



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 62-82; 004.94

А.В. ПУЗАНОВ, канд. техн. наук, доц.
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: puzanov@vniisignal.ru

С.А. КУРДУБАНОВ
главный конструктор — заместитель генерального директора по научной работе¹
E-mail: kurdubanov@vniisignal.ru

¹АО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров, Российская Федерация

Поступила в редакцию 14.02.2023.

МИНИМИЗАЦИЯ ДЕГРАДАЦИИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОПРИВОДОВ НА ФОРСИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ

В процессе работы привода рабочая жидкость подвергается воздействиям разных физических факторов эксплуатационного и функционального характера. Жидкости при этом теряют свои свойства — деградируют. Это приводит к снижению производительности и повышению износа подвижных частей гидропривода, уменьшению его срока службы. При форсировании гидроприводов по силовым или скоростным параметрам динамика этих процессов нарастает. В работе проведен анализ различных факторов, оказывающих негативное воздействие на эксплуатационные параметры рабочей жидкости гидроприводов. В качестве методов исследования применены программные средства мультидисциплинарного анализа моделей базовых элементов гидроприводов. Приведены результаты моделирования рабочих процессов гидроприводов. Локализованы зоны и параметры зависимостей степени деградации рабочей жидкости от внешних и внутренних факторов. Результаты моделирования при использовании экспериментальных данных позволяют оценить позитивный или негативный вклад тех или иных конструкторско-технологических решений и эксплуатационных режимов в улучшение реологических и триботехнических характеристик рабочих жидкостей гидроприводов.

Ключевые слова: гидропривод, деградация рабочей жидкости, моделирование рабочих процессов, мультифизические модели

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-17-24>

В качестве приводов движения основного и вспомогательного оборудования мобильной техники гидроприводы (ГП) подвержены множеству физических воздействий (рисунки 1). Наибольшие значения эксплуатационных параметров — удельной мощности, максимального рабочего давления рабочей жидкости (РЖ), диапазона температуры эксплуатации и скорости перемещения выходных звеньев — достигаются в объемных гидроприводах замкнутого типа на основе аксиально-плун-

жерных гидромашин [1, 2]. Рабочий процесс в ГП отражает высокодинамические условия эксплуатации в широком диапазоне вариации абсолютных и относительных значений температуры, давления, взаимодействие с разнохимическими и разнофизическими структурами, насыщение примесями (продуктов трибомеханических, химических и прочих процессов) [3].

Рабочие процессы ГП кроме высокой динамики характеризуются различной продолжительностью

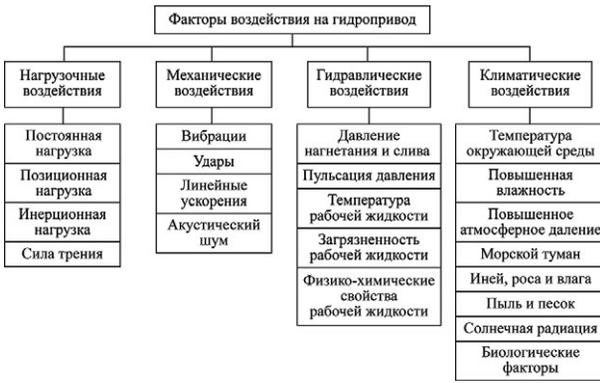


Рисунок 1 — Факторы воздействия на гидропривод
Figure 1 — Factors affecting the hydraulic drive

тью процессов, а, следовательно, разной многоцикловой и ресурсной длительностью [4]. Рабочая жидкость в процессе работы в гидроприводе претерпевает существенные изменения. Ее деградация (ухудшение эксплуатационных показателей) приводит к снижению производительности [5] и повышению износа подвижных частей гидропривода, что в свою очередь порождает образование продуктов износа. Таким образом, процесс деградации рабочей жидкости и сопряженных трибопар принимает лавинообразный характер.

Именно аксиально-плунжерные насосы с торцовым распределением и золотниковые распределители для следящих систем с автоматическим регулированием и управлением наиболее чувствительны к загрязнениям РЖ. Применение гидрооборудования подобного класса точности с зазорами в узлах с подвижными соединениями деталей в пределах 1...20 мкм обуславливает повышенные требования к чистоте рабочих жидкостей гидросистем. Для золотниковых и плунжерных трибопар наибольшую опасность представляют частицы твердых включений с размерами, сопоставимыми с величиной рабочих зазоров. Как отмечают исследователи, некачественная рабочая жидкость гидросистем является причиной около 10 % от всех нарушений функциональности гидравлического оборудования [6]. К нарушениям качества жидкости относятся: попадание в РЖ различных твердых примесей; изменение газосодержания в РЖ; работа оборудования на РЖ с утраченными эксплуатационными свойствами; использование РЖ, не соответствующей условиям эксплуатации оборудования [7]. К загрязнениям РЖ примесями относятся: инородные включения технологического типа (стружка, остатки абразива, клея, краски); абразивные частицы (как продуктов износа внутри гидрооборудования, так и из внешней среды); элементы деградации гидросистемы (кусочки материала гибких шлангов и уплотнений); попадание в бак посторонних жидкостей (воды, охлаждающих жидкостей, эмульсии).

Все это предопределяет необходимость поддержания качества компонентов ГП в каждом трибо-

узле. Это обеспечивается за счет контроля и замены (обновления) рабочей жидкости и техобслуживания механических компонентов ГП. В настоящее время контроль качества РЖ, как правило, заключается только в определении степени ее загрязненности по перепаду давления на фильтрах.

Стоит отметить, что диагностирование состояния гидросистемы по параметрам РЖ основано на том, что она является носителем комплексной информации о работе гидросистемы с точки зрения износа пар трения, развивающихся дефектов отдельных деталей или узлов, отклонений в протекании рабочего процесса [8].

Все вышеперечисленное определяет актуальную научно-техническую проблему необходимости обеспечения реологической стабилизации и минимизации деградации рабочей жидкости, применяемой в форсированных ГП. Под форсированием ГП понимают кратковременное повышение уровня рабочего давления (потенциальное форсирование) или частоты вращения приводного вала, или скорости перемещения выходного звена (скоростное форсирование).

Цель работы заключается в локализации негативных факторов, влияющих на деградацию РЖ для последующего исследования влияния конструктивных, технологических и других параметров эксплуатации форсированных гидроприводов на динамику этой деградации.

Факторы воздействия на рабочую жидкость.

Схема классификации основных факторов, оказывающих влияние на деградацию РЖ и ее ресурс, представлена на рисунке 2 [6].

Деградация минерального масла (основного вида рабочей жидкости объемных гидроприводов) происходит из-за его непосредственного взаимодействия с газообразными, жидкими и твердыми продуктами загрязнения (продукты износа деталей, атмосферная пыль, охлаждающая жидкость) [9]. Причины деградации масла классифицируют на окисление, термический распад, истощение при-скадок, загрязнение [10, 11].

Окисление — это реакция взаимодействия молекул РЖ с молекулами кислорода. Признаками окисления являются: увеличение кислотного числа; увеличение вязкости; потемнение; изменение

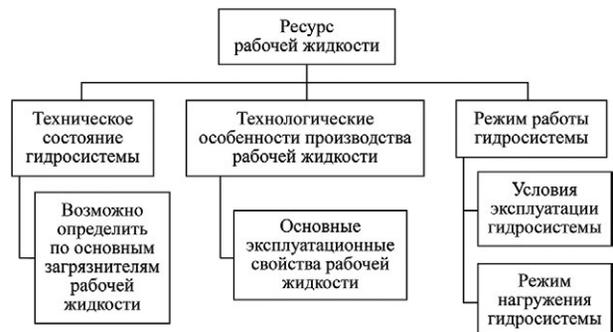


Рисунок 2 — Факторы, влияющие на ресурс рабочей жидкости
Figure 2 — Factors affecting the service life of the working fluid

запаха. Окисление может привести к увеличению вязкости и образованию «лака», шлама и осадка. Лак — смолистое вещество, образующееся под воздействием высоких температур, налипает на все омываемые РЖ поверхности. Шлам — мягкие глинистые отложения, осаждаемые из РЖ. Осадок образуют твердые углеродистые нерастворимые вещества и оксиды. Последние обычно диспергируют в рабочую жидкость. Окисление РЖ приводит к истощению присадок и разрушению базового масла (масляной основы). Окисление РЖ фиксируют по увеличению кислотного числа. Кроме потери эксплуатационных свойств РЖ, ее окисление приводит к коррозии и образованию ржавчины омываемых элементов ГП.

Термический распад РЖ происходит при воздействии высоких температур. РЖ в этом случае интенсивно окисляется, полимеризуется и коксуется. Продукты, образующиеся в результате всех этих процессов, накапливаются в масле и приводят к значительному изменению его свойств [12].

Температура любого смазочного материала (тем более в качестве рабочей жидкости) — первостепенная задача контроля как в мобильной, так и в стационарной гидравлике [13]. Помимо триботехнических функций внутри механизма, смазка (или РЖ) также должна обеспечивать отвод и рассеивание тепла (термостатирование, термостабилизацию). Из этого следует, что РЖ всегда находится в зоне риска перегрева выше рекомендуемой температуры.

Правило Аррениуса применительно к температуре РЖ: за каждые 10 °С скорость химической реакции удваивается, т. е. при повышении температуры РЖ на 10 °С срок ее службы сокращается вдвое. Обеспечение соответствия температуры РЖ рекомендованному диапазону в процессе эксплуатации гидроаппаратов и систем на их основе продлевает срок их службы и уменьшает реакцию термического распада.

Дегградация эксплуатационных свойств РЖ происходит в том числе и по причине аддитивного истощения присадок — большинство пакетов присадок в масле рассчитаны на перманентное израсходование в течение срока службы РЖ. Истощение присадок вызвано двумя основными причинами. Первая — дегградация свойств со временем, вызванная естественными причинами их старения. Вторая — выработка присадок вследствие химического взаимодействия с продуктами износа и иных загрязнений, в том числе при воздействии высоких температур.

К специфичным изменениям в РЖ при взаимодействиях с элементами ГП относятся также явления кавитации, облитерации, микродизелинга.

Кавитация — это явление, при котором статическое давление жидкости опускается ниже уровня давления паров жидкости, что приводит к образованию в объеме жидкости миниатюрных

полостей (пузырьков или пустот — от лат. *cavitas*), заполненных паром. При воздействии более высокого давления эти полости разрушаются и генерируют ударные волны.

Образование и схлопывание пустот у поверхности металла вызывают циклические напряжения. Это приводит к поверхностной усталости металла, вызывая так называемый кавитационный износ, сопровождающийся загрязнением РЖ продуктами износа. В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми [14].

Кавитацию обычно делят на два класса поведения: гидродинамическую (инерционную) и акустическую. Гидродинамическая кавитация возникает при обтекании твердых тел в регулирующих элементах клапанов, в насосах, пропеллерах или крыльчатках. Акустическая — возникает при прохождении через жидкость акустических колебаний. Этот тип кавитации используется для ультразвуковой очистки, а также наблюдается в насосах, пропеллерах [14].

Для реологии РЖ кавитационные воздействия также имеют двойственный эффект [15]. Негативные эффекты заключаются в нарушении сплошности потока, образовании дополнительной (парообразной) фазы, пенообразовании, деформации свойств РЖ (физических, триботехнических и химических). Положительные эффекты — дегазация жидкости, а также кавитационное разрушение твердых загрязнений.

Необходимо отметить, что понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении или вакуумировании жидкости. Но эти процессы распространяются по всему объему жидкости в отличие от кавитации, которая имеет ограниченную область. Данные факторы в концепции форсирования ГП маловероятны, поэтому в данной работе не рассматриваются.

Облитерация — зарастание проходного сечения гидравлического элемента с течением времени. Это явление происходит вследствие адсорбции поляризованных молекул. Облитерации подвержены гидроэлементы даже при течении внутри них тщательно очищенных жидкостей. Это крайне негативный фактор в гидрофицированных системах управления, особенно при их редком использовании (например, в аварийных системах). Этот эффект является препятствием для миниатюризации гидравлических элементов, а также определяет зоны нечувствительности управляющей аппаратуры, их нестабильность во времени.

Микродизелинг — быстрое и адиабатическое сжатие пузырьков воздуха в масле, вызывающее экстремальное локальное повышение температуры.

Эффект микродизелинга, также известный как термическое разрушение (деградация) под давлением, представляет собой процесс, при котором

воздушный пузырь переходит из области низкого давления в системе в зону высокого давления.

Микродизелинг приводит к адиабатическому сжатию пузырьков воздуха в масле, которые затем нагревают окружающие молекулы масла, вызывая мгновенное окисление этих молекул.

Зарождение и развитие загрязнений РЖ — отдельная объемная тема для исследований. Загрязнения могут быть индифферентными и критическими, вызывая образования шлиф-поверхностей и изнашивая сопряженные узлы и детали.

Технологические загрязнения. Избежать подобного типа загрязнений в гидравлических жидкостях наиболее затруднительно. Несмотря на максимальные усилия производителей гидравлического оборудования, как правило, новая техника поставляется с наличием в системе загрязнений. В компонентах типа гидромашин и гидрораспределителей всегда будут остаточные загрязнения, образовавшиеся в процессе производства. Таким образом, гидросистемы с использованием таких компонентов по умолчанию будут иметь некую начальную степень загрязнений. В процессе сборочных, ремонтных или обслуживающих операций степень загрязнения только увеличивается. Несмотря на повышение степени контроля производственных условий, внутрь конечного продукта неизбежно попадут один или несколько следующих загрязнителей [16]:

- металлические опилки, оставшиеся при сверлении отверстий, каналов и соединении резьбовых компонентов;
- неметаллические частицы, образовавшиеся в результате финишной обработки компонентов;
- капли наплавленного или присадочного металла, образовавшиеся при сварке компонентов или канифоль, оставшаяся и затвердевшая после пайки фитингов и труб;
- волокна/нити бумаги или ткани, используемой для очистки компонентов перед установкой;
- излишки смазки, используемой при сборке.

Загрязнения, такие как грязь, вода, металлы, производственная пыль, воздух, могут значительно повлиять на скорость разложения РЖ. Грязь, содержащая мелкие частицы металла, может быть катализатором, который способен вызывать даже искрение и ускорит процесс деградации РЖ. Загрязнения РЖ, возникающие в процессе эксплуатации и первоначально локализованные, могут получить импульс распространения по всей гидравлической системе и вызвать нештатный износ. Описанные выше примеси при движении вместе с жидкостью попадают на поверхности запорных элементов клапанов, в сопряженные зазоры подвижных деталей, в отверстия дросселей и демпферов, вызывают повышенный износ и отказы (защемление золотников, заклинивание плунжеров, потерю герметичности клапанов, закупорку каналов малого сечения).

Воздух и вода в гидросистеме являются источниками кислорода, который вступает в реакцию с РЖ и приводит к ее окислению. Кроме этого, воздух, попавший в РЖ, растворяется в ней и повышает ее сжимаемость. Повышение степени загрязнения негативно отражается на эффективности работы всего гидрооборудования: увеличиваются динамические забросы, снижается КПД. Данный фактор особенно актуален для гидросистем открытого типа.

Подобно загрязнению воздухом, загрязнение РЖ водой влияет на ее сжимаемость и общую эффективность работы. Кроме того снижает смазывающую способность РЖ и может привести к образованию эмульсии внутри гидравлической системы. Но наихудшим вариантом является то, что загрязнение водой может стать причиной коррозии металлических элементов с необратимыми последствиями.

Наиболее чувствительны к качеству РЖ узлы гидросистемы, такие как гидроаппаратура, гидропанели и насосные станции. Ухудшение качества РЖ стремительно снижает их ресурс.

Наибольшие воздействия на РЖ происходят в узловых элементах ГП, связанных с трансформацией энергий — насосе, распределителе, гидродвигателе (цилиндре или моторе) [17]. Также к элементам ГП, оказывающим влияние на РЖ, следует отнести теплообменники и фильтры. Поэтому исследования изменений реологических и триботехнических свойств РЖ рассмотрены на примере аксиально-плунжерной гидромашин (АППМ) (рисунки 3, 4).

Моделирование рабочих процессов в гидрориводе. Адаптивные геометрические модели выполнены в Autodesk Inventor. Моделирование проводилось в программном комплексе Autodesk Simulation Multiphysics (CFD + Mechanical) [18–20]. Адаптивные модели позволяют перестраивать исходную геометрическую и расчетную модели и исследовать зависимость выходных результатов от конструктивных параметров.

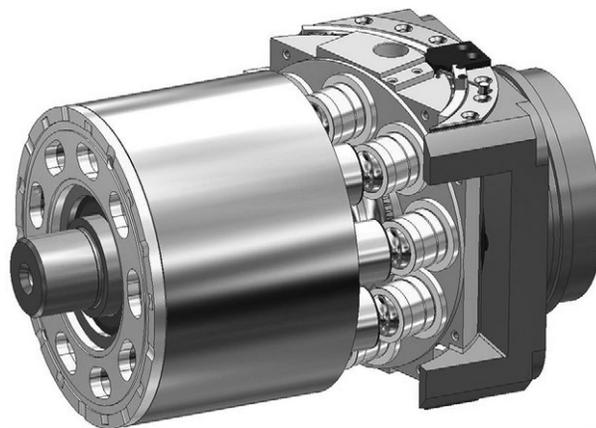


Рисунок 3 — Типовая конструкция аксиально-плунжерной гидромашин (модуль ходовой части)
Figure 3 — Typical design of an axial piston hydraulic machine (running gear module)



Рисунок 4 — Исследуемый сектор ходовой части аксиально-плунжерной гидромашины
Figure 4 — Investigated sector of the axial piston hydraulic machine running gear

Поскольку именно резкое изменение эксплуатационных и функциональных факторов оказывает наибольшее влияние на скорость изменения (деградацию) свойств рабочей жидкости ГП, то особое внимание при моделировании уделялось переходным процессам [21–24]. Исследования рабочего процесса гидромашины проводились в нестационарной постановке (изменение уровня рабочего давления и скорости приводного вала). В качестве исходных данных использованы следующие параметры: частота вращения приводного вала $n = 1500, 2500, 2900$ об/мин, давление в полости всасывания $p_0 = 1; 2; 2,5$ МПа, давление в полости нагнетания $p = 35; 50; 75$ МПа, температура окружающей среды $t_0 = -40; 20; 40$ °С, температура рабочей жидкости $t = -40; 20; 80$ °С.

Рисунки 5–8 отражают результаты, полученные для сочетания исходных данных: частота вращения приводного вала $n = 2500$ об/мин; давление в полости всасывания $p_0 = 2$ МПа; давление в полости нагнетания $p = 50$ МПа; температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С; температура рабочей жидкости $t = 80$ °С, в момент времени, соответствующий полному открытию полости нагнетания поршневой полостью. На рисунках 5 и 6 представлены линии тока и поле скоростей РЖ по проточным каналам ходовой части гидромашины с учетом центробежных нагрузок.

Эти изображения определяют места концентрации загрязнений:

- твердые (более тяжелые) фракции будут собираться на внешних поверхностях внутренних объемов, в местах завихрения потока, при снижении скорости до 0 в пазах и угловых переходах;
- эмульсия и кавитационная пена (как более легкие фракции) — на внутренних.

Для исключения (удаления) загрязнений из гидросистемы в процессе эксплуатации в этих местах предусматривают специальные системы конструктивных элементов. В ручном режиме — обычные пробки.

На рисунке 6 представлена картина векторов скоростей. Локальное превышение пороговых значений приводит к изменениям свойств РЖ, описанным выше.

На рисунке 7 представлена картина диссипации энергии потока РЖ в проточных каналах ходовой части АПГМ. Кроме очевидной зоны в дроссели-

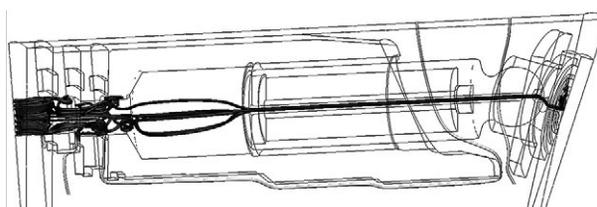


Рисунок 5 — Линии тока рабочей жидкости
Figure 5 — Working fluid flow lines

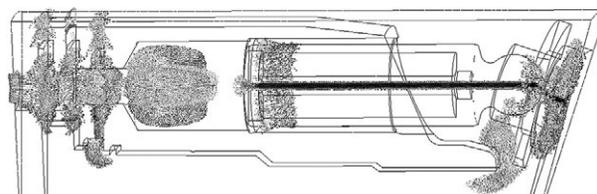


Рисунок 6 — Поле скоростей течения рабочей жидкости внутри ходовой части гидромашины
Figure 6 — Velocity field of the working fluid flow inside the hydraulic machine running gear

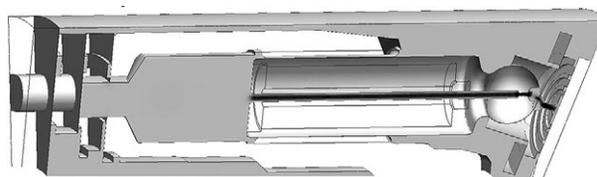


Рисунок 7 — Диссипация энергии рабочей жидкости
Figure 7 — Energy dissipation of the working fluid

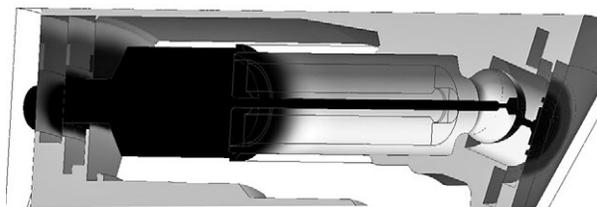


Рисунок 8 — Распределение полей давления по проточным полостям и каналам гидромашины
Figure 8 — Distribution of pressure fields along the flow cavities and channels of the hydraulic machine

рующих отверстиях сферической заделки поршня и гидростатической опоры подобные зоны наблюдаются в кольцевых зазорах «втулка блока цилиндров — плунжер» и по поверхностям сопряжения торцевого распределителя с накладным дном блока цилиндров.

Диссипация энергии является причиной локального повышения температуры. Чем больше локальный всплеск, тем большее влияние этот фактор оказывает на свойства РЖ и сопряженные элементы конструкции. Таким образом, деградация свойств РЖ от воздействия высоких скоростей течения (сопряженных режим снижением давления) и локального повышения температуры происходит в дросселирующем канале плунжера, в торцевых зазорах между гидростатической опорой плунжера и опорным диском и в распределительном узле.

На рисунок 8 представлена картина распределения полей давления РЖ по проточной части модуля ходовой части АПГМ.

Высокий уровень давления определяет изменение физико-механических и химических свойств РЖ, а зоны локальных контактов механических элементов при пиковых значениях температуры и давления формируют разрушение их структуры, что порождает образование механических элементов загрязнений.

Локализованные места на рисунках 5–8 являются зонами пиковой скорости деградации реологических свойств РЖ. Их конструктивная оптимизация позволяет снизить подобные эффекты вплоть до исключения.

На рисунке 9 представлена картина разрыва сплошности потока РЖ при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом происходит и дегенерация физико-механических и химических свойств РЖ, образование газовой фазы.

В данном случае конструктивных решений недостаточно. Применяются организационно-технические мероприятия по прогреву и термостабилизации системы в рабочем диапазоне температур без приложения нагрузок.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования гидравлических устройств и систем на их основе является концепция «умной» гидравлики (Smart Hydraulics), когда гидравлические элементы объединяются с передовыми цифровыми решениями [25, 26]. Оснащение гидрофицированного комплекса интеллектуальными датчиками обеспечивает систему управления данными о состоянии каждого из его элементов. Один из аспектов данной концепции заключается в оперативном контроле состояния РЖ в гидросистеме. Подобные технологии обеспечивают обратную связь по состоянию РЖ в зависимости от рабочих режимов при варьировании эксплуатационных условий в реальном времени.

Заключение. Рабочая жидкость в процессе работы в гидроприводе претерпевает существенные изменения. Ее деградация (ухудшение эксплуатационных показателей) приводит к снижению производительности и повышению износа подвижных частей ГП.

В работе рассмотрены факторы воздействия на РЖ, влияющие на ее изменения с различных точек зрения.

Приведены примеры результатов моделирования рабочих процессов в гидроприводах, позволяющие локализовать места деградации реологических свойств РЖ, минимизировать подобные эффекты изменением конструктивных или технологических параметров, а также сформулировать рекомендации для проведения организационно-технических мероприятий по реологической стабилизации РЖ.

Представленные результаты моделирования рабочих процессов гидромашин позволяют оценивать позитивный или негативный вклад тех или иных конструкторско-технологических решений и эксплу-

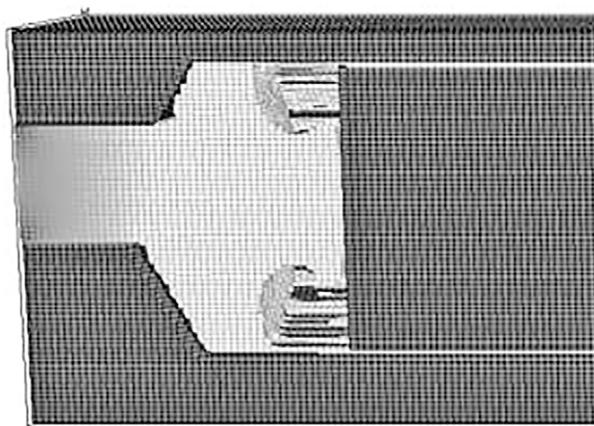


Рисунок 9 — Разрыв сплошности потока рабочей жидкости при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Figure 9 — Discontinuity of the working fluid flow at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

атационных режимов в улучшение реологических и триботехнических характеристик РЖ гидроприводов, прогнозировать срок наработки до предельного состояния, пределы форсирования гидроприводов по скоростным и силовым параметрам при сохранении ресурсных показателей.

Список литературы

1. Wang, Y. Modeling and control of a novel electro-hydrostatic actuator with adaptive pump displacement / Y. Wang, S. Guo, H. Dong // Chinese Journal of Aeronautics. — 2020. — Vol. 33, iss. 1. — Pp. 365–371. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.020>.
2. Hydraulic piston pump in civil aircraft: current status, future directions and critical technologies / S. Guo [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. — 2020. — Vol. 33, iss. 1. — Pp. 16–30. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.01.013>.
3. Thermo-elastohydrodynamics of the piston-cylinder contact in high-pressure pumps / Ö. Özdemir [et al.] // MTZ worldwide. — 2018. — Vol. 79, iss. 3. — Pp. 60–63. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s38313-017-0173-z>.
4. Scaling the speed limitations for axial-piston swash-plate type hydrostatic machines / N.D. Manring [et al.] // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 2014. — Vol. 136, iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026129>.
5. Sensitivity analysis for the operating efficiency of an axial piston pump / N. Manring [et al.] // Fluid Power Systems Technology: proc. of the ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Chicago, Oct. 12–14, 2015. — New York, 2015. — 7 p. — DOI: <https://doi.org/10.1115/FPMC2015-9524>.
6. Алаев, А.С. Автоматизация диагностики рабочей жидкости в гидросистемах металлорежущих станков / А.С. Алаев, Н.Н. Трушин // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. — 2017. — Вып. 8, ч. 2. — С. 258–264.
7. Смирнов, Ю.А. Неисправности гидроприводов станков: красочный альбом / Ю.А. Смирнов, В.С. Волков. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с.
8. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В. Алексеева [и др.]; под общ. ред. Т.М. Башты. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
9. Rammohan, A. Engine's lubrication oil degradation reasons and detection methods: a review / A. Rammohan // Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences. — 2016. — Vol. 9, iss. 4. — Pp. 3363–3366.
10. Guidelines for diesel engines lubrication. Oil degradation [Electronic resource]. — Mode of access: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_22.pdf. — Date of access: 01.12.2022.
11. Johnson, D.W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms / D.W. Johnson // Aerospace Engineering. — 2018. — DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82398>.

12. Чмиль, В.П. Гидропневмопривод: моногр. / В.П. Чмиль. — СПб.: СПбГАСУ, 2010. — 176 с.
13. Schenk, A. A transient thermoelastohydrodynamic lubrication model for the slipper/washplate in axial piston machines / A. Schenk, M. Ivantysynova // Journal of Tribology. — 2015. — Vol. 137, iss. 3. — 10 p. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029674>.
14. Руденко, М.Г. Кавитация и фазовые превращения в условиях термодинамической неравновесности жидкости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14 / М.Г. Руденко; Вост.-Сиб. гос. ун-т технологий и упр. — Улан-Удэ, 2011. — 36 с.
15. Vacca, A. A numerical approach for the evaluation of the effects of air release and vapour cavitation on effective flow rate of axial piston machines / A. Vacca, R. Klop, M. Ivantysynova // International Journal of Fluid Power. — 2010. — Vol. 11, iss. 1. — Pp. 33–45.
16. Шесть видов загрязнения гидравлических жидкостей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.donaldson.com/ru-ru/engine/filters/technical-articles/six-types-hydraulic-fluid-contamination/>. — Дата доступа: 01.12.2022.
17. Пузанов, А.В. Трибопары гидроприводов: моногр. / А.В. Пузанов. — Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2022. — 184 с.
18. Пузанов, А.В. Трансдисциплинарные модели гидроприводов мобильной техники: моногр. / А.В. Пузанов. — Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2018. — 228 с.
19. Пузанов, А.В. Гидромеханический анализ ходовой части аксиально-поршневой гидромашины / А.В. Пузанов // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4(52). — С. 161–169.
20. Пузанов, А.В. Моделирование работоспособности насосного оборудования в арктических условиях эксплуатации / А.В. Пузанов, О.О. Сукоркина, Е.А. Ершов // Автоматизация. Современные технологии. — 2020. — № 3. — С. 108–111. — DOI: <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2020-74-3-108-111>.
21. Wondergem, A.M. The impact of the surface shape of the piston on power losses / A.M. Wondergem, M. Ivantysynova // Fluid Power Systems Technology: proc. of 8th FPNI Ph.D Symposium on Fluid Power, Lappeenranta, June 11–13, 2014. — New York, 2014. — 12 p. — DOI: <https://doi.org/10.1115/FPNI2014-7843>.
22. Gels, S. Simulation of the lubricating film between contoured piston and cylinder / S. Gels, H. Murrenhoff // International Journal of Fluid Power. — 2010. — Vol. 11, iss. 2. — Pp. 15–24.
23. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples / J.M. Bergada [et al.] // Applied Mathematical Modelling. — Vol. 36, iss. 4. — Pp. 1731–1751. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016>.
24. Ouyang, X. An investigation into the swash plate vibration and pressure pulsation of piston pumps based on full fluid-structure interactions / X. Ouyang, X. Fang, H. Yang // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. — 2016. — Vol. 17, iss. 3. — Pp. 202–214. — DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1500286>.
25. Six reasons you should switch to smart technology [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.eaton.com/ZS/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/Resources/Articles/Six-reasons-you-should-switch-to-smart-technology/index.htm>. — Date of access: 01.12.2022.
26. Jankovič, D. The concept of smart hydraulic press / D. Jankovič, M. Šimic, N. Herakovič // Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: proc. of SOHOMA 2020. — 2021. — Vol. 952. — Pp. 409–420. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_29.

PUZANOV Andrey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher¹

E-mail: puzanov@vniisignal.ru

KURDUBANOV Sergey A.

Chef Designer — Deputy Director General for Research¹

E-mail: kurdubanov@vniisignal.ru

¹JSC “VNII “Signal”, Kovrov, Russian Federation

Received 14 February 2023.

MINIMIZATION OF DEGRADATION OF RHEOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HYDRAULIC FLUIDS IN FORCED MODES

During operation of the drive, the working fluid is exposed to various physical factors of operational and functional nature. At the same time, fluids lose their properties, degrade. This leads to a decrease in productivity and an increase in wear of the movable parts of the hydraulic drive, a decrease in its service life. When forcing hydraulic drives according to power or speed parameters, the dynamics of these processes grows. The paper analyzes various factors that have a negative impact on the operational parameters of the working fluid of hydraulic drives. Software tools of multidisciplinary analysis of models of basic elements of hydraulic drives are used as research methods. The results of simulation of hydraulic drive operating processes are given. Zones and parameters of working fluid degradation degree dependence on external and internal factors are localized. The simulation results using the experiment data make it possible to assess the positive or negative contribution of certain design and technological solutions and operational modes to improvement of the rheological and tribotechnical characteristics of hydraulic drive fluids.

Keywords: hydraulic drive, working fluid degradation, modeling of working processes, multiphysics models

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-17-24>

References

- Wang Y., Guo S., Dong H. Modeling and control of a novel electro-hydrostatic actuator with adaptive pump displacement. *Chinese journal of aeronautics*, 2020, vol. 33, iss. 1, pp. 365–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.020>.
- Guo S., Chen J., Lu Y., Wang Y., Dong H. Hydraulic piston pump in civil aircraft: Current status, future directions and critical technologies. *Chinese journal of aeronautics*, 2020, vol. 33, iss. 1, pp. 16–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.01.013>.
- Özdemir Ö., Rienäcker A., Fischer F., Murrenhoff H. Thermo-elastohydrodynamics of the piston-cylinder contact in high-pressure pumps. *MTZ worldwide*, 2018, vol. 79, iss. 3, pp. 60–63. DOI: <https://doi.org/10.1007/s38313-017-0173-z>.
- Manring N.D., Mehta V.S., Nelson B.E., Graf K.J., Kuehn J.L. Scaling the speed limitations for axial-piston swash-plate type hydrostatic machines. *Journal of dynamic systems, measurement and control*, 2014, vol. 136, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026129>.
- Manring N.D., Mehta V.S., Kuehn J.L., Nelson B.E. Sensitivity analysis for the operating efficiency of an axial piston pump. *Proc. ASME/BATH 2015 Symposium on fluid power and motion control “Fluid power systems technology”*. Chicago, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/FPMC2015-9524>.
- Alaev A.S., Trushin N.N. Avtomatizatsiya diagnostiki rabochey zhidkosti v gidrosistemakh metallorezhushchikh stankov [Automation of diagnostics of working fluid in hydrosystems of metal-cutting machine tools]. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2017, iss. 8, part 2, pp. 258–264 (in Russ.).
- Smirnov Yu.A., Volkov V.S. *Neispravnosti gidroprivodov stankov* [Malfunctions of hydraulic drives of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 184 p. (in Russ.).
- Alekseeva T.V., et al. *Tekhnicheskaya diagnostika gidravlicheskikh privodov* [Technical diagnostics of hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 264 p. (in Russ.).
- Rammohan A. Engine’s lubrication oil degradation reasons and detection methods: A review. *Journal of chemical and pharmaceutical sciences*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 3363–3366.
- Guidelines for diesel engines lubrication. Oil degradation*. 2004. Available at: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_22.pdf (accessed 1 December 2022).
- Johnson D.W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms. *Aerospace engineering*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82398>.
- Chmil V.P. *Gidropnevmoprivod* [Hydropneumatic drive]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet Publ., 2010. 176 p. (in Russ.).
- Schenk A., Ivantysynova M. Transient thermoelastohydrodynamic lubrication model for the slipper/swashplate in axial piston machines. *Journal of tribology*, 2015, vol. 137, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029674>.
- Rudenko M.G. *Kavitatsiya i fazovye prevrashcheniya v usloviyakh termodinamicheskoy neravnovesnosti zhidkosti*. Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk [Cavitation and phase transformations under conditions of thermodynamic nonequilibrium of a liquid. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Ulan-Ude, 2011. 36 p. (in Russ.).
- Vacca A., Klop R., Ivantysynova M. A numerical approach for the evaluation of the effects of air release and vapour cavitation on effective flow rate of axial piston machines. *International journal of fluid power*, 2010, vol. 11, iss. 1, pp. 33–45.
- Shest vidov zagryazneniya gidravlicheskikh zhidkostey* [Six types of contamination of hydraulic fluids]. Available at: <https://www.donaldson.com/en-us/engine/filters/technical-articles/six-types-hydraulic-fluid-contamination/> (accessed 1 December 2022) (in Russ.).
- Puzanov A.V. *Tribopary gidroprivodov* [Tribocouples of hydraulic drives]. Kovrov, Kovrovskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya im. V.A. Degtyareva Publ., 2022. 184 p. (in Russ.).
- Puzanov A.V. *Transdistsiplinarnye modeli gidroprivodov mobilnoy tekhniki* [Transdisciplinary models of hydraulic drives of mobile machinery]. Kovrov, Kovrovskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya im. V.A. Degtyareva Publ., 2018. 228 p. (in Russ.).
- Puzanov A.V. Gidromekhanicheskiy analiz khodovoy chasti aksialno-porshnevoy gidromashiny [Hydromechanical analysis of running gear in axial-piston hydromachine]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 4(52), pp. 161–169 (in Russ.).
- Puzanov A.V., Sukorkina O.O., Ershov E.A. Modelirovanie rabotosposobnosti nasosnogo oborudovaniya v arkticheskikh usloviyakh ekspluatatsii [Modeling the operability of pumping equipment in arctic operating conditions]. *Automation. Modern technologies*, 2020, vol. 74, no. 3, pp. 108–111. DOI: <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2020-74-3-108-111> (in Russ.).
- Wondergem A.M., Ivantysynova M. The impact of the surface shape of the piston on power losses. *Proc. 8th FPNI Ph.D Symposium on fluid power “Fluid power systems technology”*. Lappeenranta, 2014, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/FPNI2014-7843>.
- Gels S., Murrenhoff H. Simulation of the lubricating film between contoured piston and cylinder. *International journal of fluid power*, 2010, vol. 11, iss. 2, pp. 15–24.
- Bergada J.M., Kumar S., Davies D.L., Watton J. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples. *Applied mathematical modelling*, 2012, vol. 36, iss. 4, pp. 1731–1751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016>.
- Ouyang X., Fang X., Yang H. An investigation into the swash plate vibration and pressure pulsation of piston pumps based on full fluid-structure interactions. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2016, vol. 17, iss. 3, pp. 202–214. DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1500286>.
- Six reasons you should switch to smart technology*. Available at: <https://www.eaton.com/ZS/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/Resources/Articles/Six-reasons-you-should-switch-to-smart-technology/index.htm> (accessed 1 December 2022)
- Janković D., Šimić M., Heraković N. The concept of smart hydraulic press. *Proc. SOHOMA 2020 “Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future”*. Paris, 2021, vol. 952, pp. 409–420. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_29.