машинах различного типа.

Ключевые слова: закрытая гидропередача, долговечность гидропривода, возврат дренажных утечек, эжекторный насос, чистота рабочей жидкости, закрытый гидробак

Для цитирования: Базанов С.А., Анферов В.Н. Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 462–471. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471>. EDN: CVJYWU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump

Sergey A. Bazanov^{1✉}, Valery N. Anferov²

¹LLC Valsib, Novosibirsk, Russia

²Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

© Базанов С.А., Анферов В.Н., 2023

Abstract. The aim of the study is to verify the operability, reliability and functionality of a closed-loop hydrostatic transmission, which enhances the durability of the hydraulic drive by isolating the working fluid from atmospheric air and maintaining excess pressure at the pump inlet. The selected research object is a closed-loop hydrostatic transmission configuration, where drain leakage return is carried out by an ejector pump, while a hydropneumatic accumulator serves as a closed hydraulic reservoir that maintains excess pressure. Theoretical relationships for the designed components of the hydraulic system were derived using mathematical modelling by equations of normal dimensionless hydraulic numbers and a Microsoft Excel package. Design methods of continuity and modification were applied to construct the test bench. Based on existing research, the influence of various contaminants on the system failure characteristics was determined, and the positive effect of the purity of the working fluid on the durability and reliability of the hydraulic drive was highlighted. An overview of existing open, combined open-closed and closed hydrostatic transmissions revealed their disadvantages in terms of ensuring fluid purity. A proposed hydraulic schematic formed the basis for designing and manufacturing a test stand for investigating the closed-loop hydrostatic transmission. Criteria for selecting the pneumatic-hydraulic accumulator were defined, and a methodology for calculating parameters was substantiated. A versatile design of the ejector pump, operating under various flow pressure conditions, was developed, including replaceable components for the flow section (nozzles, mixing chambers, throats and confusers). The test program and methodology involve four test algorithms: stand preparation, tests without drain leakage, tests with maximum allowable drain leakage, and tests with intermediate drain leakage volumes, resulting in a total of one hundred sixty experiments. This study allows the feasibility of applying the presented closed-loop hydrostatic transmission in various types of machinery to be assessed.

Keywords: closed hydraulic transmission, hydraulic drive durability, return of drainage leaks, ejector pump, working fluid purity, closed hydraulic tank

For citation: Bazanov S.A., Anferov V.N. Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):462-471. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471>. EDN: CVJYWU.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных типов приводов строительных, путевых и подъемно-транспортных машин является гидропривод благодаря ряду преимуществ: возможности бесступенчато регулировать скорость, простоте управления и автоматизации, сравнительно малому весу на единицу передаваемой мощности. Наряду с его преимуществами известно, что из общего числа простоев машин на долю гидропривода

приходится более 40% [1–14].

Большое влияние на надежность и долговечность гидропривода оказывает чистота рабочей жидкости. Наличие различных загрязнителей, попадающих внутрь системы, является основной проблемой функционирования гидропривода, вызывающей подавляющее большинство его неисправностей. Для различных гидросистем доля отказов из-за загрязнения рабочей жидкости составляет от 50% до 85% [2, 8, 15].

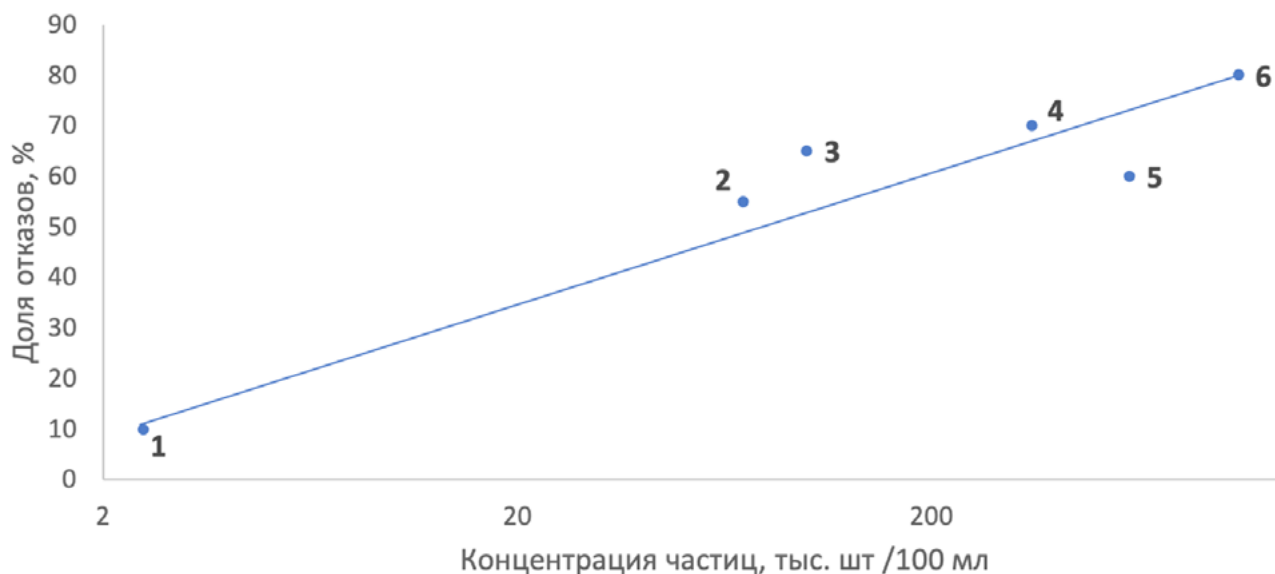


Рис. 1. Доля отказов гидравлических систем различных машин из-за загрязненности рабочей жидкости: 1 – летательные аппараты; 2 – станочное оборудование; 3 – строительные машины; 4 – карьерное оборудование; 5 – сельскохозяйственная техника; 6 – шахтное оборудование

Fig. 1. Failure percentage of various equipment hydraulic systems due to working fluid contamination: 1 – aircrafts; 2 – machine-tool equipment; 3 – construction machinery; 4 – pit equipment; 5 – agricultural machinery; 6 – mining equipment

Обеспечение надлежащей чистоты рабочей жидкости позволяет:

- значительно повысить ресурс основных агрегатов привода [16, 17] и существенно увеличить коэффициент готовности машин;
- поднять производительность техники за счет увеличения КПД привода;
- уменьшить расход топлива и рабочей жидкости [18];
- сократить расходы на обслуживание и ремонт.

Основным источником загрязнения рабочей жидкости в процессе работы машины является атмосферный воздух. Изоляция гидropередачи от воздуха окружающей среды позволит существенно снизить количество загрязнителей и повысить долговечность машин.

Загрязнения рабочей жидкости можно разделить на четыре основные группы: твердые частицы, мягкие частицы, вода, воздух, механизм влияния которых на долговечность различен.

Загрязнение механическими частицами вызывает заклинивание поршней гидроцилиндров и золотников гидрораспределителей, повышенные утечки в узлах и деталях гидросистемы, блокировку каналов смазки, самопроизвольное движение штоков гидроцилиндров исполнительных органов, изменение характеристик управления, повышенный износ узлов и деталей гидросистемы машины [19].

Вода, попадая в рабочую жидкость, вызывает ее старение, коррозию компонентов и деталей отдельных узлов гидросистемы, формирование отложений эмульсий в гидроагрегатах.

Воздух, соприкасаясь с рабочей жидкостью, растворяется в ней и вызывает кавитацию во всасывающей линии насоса, разрушение уплотнений подвижных соединений, нестабильность управления машиной, местный перегрев рабочей жидкости.

Загрязнители могут поступать в систему в процессе технического обслуживания, через уплотнения гидроцилиндров, в процессе износа деталей, но основной их объем попадает через сапун гидравлического бака во время работы системы.

Средняя загрязненность жидкости в гидросистемах различных типов машин регламентирована по ГОСТ 17216-2001³. Требования

к чистоте жидкости зависят от области применения машины и условий ее эксплуатации.

На рис. 1 видно, что усредненная доля отказов меняется в зависимости от концентрации частиц, содержащихся в рабочей жидкости гидроприводов. С ростом концентрации частиц возрастает доля отказов гидроприводов машин.

Гидроприводы разделяют по схеме циркуляции рабочей жидкости на открытые – с разомкнутой циркуляцией и закрытые – с замкнутой циркуляцией, также существуют гибридные типы гидроприводов [3, 9, 12].

В открытых гидроприводах рабочая жидкость, проходящая от гидродвигателя, возвращается в бак, соединенный с атмосферой, и что является основной причиной попадания засорителей, влаги и воздуха в рабочую жидкость. Это происходит из-за разности объемов поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров. Во время выдвижения и втягивания штоков гидроцилиндров объем (этот объем жидкости замещается атмосферным воздухом, содержащим засорители и влагу) и уровень жидкости в баке меняются. За цикл работы машины это изменение объема может достигать десятки литров, а за смену – десятки тысяч литров.

В закрытых гидropередачах рабочая жидкость от гидродвигателя возвращается обратно во всасывающую линию насоса, а основной бак не имеет связи с атмосферой. Это исключает попадание загрязнителей в гидросистему через бак, что существенно увеличивает срок службы гидравлического масла и ресурс элементов гидропривода. Также известные закрытые гидropередачи имеют сравнительно меньшие габаритные размеры [2, 6].

Системы с закрытой циркуляцией широко распространены и хорошо зарекомендовали себя при работе с гидродвигателями вращательного действия. Жидкость от насоса поступает в гидромотор, а сливная линия гидромотора соединена напрямую со всасывающей линией насоса, образуя замкнутый контур. Для обеспечения функционирования гидравлическая схема дополнена подпиточным баком, используемым в процессе защиты от перегрузок и возврата дренажных утечек. Однако при допустимом снижении объемного КПД гидромоторов и насосов до 0,76 через бак

³ГОСТ 17216-2001³. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. Переиздание (по состоянию на май 2008 г.). М.: Стандартинформ, 2008.

подпитки, связанный с атмосферой, может проходить более 40% рабочей жидкости [2, 3, 10, 12]. Поэтому данную систему можно считать закрытой лишь частично. Другим недостатком таких схем является невозможность применения гидродвигателей в виде гидроцилиндров.

В схемах, использующих гидроцилиндры, задача изоляции рабочей жидкости от атмосферы в основном решена за счет использования комбинированных открыто-закрытых схем или применением закрытых гидробаков. Такие гидробаки сложны в изготовлении и повышают стоимость гидросистемы.

Закрытые гидропередачи, полностью изолированные от атмосферного воздуха, являются функциональными в летательных аппаратах. Их использование существенно увеличивает долговечность и надежность. Однако сложность исполнения схем затрудняет их применение в других типах машин.

Возврат дренажных утечек от насосов и гидромоторов в существующих схемах не предусмотрен или осуществлен введением подпиточных контуров, снижающих общий КПД системы.

В настоящее время ведутся разработки закрытых гидропередач, но имеющийся ряд недостатков существующих схем определяет предпосылки для более глубокого и детального изучения этого вопроса.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

На физической модели закрытой гидропередачи проверить работоспособность, надежность и технические возможности закрытой гидропередачи, повышающей долговечность гидропривода путем изоляции рабочей жидкости от атмосферного воздуха и обеспечения избыточного давления на входе в насос.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Элементами, играющими главную роль в стабильной работе закрытой гидропередачи, являются пневмогидроаккумулятор (ПГА) и эжекторный насос. Эти элементы и их характеристики тесно взаимосвязаны между собой и требуют взаимного расчета их параметров с учетом рекомендаций заводов-изготовителей насосов и гидромоторов и допустимых давлений в их всасывающей линии и линии дренажа.

Характеристики пневмогидроаккумулято-

ра подбираются из условия вмещения температурных приращений и максимальной разницы объемов поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров. При этом избыточное давление во всасывающей линии с учетом потерь в эжекторе и на участке от ПГА до насоса не должно превышать максимально допустимых значений за все время цикла работы. Начальный объем газовой полости при мини-

$$V_1 = \frac{-p_2 \Delta V_c T_1 - p_2 \Delta V_{st} T_1}{p_1 T_2 - p_2 T_1}, \quad (1)$$

мальном заполнении определяется по [20]: где p_2 – начальное давление в газовой полости при минимальном уровне жидкости, Па. Минимальное значение избыточного давления рекомендуется принимать не менее 0,15 МПа; p_2 – конечное давление в газовой полости при максимальном заполнении ПГА жидкостью, Па; ΔV_c – максимальный объем разницы поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров за цикл работы машины, м^3 ; ΔV_{st} – объем температурного приращения рабочей жидкости в гидросистеме, м^3 ; T_1, T_2 – начальная и конечная температура рабочей жидкости, К.

В стенде для проверки работоспособности закрытой гидропередачи при использовании гидромоторов и насосов различных марок и производителей, а также с различным объемным КПД предусмотрена возможность изменения характеристик пневмогидроаккумулятора по давлению, а при необходимости увеличения рабочего объема возможна замена на другой типоразмер.

Одним из условий расчета эжектора является поддержание избыточного давления в заданном диапазоне во всасывающей линии насоса (на выходе из эжектора). Также эжекторный насос должен обеспечить возврат дренажных утечек в систему, находящуюся под избыточным давлением, не вызывая превышения максимально допустимого давления дренажа и не создавая разрежения в дренажной линии.

Расчет эжекторного насоса проводится с помощью уравнения нормальных безразмерных гидравлических характеристик [20]:

$$(p_{\text{Эвых}} - p_{\text{Эдр}}) / (p_p - p_{\text{Эдр}}) = \varphi_1^2 \frac{d_b^2}{d_d^2} \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\left(\frac{d_b}{d_d} \right)^2 u^2}{1 - \left(\frac{d_b}{d_d} \right)^2} - (2 - \varphi_3^2) \frac{d_b^2}{d_d^2} (1 + u^2) \right], (2)$$

где $p_{\text{Эвых}}$ – давление после эжекторного насоса, Па; $p_{\text{Эдр}}$ – давление подсасываемого потока, Па; p_p – давление рабочей жидкости, Па; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коэффициенты скоростей сопла, диффузора входа в камеру смешения; d_d – диаметр горловины, м; d_b – диаметр сопла, м; u – коэффициент эжекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе принципиальной схемы спроектирован и изготовлен стенд для исследования закрытой гидропередачи. Данная схема и стенд запатентованы. Принципиальная схема стенда показана на рис. 2.

Основные отличительные особенности данной схемы закрытой гидропередачи:

- элементом, выполняющим роль закрытого гидробака, который изолирует систему от атмосферных засорителей и вмещает в себя разность объемов жидкости от гидроцилин-

дров и температурных расширений является ПГА низкого давления с разделением сред газовой и жидкостной полостей;

- с целью уменьшения кавитации во всасывающей линии насоса с помощью ПГА создается избыточное давление в сливной и всасывающей линии насоса;

- используя энергию сливаемого потока жидкости, эжекторный насос осуществляет возврат дренажных утечек во всасывающую линию насоса, находящуюся под избыточным давлением, которое больше допустимого давления дренажа.

Стенд работает следующим образом. Гидравлическая жидкость поступает из бака Б1 в насос Н, приводимый во вращение электродвигателем ЭД. Затем через напорный фильтр Ф большая часть жидкости поступает в распределитель Р, а другая часть отделяется регулятором потока РП, имитируя дренажные утечки насоса Н в необходимом для эксперимента

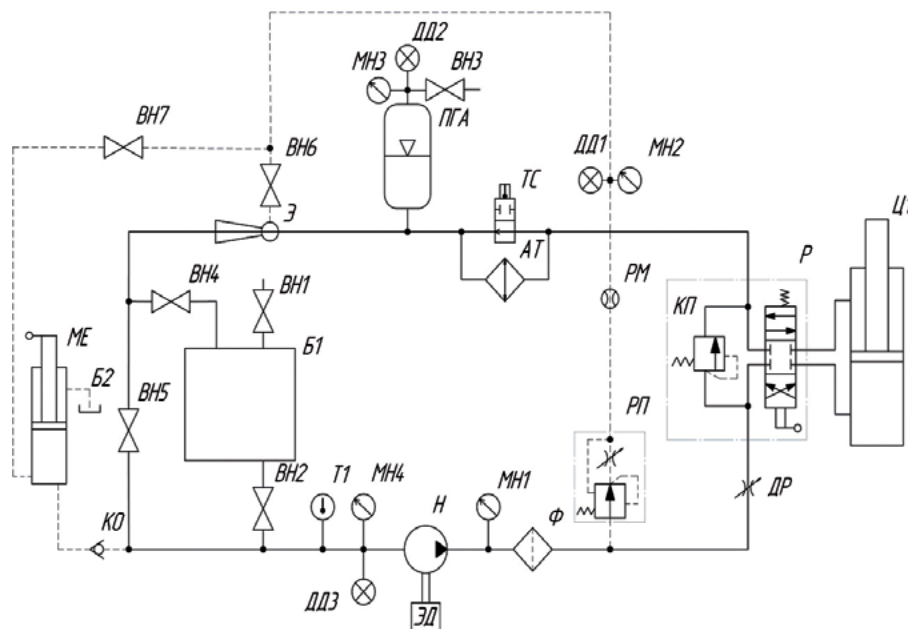


Рис. 2. Принципиальная схема стенда закрытой гидропередачи.

Б1, Б2 – баки; ВН1-ВН7 – вентили; Н – насос; Ф – фильтр; РП – регулятор потока; РМ – расходомер; КП – предохранительный клапан; Р – распределитель; Ц1 – гидроцилиндр; Ц2 – мерная емкость; ДР – дроссель; АТ – теплообменный аппарат; ТС – термостат; ПГА – пневмогидроаккумулятор; Э – эжекторный насос; КО – клапан обратный; Т1 – датчик температуры; МН1-МН4 – манометры; ДД1-ДД3 – датчики давления

Fig. 2. Schematic diagram of the closed hydraulic transmission test bench:

Б1, Б2 – tanks; ВН1-ВН7 – valves; Н – pump; Ф – filter; РП – flow regulator; РМ – flow meter; КП – safety valve; Р – distributor; Ц1 – hydraulic cylinder; Ц2 – measuring container; ДР – throttle; АТ – heat exchanger; ТС – thermostat; ПГА – pneumatic hydroaccumulator; Э – ejector pump; КО – check valve; Т1 – temperature sensor; МН1-МН4 – pressure gages; ДД1-ДД3 – pressure sensors

объеме. Для визуального измерения расхода утечек перед проведением эксперимента в систему включена герметичная мерная емкость Ц2, выполненная в виде цилиндра, и клапан КО, которые позволяют измерить и вернуть рабочую жидкость в систему без ее разгерметизации. Расход имитируемых дренажных утечек во время проведения эксперимента контролируется расходомером РМ. Основной поток через одну из рабочих позиций распределителя поступает к гидроцилиндру Ц1. Затем рабочая жидкость из полости гидроцилиндра Ц1 поступает в пневмогидроаккумулятор ПГА. Далее сливаемая рабочая жидкость попадает в эжекторный насос Э в качестве рабочего потока, а жидкость, отделенная распределителем потока РП поступает во всасывающую линию эжекторного насоса Э. После этого рабочий поток увлекает за собой поток из дренажной линии за счет сил, действующих на поверхности струи [21], далее оба потока объединяются в камере смешения эжекторного насоса Э и возвращаются в бак Б1.

Установка ПГА в сливной линии до эжекторного насоса Э обусловлена необходимостью компенсации перепадов расхода при изменении направления движения штока гидроцилиндра Ц. Такое расположение ПГА необходимо для стабильной работы эжекторного насоса Э.

Для поддержания необходимой температуры рабочей жидкости при проведении экспериментов в системе установлен теплообменный аппарат АТ с термостатом ТС. Вентили ВН1...ВН7 необходимы для заправки основного бака и пневмогидроаккумулятора, отключения основного бака от системы, перенаправления потоков жидкости для замеров дренажных утечек.

Основными контролируемыми параметрами при проведении исследования являются давления в дренажной линии, в сливной линии до эжекторного насоса, во всасывающей линии насоса. Для их визуального контроля на стенде установлены, соответственно, манометры МН2...МН4, а для фиксации и записи показаний – датчики давления ДД1...ДД3. Для контроля давления в напорной линии служит манометр МН1.

Играющими главную роль в стабильной работе закрытой гидropередачи данного типа

элементами являются пневмогидроаккумулятор и эжекторный насос. Эти элементы и их характеристики тесно взаимосвязаны между собой и требуют взаимного расчета их параметров с учетом рекомендаций заводов-изготовителей насосов и гидромоторов и допустимых давлений в их всасывающей линии и линии дренажа. На исследовательском стенде, главным образом, проверяется правильность определения их параметров и контроль взаимной работы. Основные зависимости определения характеристик ПГА и эжектора представлены в материалах и методах.

Для исследования более широкого диапазона возможностей закрытой гидropередачи в стенде использован эжекторный насос, в конструкции которого предусмотрена замена основных частей проточной части (сопла, камеры смешения, горловины и конфузора). Эжекторный насос в данной системе работает в условиях переменного давления рабочего потока. Для поддержания заданного коэффициента эжекции конструкция насоса (рис. 3) является саморегулирующейся и включает в себя механизм регулировки 3 и регулировочную иглу 5. При увеличении давления рабочего потока поршень 6 и игла 5 смещаются, изменяя площадь проходного сечения сопла 4, при уменьшении давления рабочего потока пружина 7 возвращает иглу в исходное положение. Для регулировки коэффициента эжекции в процессе износа гидромоторов и насосов и, соответственно, при увеличении дренажных утечек в конструкции эжектора предусмотрена регулировка основного положения иглы относительно сопла с помощью гаек 8.

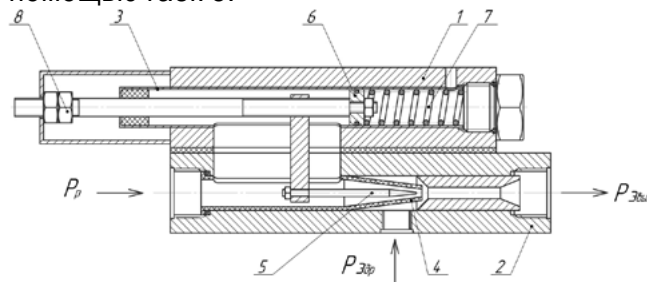


Рис. 3. Конструкция эжекторного насоса:
1 – корпус верхний; 2 – корпус нижний; 3 – механизм регулировки; 4 – сопло; 5 – игла; 6 – поршень;
7 – пружина; 8 – регулировочная гайка

Fig. 3. Ejector pump design: 1 – upper housing;
2 – lower housing; 3 – adjustment mechanism; 4 – nozzle;
5 – needle; 6 – piston; 7 – spring; 8 – adjusting nut

Экспериментальные исследования объемной гидропередачи требуют определения целого ряда параметров, их обработки и последующего анализа. Методы проведения приемо-сдаточных испытаний гидромашин регламентируются рядом стандартов: ГОСТ 14658-86⁴, ГОСТ 20719-75⁵, ГОСТ 29015-91⁶, однако они не предусматривают исследовательских испытаний, поэтому была разработана программа и методика испытаний, которые позволят в полной мере обеспечить проверку работоспособности закрытой гидропередачи в различных режимах и оценить параметры спроектированной гидросистемы:

- обеспечение возврата имитации дренажных утечек в систему, находящуюся под избыточным давлением, с помощью эжектора;

- проверка поддержания подпорного давления во всасывающей линии на входе в насос.

В ходе испытаний контролируются следующие показатели: температура рабочей жидкости; давление во всасывающей линии насоса; давление и расход в линии, имитирующей дренажную; давление в пневмогидроаккумуляторе.

Каждое испытание проводится при различных температурах рабочей жидкости: $T_1 = +20^\circ \text{C}$ и $T_2 = +60^\circ \text{C}$.

Для получения достоверных результатов необходимо провести ряд экспериментов с определенным шагом объема дренажных утечек. Для этого необходимо разделить рабочий диапазон системы на желаемое количество точек. Малое количество точек не позволяет судить о характере зависимости и провести достоверный анализ. Чрезмерное повышение количества точек приводит к резкому возрастанию числа опытов. Таким образом, количество точек для вычисления шага принято равным 10.

Для определения шага между испытаниями необходимо провести замеры при отсутствии утечек. Затем необходимо определить максимальный уровень утечек, при котором

возможна стабильная работа системы. После определения максимального и нулевого уровня утечек определить шаг изменения расхода, разделив рабочий диапазон на 10. С полученным шагом проводятся испытания в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3, позволяющим проверить работоспособность закрытой гидропередачи в условиях промежуточных значений между нулевым и максимально возможным объемом дренажных утечек.

В каждом из случаев рассматривается работа закрытой гидропередачи с основным гидробаком и при его отключении.

Согласно ГОСТ 17108-86⁷, число опытов при применении средств измерений с регистрирующими устройствами, в соответствии со стандартом, должно быть не менее 10, с показывающими – не менее 3. Таким образом, общее количество экспериментов составляет 160 испытаний.

Методика испытаний состоит из четырех этапов. Для каждого этапа составлены алгоритмы:

- алгоритм подготовки стенда к работе;
- алгоритм испытаний при отсутствии дренажных утечек;
- алгоритм испытаний при максимально допустимых дренажных утечках;
- алгоритм испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек (рис. 4).

Регистрация и запись результатов измерения в процессе испытаний производятся с высокой частотой, что позволяет оценить не только статические, но и динамические процессы в закрытой гидропередаче. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных дают возможность оценки работы и внесения корректировок в математическую модель системы.

Универсальность стенда, а именно – возможность смены проточной части эжектора, замена ПГА, подключение нескольких различных гидродвигателей, дает возможность проверить применимость закрытой гидропередачи

⁴ГОСТ 14658-86. Насосы объемные гидроприводов. Правила приемки и методы испытаний. Введ. 01.01.88 (с изм. 1999 г.). М.: Изд-во стандартов, 1999.

⁵ГОСТ 20719-75. Гидромоторы. Правила приемки и методы испытаний (изм. в апреле 1986 г.). М.: Изд-во стандартов, 1987.

⁶ГОСТ 29015-91. Гидроприводы объемные. Общие методы испытаний. Введ. 01.01.1992 (переизд. в авг. 2004 г.). М.: Изд-во стандартов, 2004.

⁷ГОСТ 17108-86. Гидропривод объемный и смазочные системы. Методы измерения параметров. Введ. 01.01.1988. М.: Изд-во стандартов, 1988.

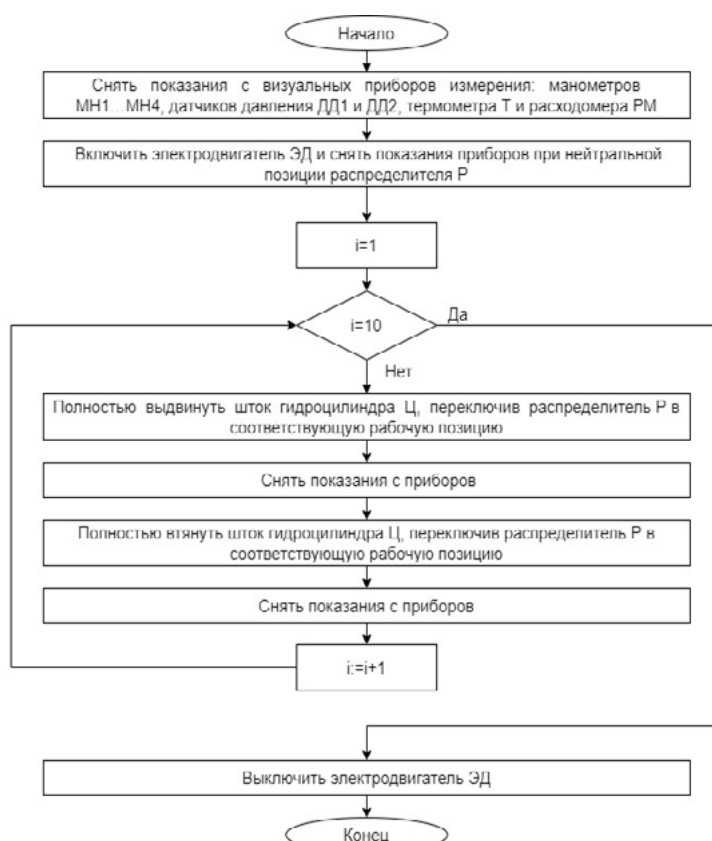


Рис. 4. Блок-схема алгоритма испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек
Fig. 4. Block diagram of the testing algorithm for intermediate values of drainage leakage volumes

для различных типов машин в лабораторных условиях. Испытания производятся не на реальной машине, а на физической модели (рис. 5), что позволяет снизить издержки на их проведение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании обзора влияния чистоты рабочей жидкости гидропривода на его долговечность обоснована актуальность вопроса исследования закрытой гидропередачи. Разработана принципиальная схема стенда,



Рис. 5. Фотография стенда для исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса
Fig. 5. An image of the test bench for the study of the closed hydraulic transmission with accumulator-supported overpressure in the pump suction line

включающая ПГА для поддержания избыточного давления в сливной линии и эжекторный насос, возвращающий дренажные утечки в систему. Спроектирован и изготовлен испытательный стенд для проверки работоспособности закрытой гидропередачи. Представлена конструкция эжектора, работающего в условиях переменного давления рабочего потока жидкости и обеспечивающего поддержание требуемого коэффициента эжекции и заданного давления на выходе из насоса путем изменения сечения сопла. Разработана программа и методика эксперимента. Проведенное исследование позволяет проверить возможность применения представленной закрытой гидропередачи в машинах различного типа.

Список источников

1. Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. М.: Машиностроение, 1979. 58 с.
2. Chen Mingdong, Zhao Dingxuan. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 82. P. 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.017>.
3. Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A case study of open- and closed-loop control of hydrostatic transmission with proportional valve start-up process // Energies. 2022. Iss. 15. P. 1860. <https://doi.org/10.3390/en15051860>.
4. Xiong Shaoping, Wilfong G., Lumkes J.J. Components sizing and performance analysis of hydro-mechanical power split transmission applied to a wheel loader // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 9. P. 1613. <https://doi.org/10.3390/en12091613>.
5. Yao Zhikai, Liang Xianglong, Zhao Qianting, Yao Jianyong. Adaptive disturbance observer-based control of hydraulic systems with asymptotic stability // Applied Mathematical Modelling. 2022. Iss. 105. P. 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.026>.
6. Guo Xiaofan, Vacca A. Advanced design and optimal sizing of hydrostatic transmission systems // Actuators. 2021. Iss. 10. P. 243. <https://doi.org/10.3390/act10090243>.
7. Skorek G. Study of losses and energy efficiency of hydrostatic drives with hydraulic cylinder // Polish Maritime Research. 2018. Iss. 25. P. 114–128.

8. Domagała Z., Kędzia K., Stosiak M. The use of innovative solutions improving selected energy or environmental indices of hydrostatic drives // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 679. P. 012016. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0138>.
9. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state performance investigation of closed-circuit hydrostatic drive using variable displacement pump and variable displacement motor // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/0954408920953662>. 2021. Vol. 235. Iss. 2. P. 249–258.
10. Choi Jaewoong, Kim Hakgu, Yu Seungjin, Yi Kyongsu. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25. Iss. 6. P. 1557–1563.
11. Xiao Yang, Guan Cheng, Lai Xiaoliang. Research on the design and control strategy for a flow-coupling-based hydraulic hybrid excavator // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2014. Vol. 228. Iss. 14. P. 1675–1687. <https://doi.org/10.1177/0954407013502326>.
12. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy savings in hydraulic hybrid transmissions through digital hydraulics technology // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 4. P. 1348. <https://doi.org/10.3390/en15041348>.
13. Zhou Shilei, Walker P., Tian Yang, Zhang Nong. Mode switching analysis and control for a parallel hydraulic hybrid vehicle // *Vehicle System Dynamics*. 2020. Vol. 59. Iss. 6. P. 928–948. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1737147>.
14. Zhou Shilei, Walker P., Zhang Nong. Parametric design and regenerative braking control of a parallel hydraulic hybrid vehicle // *Mechanism and Machine Theory*. 2020. Vol. 146. P. 103714. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103714>.
15. Бродский Г.С., Слесарев Б.В. Повышение надежности гидропривода – средство эффективного внедрения гидравлических экскаваторов на горных предприятиях СНГ // *Горная промышленность*. 2002. № 2. С. 76–85.
16. Бродский Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: Гемос, 2004. 360 с.
17. Staley D.R. Correlating lube oil filtration efficiencies with engine wear // *SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition*. 1988. P. 881825. <https://doi.org/10.4271/881825>.
18. Григорьев М.А., Борисова Г.В. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
19. Пискунов М.А. Чистое масло – исправная машина // *ЛесПромИнформ*. 2015. № 4. С. 66–72.
20. Anferov V.N., Bazanov S.A. Parameter determination procedure for the ejector pump and hydro-pneumatic accumulator in the enclosed hydraulic drive // *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57. Iss. 4. P. 607–614. <https://doi.org/10.1134/S1062739121040086>.
21. Аронс Г.А. Струйные аппараты: теория и расчет. М.: Госэнергоиздат, 1948. 139 с.

References

1. Kharazov A.M. *Technical diagnostics of machinery hydraulic drives*. Moscow: Mashinostroenie; 1979, 58 p. (In Russ.).
2. Chen Mingdong, Zhao Dingxuan. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;82:178-192. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.017>.
3. Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A case study of open- and closed-loop control of hydrostatic transmission with proportional valve start-up process. *Energies*. 2022;15:1860. <https://doi.org/10.3390/en15051860>.
4. Xiong Shaoping, Wilfong G., Lumkes J.J. Components sizing and performance analysis of hydro-mechanical power split transmission applied to a wheel loader. *Energies*. 2019;12(9):1613. <https://doi.org/10.3390/en12091613>.
5. Yao Zhikai, Liang Xianglong, Zhao Qianting, Yao Jianyong. Adaptive disturbance observer-based control of hydraulic systems with asymptotic stability. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;105:226-242. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.026>.
6. Guo Xiaofan, Vacca A. Advanced design and optimal sizing of hydrostatic transmission systems. *Actuators*. 2021;10:243. <https://doi.org/10.3390/act10090243>.
7. Skorek G. Study of losses and energy efficiency of hydrostatic drives with hydraulic cylinder. *Polish Maritime Research*. 2018;25:114-128.
8. Domagała Z., Kędzia K., Stosiak M. The use of innovative solutions improving selected energy or environmental indices of hydrostatic drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;679:012016. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0138>.
9. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state performance investigation of closed-circuit hydrostatic drive using variable displacement pump and variable displacement motor. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021;235(2):249-258. <https://doi.org/10.1177/0954408920953662>.
10. Choi Jaewoong, Kim Hakgu, Yu Seungjin, Yi Kyongsu. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011;25(6):1557-1563.
11. Xiao Yang, Guan Cheng, Lai Xiaoliang. Research on the design and control strategy for a flow-coupling-based hydraulic hybrid excavator. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2014;228(14):1675-1687. <https://doi.org/10.1177/0954407013502326>.
12. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy savings in hydraulic hybrid transmissions through digital hydraulics technology. *Energies*. 2022;15(4):1348. <https://doi.org/10.3390/en15041348>.
13. Zhou Shilei, Walker P., Tian Yang, Zhang Nong. Mode switching analysis and control for a parallel hydraulic hybrid vehicle. *Vehicle System Dynamics*. 2020;59(6):928-948. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1737147>.

14. Zhou Shilei, Walker P., Zhang Nong. Parametric design and regenerative braking control of a parallel hydraulic hybrid vehicle. *Mechanism and Machine Theory*. 2020;146:103714. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103714>.
15. Brodskij G.S., Slesarev B.V. Improving hydraulic drive reliability as a means of effective implementation of hydraulic excavators at the mining enterprises of the Commonwealth of Independent States. *Gornaya promyshlennost'*. 2002;2:76-85. (In Russ.).
16. Brodskiy G.S. *Filters and filtration systems for mobile machines*. Moscow: Geos; 2004, 360 p. (In Russ.).
17. Staley D.R. Correlating lube oil filtration efficiencies with engine wear. *SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition*. 1988;881825. <https://doi.org/10.4271/881825>.
18. Grigoriev M.A., Borisova G.V. *Fuel purification in internal combustion engines*. Moscow: Mashinostroenie; 1991, 208 p. (In Russ.).
19. Piskunov M.A. *Pure oil as a condition of a serviceable machine*. *LesPromInform*. 2015;4:66-72. (In Russ.).
20. Anferov V.N., Bazanov S.A. Parameter determination procedure for the ejector pump and hydro-pneumatic accumulator in the enclosed hydraulic drive. *Journal of Mining Science*. 2021;57(4):607-614. <https://doi.org/10.1134/S1062739121040086>.
21. Arons G.A. *Jet devices: theory and calculation*. Moscow: Gosenergoizdat; 1948, 139 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Базанов Сергей Александрович,

заместитель директора по развитию,
ООО «Валсиб»,
630049, г. Новосибирск, Красный просп., 220/6, Россия
✉ bazanoff@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7452-8523>

Анферов Валерий Николаевич,

д.т.н., профессор кафедры
«Подъемно-транспортные,
путевые, строительные и дорожные машины»,
Сибирский государственный университет путей
сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, Россия
avn43@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Bazanov,

Deputy Director for Development,
LLC "Valsib",
220/6, Krasny Prospekt, Novosibirsk 630049, Russia
bazanoff@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7452-8523>

Valery N. Anferov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Lifting and Transport,
Track, Construction and Road Machinery,
Siberian Transport University
191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk 630049, Russia
avn43@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали равноценный вклад в исследование и написание статьи.

Contribution of the authors

The authors have made an equal contribution to the research and writing of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 4.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2023 г.; принята к публикации 15.07.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 4.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 15.07.2023.