



Лунев Александр Сергеевич

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА
ПРИ НАЛИЧИИ НЕРАСТВОРЕННОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В РАБОЧЕЙ
ЖИДКОСТИ**

Специальность

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Никитин Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: **Павлов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Поволжский государственный
технологический университет», кафедра
«Транспортно-технологические машины»,
заведующий кафедрой

Носов Евгений Юрьевич
кандидат технических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Омский
государственный технический университет»,
кафедра «Гидромеханика и транспортные
машины», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ухтинский государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится «14» июня 2022 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.404.05, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26 ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <https://research.sfu-kras.ru/node/14788>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гидравлический привод в технических системах на сегодняшний день находит широкое применение благодаря его высокой удельной мощности и универсальности. Дальнейшее развитие систем гидравлического привода становится невозможным без его постоянного совершенствования на основе современных технических решений.

Контроль параметров гидравлического привода (номинальное давление, расход жидкости и т.д. в соответствии с ГОСТ Р 52543-2006), зависящих от качества рабочих жидкостей, является одним из путей совершенствования гидравлических систем. На сегодняшний день в научно-технической литературе рассматриваются два варианта повышения качества рабочих жидкостей:

- разработка новых жидкостей, позволяющих удовлетворить предъявляемые требования к гидросистеме;
- разработка присадок и методов обработки применяемых рабочих жидкостей, таких как дегазация.

Контроль параметров необходим для уменьшения вероятности возникновения в гидравлическом приводе мгновенного или быстропротекающего процесса, непредусмотренного алгоритмом его работы. К событиям такого рода можно отнести активное газовыделение в насосах, гидродвигателях, элементах направляющей и регулирующей гидроаппаратуры. Нерастворённый газ в рабочей жидкости отрицательно влияет на рабочие параметры гидравлического привода:

- плавность хода исполнительных механизмов;
- точность позиционирования рабочих органов;
- запас устойчивости систем управления;
- подачу и КПД насоса и т. д.

Наличие нерастворённой газовой фазы в рабочей жидкости ускоряет медленно протекающие процессы, такие как «старение» масла, интенсивный износ пар трения, снижает срок службы рабочей жидкости и ресурс гидропривода в целом.

Таким образом контроль параметров гидравлического привода при наличии нерастворённой газовой фазы в рабочей жидкости представляет научный и практический интерес и, следовательно, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в изучение особенности контроля параметров гидропривода внесли Д.Н. Попов, Н.С. Гамынин, Н.Ф. Метлюк, Б.Л. Коробочкин, Т.М. Башта, А.А. Никитин и другие. Значительная часть этих работ посвящена теоретическим исследованиям в области контроля параметров, динамических, волновых и переходных процессов в гидроприводе. Дальнейшее развитие методов контроля параметров гидравлического привода требует исследования особенностей влияния ранее не учитываемых факторов, таких как

нерастворённый газ, с разработкой экспериментальных методов и способов интерпретации их результатов.

Объект исследования – гидравлический привод и его параметры.

Предмет исследования – контроль параметров гидравлического привода при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости.

Соответствие специальности. Работа выполнена в соответствии с пунктами направления исследований 1, 4 и 6 паспорта специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Цель и задачи. *Цель* диссертационной работы заключается в обеспечении работоспособности гидравлического привода путём контроля его параметров при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие *задачи*:

1. Создать метод и алгоритм контроля параметров гидропривода, позволяющие определить область допустимой концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости.

2. Разработать математическую модель расчёта параметров гидравлического привода при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости.

3. Разработать конструкцию установки для проведения экспериментальных исследований влияния нерастворенного газа в рабочей жидкости на параметры гидравлического привода.

4. Предложить и обосновать методику технического контроля и диагностирования гидравлического оборудования с применением предложенной установки.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Создан *новый* метод контроля параметров гидропривода, позволяющий определить область допустимой концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости.

2. Разработана *новая* математическая модель для расчёта параметров гидравлического привода при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости, учитывающая нелинейную зависимость модуля объёмной упругости жидкости от изменения давления в гидросистеме.

3. Предложена *новая* методика технического контроля и диагностирования параметров гидравлического оборудования с применением сконструированной и установки, защищённой патентом на изобретение № 196575.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенный метод контроля может быть использован при проектировании гидравлических систем в качестве получения эталонных статических и динамических характеристик при проведении приемно-сдаточных испытаний гидравлического привода, а также при глубокой модернизации гидравлического привода самоходных машин, станочного гидропривода и т. д.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации машин и агрегатов, что позволит обеспечивать стабильные характеристики и повысить эффективность работы гидропривода, а параметры, зависящие от газосодержания в рабочей жидкости, перевести в разряд управляемых факторов.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались основные положения гидравлики, теплофизики, механики жидкости и газа, применялись стандартные и специально разработанные средства контроля и испытания для обработки данных использовались программное средство Mathcad, программное обеспечение CMWIN.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный в работе метод контроля параметров гидравлического привода в *отличие* от существующих позволяет определить с точностью до 3 % допустимую концентрацию нерастворенного газа в рабочей жидкости.

2. Разработанная математическая модель расчёта параметров гидравлического привода учитывает нелинейную зависимость модуля объёмной упругости жидкости при давлении жидкости до 15 МПа и, тем самым, позволяет обосновать взаимосвязь параметров гидравлического привода и метода их контроля.

3. Методика контроля и диагностирования с применением установки авторской конструкции позволяет определять влияние нерастворенного газа на параметры элементов в гидравлической системе.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты работы подтверждаются экспериментально и теоретически, научные положения аргументированы, выводы подтверждены экспериментальными исследованиями, сопоставимы с результатами других авторов, математическая обработка результатов проводилась с использованием сертифицированных приборов и программ.

Основные научные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на научных семинарах кафедры «Технологические машины и оборудование» ПИ СФУ, научных семинарах кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» ИНИГ СФУ; Международной конференции «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг», Красноярск, 2019 г.; II Международной конференции «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» 2019 г., г. Красноярск; Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» Санкт-Петербург, 2020 г.; Международной конференции «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг», Красноярск, 2021 г. Метод контроля был опробован и внедрён на предприятиях, что подтверждено актами внедрения:

- Северная геологоразведочная экспедиция – филиал ОАО «Красноярскгеология»;

- ООО «Сибирский завод экологической техники».

Также результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научных работы, включая 3 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 15 работ в МБД Scopus/Web of Science, получено 4 патента.

Личный вклад автора. Автором разработан новый универсальный метод контроля параметров гидравлического привода при наличии нерастворённой газовой фазы в рабочей жидкости. Предложен метод математического моделирования для оценки влияния нерастворенного газа в рабочей жидкости на параметры гидропривода. Разработаны рекомендации по определению области допустимой концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости. Для подтверждения результатов исследований разработана и сконструирована установка, предложена методика проведения эксперимента.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 154 страницы машинописного текста, 28 рисунков, 15 таблиц. Состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка использованных источников, приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, степень разработанности темы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена рассмотрению вопросов использования гидравлических систем: рассмотрены физические свойства рабочих жидкостей и их влияние на эксплуатационные характеристики; указана актуальность применения гидравлического привода и условия его эксплуатации; проведён анализ влияния нерастворенного газа на эксплуатационные свойства рабочих жидкостей; проведён анализ существующих методов контроля газосодержания в жидкостях; определены пути стабилизации эксплуатационных свойств рабочих жидкостей, зависящих от содержания нерастворенного газа.

Вторая глава посвящена разработке метода и алгоритма контроля параметров гидравлического привода, для этого проведены: исследование влияния нерастворенного газа на сжимаемость рабочей жидкости; анализ изменения газовой фазы в рабочей жидкости, в различных элементах гидравлической системы; разработка алгоритма контроля параметров гидравлического привода с учётом наличия нерастворенного газа в рабочей жидкости.

В расчётах при изменении давления от p_0 до p зависимость модуля объёмной упругости жидкости от давления обычно принимают линейной, Па:

$$B_{ж} = B_{ж,0} + \Delta p, \quad (1)$$

где $B_{ж.0}$ – модуль объёмной упругости жидкости при атмосферном давлении p_0 , Па; A – коэффициент, зависящий от типа жидкости и температуры.

Для более точного описания изменения модуля объёмной упругости, Коробочкиным Б.Л. была предложена формула (2):

$$B_{ж} = \frac{(1-\alpha_{г})^A \sqrt{(B_{ж.0} + Ap_0)/(B_{ж.0} + Ap)} + \alpha_{г} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{n}}}{\frac{1-\alpha_{г}}{B_{ж.0} + Ap} \sqrt{(B_{ж.0} + Ap_0)/(B_{ж.0} + Ap)} + \frac{\alpha_{г}}{np} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

где $\alpha_{г}$ – объёмное содержание газа при атмосферном давлении.

С использованием формулы (2) получена зависимость модуля объёмной упругости смеси от давления при различных значениях газосодержания (рисунок 1).

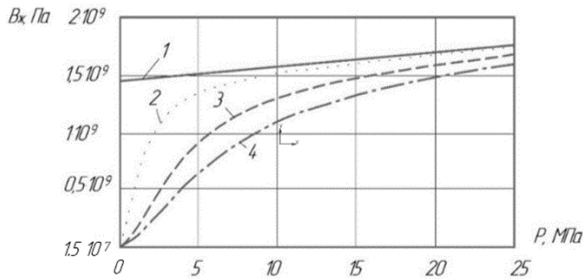
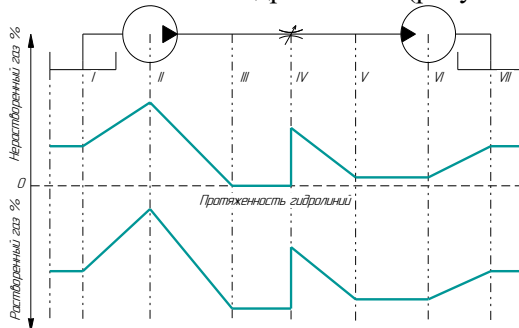


Рисунок 1 – Зависимость модуля объёмной упругости смеси от давления, при различных значениях газосодержания: кривая 1 получена при количестве газа 0 %; кривая 2 – количество газа 1 %; кривая 3 – количество газа 5 %; кривая 4 – количество газа 10 %

Можно сделать вывод, что зависимость модуля объёмной упругости смеси от давления нелинейна, причём чем больше содержания газа, тем большее расхождение полученных данных с эмпирической формулой (1), особенно при давлениях до 15 МПа.

Фазовые переходы растворенного и нерастворенного газа осуществляются постоянно по всей гидросистеме (рисунок 2).



I, VII – гидробак, II – гидронасос, III, V – линии нагнетания, IV – регулируемый дроссель, VI – гидромотор

Рисунок 2 – Фазовый переход растворенного и нерастворенного газа в элементах гидравлической системы

Газовая фаза переходит из одного состояния в другое в зависимости от прохождения жидкостью различных элементов гидравлического оборудования. Таким образом, за цикл прохождения гидравлической жидкости по гидросистеме, рабочая жидкость находится в постоянном фазовом переходе.

Метод контроля параметров гидравлического привода относится к неразрушающему методу контроля и является универсальным методом. Алгоритм контроля параметров гидравлического привода представлен на рисунке 3. Метод может быть использован в любой отрасли машиностроения (самоходные машины, станкостроение, авиационная техника и т. д.).

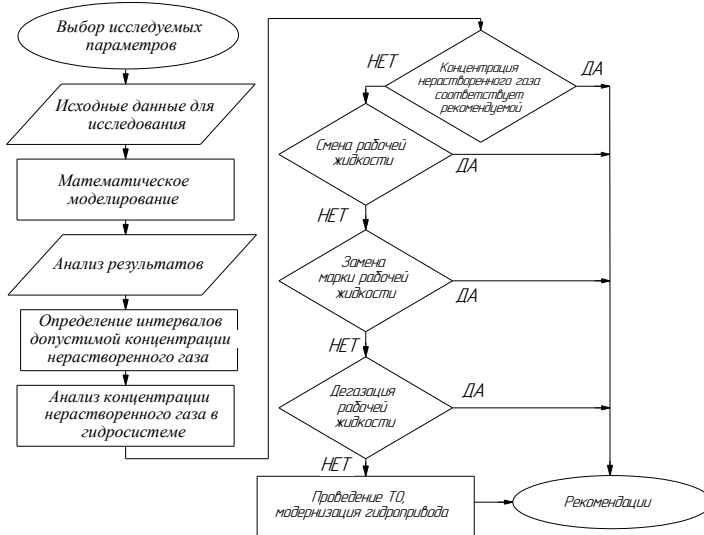


Рисунок 3 – Алгоритм контроля параметров гидравлического привода при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости

Существенное отличие метода заключается в его простоте и точности исследуемых процессов. Метод предусматривает следующие этапы:

1. На первом этапе формулируется цель и принимается решение о контроле конкретных параметров, выбираются элементы гидрооборудования параметры которых необходимо исследовать.

2. На втором этапе происходит математическое моделирование происходящих процессов с учётом особенностей использования гидравлической системы.

3. На третьем этапе происходит определение допустимой концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости исходя из условий работы гидравлического привода и степени его ответственности.

4. На четвёртом этапе необходимо проверить концентрацию нерастворенного газа в рабочей жидкости исследуемого гидропривода. Результаты четвёртого этапа необходимо сравнить с результатами, полученными при математическом моделировании и сделать выводы.

5. На пятом этапе необходимо выбрать дальнейшее действие, а именно:

- концентрация нерастворенного газа находится в допустимых пределах и никаких действий не требуется;
- необходимо провести дегазацию рабочей жидкости;
- необходимо заменить или сменить рабочую жидкость;
- необходимо провести техническое обслуживание или модернизацию гидравлического привода.

Третья глава посвящена разработке математической модели гидравлического привода ротора на примере агрегата для освоения и ремонта скважин УПА 60/80. При составлении математической модели гидропривода примем следующие допущения:

- угловая скорость вращения вала насоса постоянна, это можно допустить, если приводной двигатель имеет регулятор оборотов и обеспечивает постоянную частоту вращения выходного вала;
- длина гидравлических магистралей небольшая, поэтому влиянием волновых процессов на динамику гидропривода можно пренебречь;
- длина всасывающих гидравлических магистралей (от бака до насосов) небольшая, их гидравлическим сопротивлением можем пренебречь.

Математическая модель (расчёт параметров с использованием математической модели представлен в диссертационной работе, в приложении А) исследуемого элемента гидропривода в форме Коши имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \phi = \omega, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \phi = \frac{1}{J_{pr.m}} \cdot (M_m - M_c), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} p_1 = \frac{B(p_1, \alpha)}{V_1} \cdot \left(Q_1(t, p_1) - \frac{V_m}{2 \cdot \pi} \cdot \omega \right), \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} p_2 = \frac{B(p_2, \alpha)}{V_2} \cdot \left(\frac{V_m}{2 \cdot \pi} \cdot \omega - Q_2(t, p_2) \right). \quad (6)$$

где $B(p, \alpha)$ – модуль упругости рабочей жидкости, зависящий от давления p и относительного объёма нерастворенного газа α , Па (7):

$$B(p, \alpha) = \frac{(1 - \alpha) \cdot \left(\frac{B_{f.o} + A \cdot p_a}{B_{f.o} + A \cdot p} \right)^{\frac{1}{A}} + \alpha \cdot \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{1}{k}}}{\frac{1 - \alpha}{B_{f.o} + A \cdot p} \cdot \left(\frac{B_{f.o} + A \cdot p_a}{B_{f.o} + A \cdot p} \right)^{\frac{1}{A}} + \frac{\alpha}{k \cdot p} \cdot \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{1}{k}}}. \quad (7)$$

$J_{pr.m}$ – приведённый суммарный момент инерции гидроротора, к валу гидромотора, кг·м²; M_m – момент, развиваемый гидромотором при перепаде давления, Н·м;

$$M_m = \frac{V_m \cdot (p_1 - p_2) \cdot \eta_{mex.m}}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

M_c – момент сопротивления от времени, приведённого к валу гидромотора, Н·м (9):

$$M_c(t) = M_{m0} \cdot (\cos(0,1 \cdot t + \pi) + 1) \cdot (t_0 \leq t) \quad (9)$$

p_1 – давление на входе в гидромотор, Па; p_2 – давление на выходе из гидромотора, Па; Q_1 – расход в напорном трубопроводе, м³/с (10):

$$Q_1(t, p_1) = k_1(t, p_1) \cdot x(t) \cdot \sqrt{|p_{k0} - p_1|} \cdot \text{sign}(p_{k0} - p_1) \quad (10)$$

Q_2 – расход в сливном трубопроводе, м³/с (11):

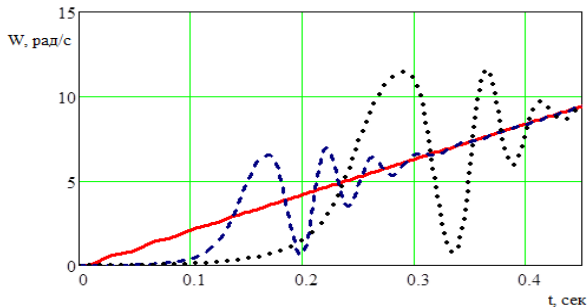
$$Q_2(t, p_2) = k_2(t, p_2) \cdot x(t) \cdot \sqrt{|p_2 - p_a|} \cdot \text{sign}(p_2 - p_a) \quad (11)$$

φ – угол поворота вала гидромотора, рад; ω – угловая скорость вала гидромотора, рад/с.

Для решения системы уравнений заданы начальные условия:

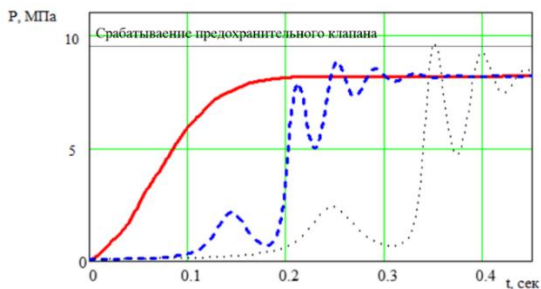
$\varphi(t_0) = \varphi_0 = 0$; $\omega(t_0) = \omega_0 = 0$; $p_1(t_0) = p_{10} = p_k = 16 \cdot 10^6$ Па;
 $p_2(t_0) = p_{20} = p_{сл} = 10^5$ Па.

На рисунках 4, 5 и 6 приведены результаты расчёта с использованием математической модели гидромотора установки для освоения и ремонта скважин УПА-60/80, при изменении нагрузки от минимального значения до максимального значения. Показан начальный период изменения рабочих параметров (давление на входе и выходе, угловая скорость вала гидромотора) в гидроприводе, при котором происходят колебания параметров с максимальной амплитудой. Наибольшее влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости проявляется в начальный период вращения вала гидромотора. Анализ результатов расчётов с применением математической модели показывают, что увеличение концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости оказывает влияние на характер изменения параметров гидропривода. При увеличении содержания нерастворенного газа от 0 до 9 % уменьшается частота колебаний угловой скорости вала гидромотора и увеличивается время переходного процесса (рисунок 4), аналогично ведут себя давление на входе в гидромотор (рисунок 5) и давление на выходе из гидромотора (рисунок 6).



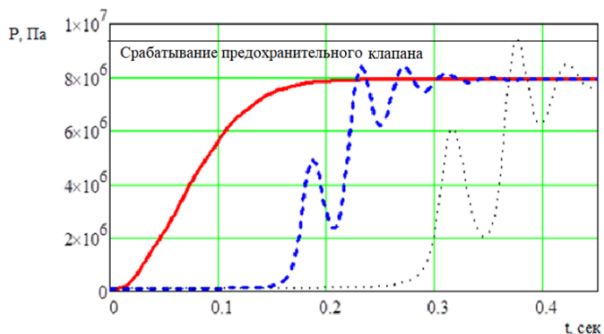
Концентрация нерастворенного газа: — 0 %; ---- 3 %; ···· 9 %

Рисунок 4 – Изменение угловой скорости вала гидромотора в зависимости от времени и концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости



Концентрация нерастворенного газа: — 0 %; --- 3 %; ···· 9 %

Рисунок 5 – Изменение давления на входе в гидромотор в зависимости от времени и концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости



Концентрация нерастворенного газа: — 0 %; --- 3 %; ···· 9 %

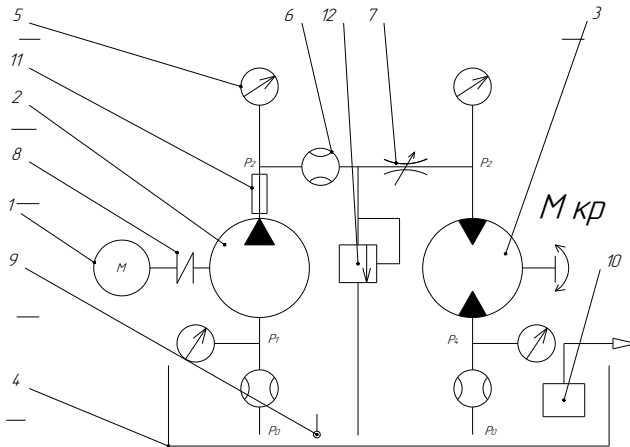
Рисунок 6 – Изменение давления на выходе из гидромотора в зависимости от времени и концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости

При концентрации нерастворенного газа более 9 % колебания давления на входе и выходе из мотора превышают допустимые значения настройки гидравлической системы, это позволяет сделать вывод, что концентрация нерастворенного газа в 9 % является критической.

Предложенная модель позволяет на стадии проектирования, технического обслуживания и модернизации гидравлических систем исследовать изменения параметров гидропривода, а также выбрать оптимальные значения, количества нерастворенного газа, определяющего характер изменения динамических процессов в гидравлическом приводе.

В четвертой главе предложена методика технического контроля и диагностирования параметров гидравлического привода, спроектирована и представлена установка диагностирования (на основании патента №196575) для определения влияния нерастворенного газа в рабочей жидкости на параметры гидропривода и её математическая модель.

Представленная установка (гидравлическая схема рисунок 7) для проведения испытаний, позволяет определить влияние нерастворенного газа на параметры гидропривода при разных режимах работы и давлениях.



- 1 – двигатель; 2 – насос; 3 – мотор; 4 – бак; 5 – датчики давления; 6 – расходомер;
 7 – регулируемый дроссель; 8 – муфта; 9 – термометр; 10 – устройство дегазации;
 11 – демпфер; 12 – переливной клапан

Рисунок 7 – Гидравлическая схема установки

Установка работает следующим образом. Электродвигатель 1 (АИР100S4), через муфту 8 вращает вал насоса 2 (310.56.03.06). Жидкость из бака (250 литров) 4 поступает во всасывающую линию насоса 2, далее по нагнетательной линии поступает в регулируемый дроссель 7 (патент № 73714), из дросселя 7 рабочая жидкость поступает в гидромотор 3 (210.12.00.00), из мотора 3 по сливной гидролинии рабочая жидкость сливается в бак 4. Для дегазации жидкости было использовано авторское устройство 10 (патент № 67203). На линиях всасывания, нагнетания и слива, установлены датчики давления и расходомеры, в баке установлен термометр. Для сглаживания пульсаций давления установлен демпфер (патент № 67675), а для предохранения системы от перегрузок установлен клапан 12. Рабочая жидкость МГ15В, температура жидкости 70 °С.

Организация контроля параметров гидравлического привода подразумевает:

- определение целей и исследуемых параметров оборудования;
- монтаж и демонтаж исследуемого оборудования;
- монтаж и демонтаж применяемых датчиков контроля параметров;
- отбор проб рабочей жидкости;
- определение концентрации нерастворенного газа в рабочей жидкости;
- определение основных параметров гидравлического привода (номинальное давление, расход жидкости и т. д.);
- занесение полученных результатов в таблицу отчёта;
- определение дальнейших мероприятий.

На рисунке 8 представлена общая структурная схема методики технического контроля и диагностирования гидравлического оборудования.

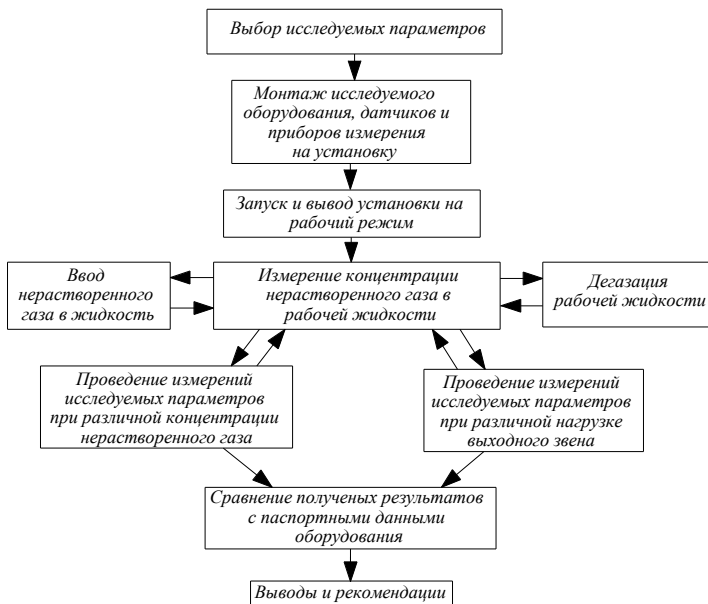


Рисунок 8 – Общая структурная схема методики технического контроля и диагностирования параметров гидравлического оборудования

Измерения величин (давление, температура, расход) проводились с использованием электрических приборов фиксации. Для контроля скорости течения жидкости, давления и температуры использовалось портативное измерительное устройство, применяемое для выполнения измерений в гидравлических и пневматических системах для мобильного и промышленного применения – НМГ 3000.

Применяемые датчики давления, температуры и объёмного расхода, имеют следующие технические характеристики, представленные в таблице 1. Устройство НМГ 3000 распознает эти датчики автоматически и самостоятельно выполняет все необходимые настройки устройства.

Таблица 1 – Технические характеристики применяемых датчиков

Регистратор НМГ 3000		
Датчик давления	Датчик температуры	Преобразователь расхода (расходомер)
Диапазон измерений от 0 до 25 МПа	Диапазон измерений от -25 до +100 С	Диапазон измерений от 15 до 300 л/мин
Модель НДА 4748-Н-0250-000	Модель ЕТС 4548-Н-000	Модель EVS 3108-Н-0300-000
Отн. погреш. $\leq \pm 0,15\%$	Отн. погреш. $\leq \pm 1,5\%$	Отн. погреш. $\leq \pm 0,2\%$

Измеряемые значения и соответствующая единица измерения отображаются на ЖК-индикаторе в удобном формате. Кроме того, устройство НМГ 3000 даёт возможность передавать накопленные значения

вышеупомянутых датчиков в ПК. При помощи компьютерного программного обеспечения CMWIN компании HYDAC сохранённые измеренные значения датчиков можно отображать на экране ПК в форме кривой или таблицы, анализировать, обрабатывать, обобщать и архивировать. Необходимая для этого передача данных осуществляется посредством стандартного интерфейса USB, встроенного в устройство HMG. Для расширения сферы применения у устройства HMG 3000 имеется функция точной настройки механических манометрических выключателей и температурных реле.

Образец жидкости отбирался из бака и проводился анализ количества нерастворенного газа при атмосферном давлении, путём заполнения мерной ёмкости, отстаивания и измерения полученного объёма жидкости. Для определения газосодержания в рабочей жидкости применялся прибор ИРКУТ (основные характеристики таблица 2). Прибор имеет цифровую индикацию показаний газосодержания в рабочей жидкости и применяется для измерения объёмной доли газов.

Таблица 2 – Основные характеристики прибора ИРКУТ

Отн., абсол. погрешность	в диапазоне измерений 0,1...1,0	±0,1 % объёмных
	в диапазоне измерений 1...12 %	0,5 % объёмных
Время проведения анализа с момента ввода пробы	4 мин	
Объём пробы	2 ±0,05 мл	

На момент проведения эксперимента приборы имели поверку в соответствии с ГОСТ Р 8.973-2019.

Система уравнений (12) – (20) представляет математическую модель гидропривода стенда. Для расчёта на ЭВМ математическую модель удобнее привести к форме Коши:

$$\frac{d\omega_H}{dt} = \frac{1}{J_{\text{пр.н}}} \left(M_{\text{д.макс}} - K_{\text{д}}\omega_H - \frac{V_H(p_2 - p_1)}{2\pi\eta_{\text{г.н}}} \right), \quad (12)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{B_{\text{см2}}}{0,5 \cdot (V_H + V_2)} \left[V_H\omega_H/2\pi - S_2v_2 - Q_H(1 - \eta_{\text{о.н}}) \frac{p_2}{p_{\text{ном.н}}} - Q_K \right]; \quad (13)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{B_{\text{см1}}}{(V_1 + 0,5 \cdot V_H)} [S_1v_1 - V_H\omega_H/2\pi]; \quad (14)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{\rho l_2} [p_2 - p_3 + \rho g(z_2 - z_3) - p_{\text{с2}}], \quad (15)$$

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{\rho l_1} \left(p_0 - p_1 - p_{\text{с1}} - \rho g z_1 - \frac{\rho v_1^2}{2} \right), \quad (16)$$

$$\frac{d\omega_M}{dt} = \frac{1}{J_{\text{пр.м}}} \left[\frac{V_M(p_3 - p_4)\eta_{\text{г.м}}}{2\pi} - M_{\text{с}} \right], \quad (17)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{B_{\text{см3}}}{0,5 \cdot (V_2 + V_M)} \left(S_2v_2 - V_M\omega_M/2\pi - Q_M \left(\frac{1 - \eta_{\text{о.м}}}{\eta_{\text{о.м}}} \right) \frac{p_3}{p_{\text{ном.м}}} \right); \quad (18)$$

$$\frac{dp_4}{dt} = \frac{B_{\text{см4}}}{(0,5 \cdot V_M + V_3)} (V_M\omega_M/2\pi - S_3v_3), \quad (19)$$

$$\frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{\rho l_3} \left(\rho g z_4 + \frac{\rho v_3^2}{2} + p_4 - p_0 - p_{\text{с3}} \right), \quad (20)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; $J_{\text{пр.м}}$ – суммарный момент инерции, приведённый к валу гидромотора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $\eta_{\text{г.н}}$ – гидромеханический КПД насоса; V_1 , V_2 и V_3 – объёмы соответственно всасывающего, напорного и сливного трубопровода, м^3 ; $V_{\text{н}}$ и $V_{\text{м}}$ – рабочие объёмы соответственно насоса и гидромотора, м^3 ; $B_{\text{см1}}$ – модуль объёмной упругости смеси жидкости и воздуха, поступающей в насос из всасывающего трубопровода, Па; $B_{\text{см2}}$ – модуль объёмной упругости смеси жидкости и воздуха, поступающей в напорный трубопровод из насоса, Па; $B_{\text{см3}}$ – модуль объёмной упругости смеси жидкости и воздуха, поступающей в гидромотор из напорного трубопровода, Па; $B_{\text{см4}}$ – модуль объёмной упругости смеси жидкости и воздуха, поступающей в сливной трубопровод из гидромотора, Па; S_1 , S_2 и S_3 – площади поперечного сечения соответственно всасывающего, напорного и сливного трубопровода, м^2 ; v_1 , v_2 и v_3 – средние скорости жидкости соответственно во всасывающем, напорном и сливном трубопроводе, м/с ; $Q_{\text{н}}$ – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{м}}$ – расход жидкости через гидромотор, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{к}}$ – расход жидкости через предохранительный клапан, $\text{м}^3/\text{с}$; p_1 и p_2 – давление на входе в насос и выходе из насоса, Па; p_3 и p_4 – давление на входе в гидромотор и выходе из гидромотора, Па.

Для решения системы уравнений заданы начальные условия:

$\omega_{\text{н}}(t_0) = \omega_{\text{н0}} = 158 \text{ рад/с}$; $p_2(t_0) = p_{20} = 16 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $p_1(t_0) = p_{10} = 9 \cdot 10^4 \text{ Па}$; $v_1(t_0) = v_{10} = 3,7 \text{ м/с}$; $v_2(t_0) = v_{20} = 3,5 \text{ м/с}$; $p_3(t_0) = p_{30} = 16 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $p_4(t_0) = p_{40} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $v_3(t_0) = v_{30} = 3,2 \text{ м/с}$.

Результаты экспериментальных (рисунок 9 и 11) и теоретических (рисунок 10 и 12) исследований позволяют сделать вывод, что в момент включения дросселя происходят колебания скорости жидкости (рисунок 9 и 10) и колебания давления (рисунок 11 и 12) в гидросистеме, которые приводят к повышению динамических нагрузок на элементах гидравлического привода.

Установлено, что производить расчёты динамических процессов без учёта сжимаемости жидкости нельзя даже в приближении. Выделение газа и его растворение происходят, при разных скоростях.

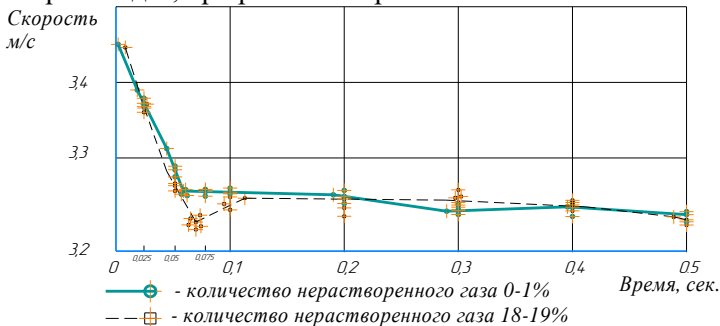


Рисунок 9 – Зависимость изменения скорости течения жидкости в напорной магистрали, при различной концентрации нерастворенного газа, по результатам проведённого эксперимента

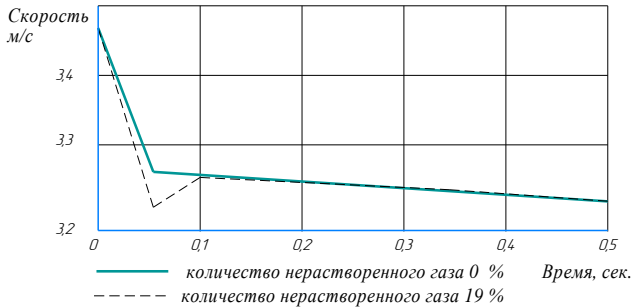


Рисунок 10 – Зависимость изменения скорости течения жидкости в напорной магистрали, при различной концентрации нерастворенного газа, по результатам математического моделирования

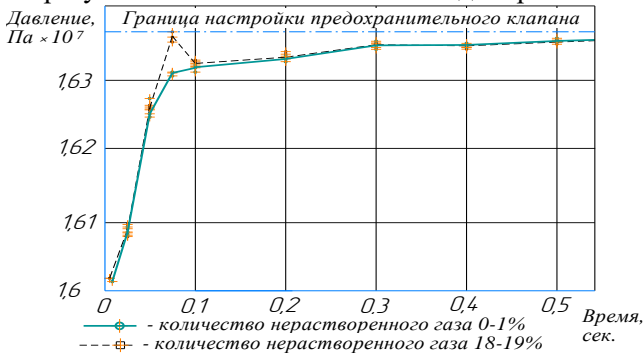


Рисунок 11 – Зависимость изменения давления насоса, при различной концентрации нерастворенного газа, по результатам проведённого эксперимента

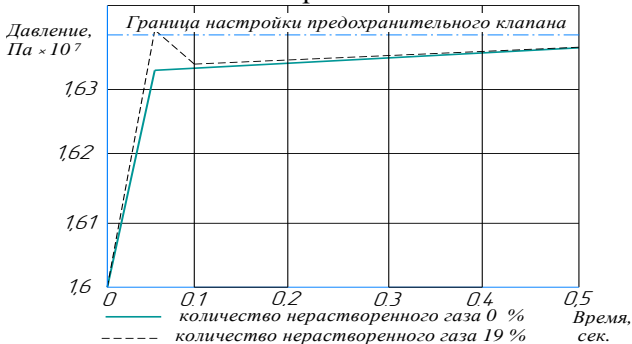


Рисунок 12 – Зависимость изменения давления насоса, при различной концентрации нерастворенного газа, по результатам математического моделирования

Результаты экспериментов, проведённые на установке, доказывают адекватность математической модели и позволяют установить влияние нерастворенного газа в гидравлической жидкости на параметры гидравлического привода при разных режимах работы.

Таким образом, на основе проведённых исследований появилась возможность дать практические рекомендации по диапазону содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости и рекомендации по снижению динамических нагрузок на элементы гидросистемы в целом.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в создании метода контроля параметров гидравлического привода при наличии нерастворенного газа в рабочей жидкости, применение которого обеспечит работоспособность и безопасность эксплуатации гидропривода.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработанный метод контроля параметров гидравлического привода при наличии нерастворённой газовой фазы в рабочей жидкости позволяет оценить эффективность работы гидравлического привода и обеспечить работоспособность гидравлической системы.

2. Метод математического моделирования позволяет выявить интервал значений нерастворённой газовой фазы, при котором эффективность работы гидравлического привода будет эффективна для гидросистем различного типа. Анализ результатов исследований математической модели показал, что нерастворённый газ в рабочей жидкости влияет на параметры гидравлического привода и стабильность работы при давлениях до 15 МПа.

3. Рабочая жидкость, содержащая растворенный и нерастворённый газ, имеет нестабильные эксплуатационные свойства, что приводит к снижению долговечности оборудования.

4. Предложенная методика позволяет выявить влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на параметры гидропривода при разных режимах работы гидравлического привода, при разных температурных режимах, а также при разных давлениях. Полученные теоретические результаты и научные исследования подтверждены экспериментально. Результаты экспериментов показали, что:

- расхождение результатов расчётов математической модели и экспериментов составляет не более 3 %;

- наиболее перспективным и действенным способом удаления газовой фазы из рабочей жидкости является вакуумная дегазация;

- время выделения газа из жидкости во много раз превышает время его растворения;

- при повышении температуры рабочей жидкости переход нерастворённой газовой фазы в растворенную значительно снижается;

- необходимо исключить возможность поступления извне газа в гидросистему и обеспечить удаление из жидкости растворенного газа.

5. Разработаны практические рекомендации по диапазону содержания

нерастворенного газа в рабочих жидкостях гидравлического привода. Допустимая концентрация нерастворенного газа в гидробаке, в среднем:

- для станочных гидроприводов до 5 %;
- для самоходных машин до 8 %;
- для летательных аппаратов до 3 %.

Таким образом, использование результатов работы позволит обеспечить работоспособность и безопасность эксплуатации гидропривода.

Перспективой дальнейшего исследования является создание систематизированного и универсального метода контроля газовой фазы, учитывающего газовый переход растворенного газа в нерастворенный в любой точке гидравлической системы. Исследования в этом направлении могут быть продолжены и расширены в ходе анализа работы гидравлического привода совместно с механическим, электрическим и пневматическим.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях входящих в перечень ВАК РФ

1. **Лунев, А.С.** Влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамику гидропривода установки для освоения нефтяных и газовых скважин / А.С. Лунев, А.А. Никитин, В.Г. Шрам, В.И. Афанасов, Ю.Ф. Кайзер, А.В. Лысянников // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 12. – С. 13–14.

2. **Лунев, А. С.** Метод контроля влияния нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамические процессы гидравлического привода. Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 2. – С. 101–106.

3. **Лунев, А.С.** Анализ методов определения модуля объёмной упругости жидкости и его зависимость от давления и газосодержания / А. С. Лунев, А. А. Никитин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 3. – С. 58–61.

Публикации в изданиях SCOPUS и WEB of SCIENCE

4. **Lunev, A.S.** Influence of undissolved gas in working fluid on dynamics of hydraulic drive of equipment for oil and gas well development / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, V.G. Shram, V.I. Afanasov, Yu.F. Kaizer, and A.V. Lysyannikov // Chemical and Petroleum Engineering. Springer New York Consultants Bureau, USA. Published 2020.

5. **Lunev, A.S.** Comparative analysis of the dependence of the bulk elastic modulus of the liquid on pressure and gas factor / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, Y.F. Kaizer, A.V. Lysyannikov, D.A. Sokolov, V.Y. Obvintseva // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1399, 2019.

6. **Lunev, A.S.** Impact of undissolved gas on dynamic processes in the fluid drive for well testing and servicing research. / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, V.I. Afanasov, Y.F. Kaizer, A.V. Lysyannikov, S.P. Dunaeva // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1399, 2019.

7. **Lunev, A.S.** A technique for monitoring content of undissolved gas in a hydraulic drive of a self-propelled vehicle / A.S. Lunev, V.I. Afanasov, A.A. Nikitin,

D.A. Sokolov, V.A. Ionova, V.Y. Obvintseva // Materials Science and Engineering (MSE), 2019.

8. **Lunev, A.S.** Impact of undissolved gas on the performance characteristics of hydraulic fluids and characteristic of hydraulic system / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, V.A. Ionova, A.V. Novik, V.A. Kramarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 4, 2020.

9. **Lunev, A.S.** Apparatus for controlling the amount of undissolved gas in the hydraulic fluid / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, V.A. Ionova, A.V. Novik, V.A. Kramarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, 2020.

10. **Lunev, A.S.** Method for reducing the gas factor in hydraulic fluids / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, A.S. Kaverzina, A.V. Novik, V.A. Kramarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 4, 2020.

11. **Lunev, A.S.** The impact of viscosity and propagation velocity of the flow on the initiation of the cavitation in a gear pump / A.S. Lunev, A.S. Kaverzina, A.A. Nikitin, A.V. Novik, V.A. Kramarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 4, 2020.

12. **Lunev, A.S.** Ultrasonic method and other methods of control of undissolved gas in the working fluid / A.S. Lunev, A.A. Nikitin, V.I. Afanasov, A.V. Novik, V.A. Kramarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 5, 2020.

13. **Lunev, A.S.** Mathematical characterization of fluid compressibility impact on fluid drive's output parameters / A.S. Lunev, D.A. Sokolov, M.V. Litvinchuk, S.P. Dunaeva, I.V. Andreychikov // Materials Science and Engineering, February 2021.

14. Wear resistance increase of sealings of mud end of pump / Karnaukhov, I.V., **Lunev, A.S.**, Pankiv, M.D., Afanasov, V.I., Dunaeva, S.P // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094(5), 052038.

15. **Lunev, A.S.** Ways to ensure the efficiency and improvement the efficiency of hydraulic machines / Lunev, A.S., Kaverzina, A.S., Karnaukhov, I.V., Pankiv, M.D., Andreychikov, I.V // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094(4), 042090.

16. Influence of temperature fluctuation on friction inside hydraulic cylinder / Dunaeva, S.P., Pankiv, M.D., **Lunev, A.S.**, Karnaukhov, I.V., Afanasov, V.I // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094(4), 042085.

17. Performance improvement methods of hydroficated machine under refrigeration / Kaverzina, A.S., **Lunev, A.S.**, Karnaukhov, I.V., Pankiv, M.D., Andreychikov, I.V. // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094(4), 042087.

18. Design of pneumatic cylinder with fixation of rod for industrial equipment drives / Abramov, V.V., Shram, V.G., Sokolnikov, A.N., Afanasov, V.I., **Lunev, A.S.** // Chemical and Petroleum Engineering, 2021, 57(3-4), стр. 288–291.

Патенты

19. Патент № 196575 РФ, МПК G01N 7/00. Стенд для измерения объема нерастворенного газа в рабочих жидкостях гидросистем / **А.С. Лунев**, М.В.

Заковряжин, И.В. Андрейчиков, С.П. Дунаева, В.И. Афанасов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». 2020.

20. Патент № 67203 РФ на полезную модель МПК F15B21/06. Блок питания гидропривода / А.А. Михайлов, **А.С. Лунев**, И.И. Пилюгаев; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». 2007.

21. Патент № 73714 РФ на полезную модель МПК F16K 47/08. Регулируемый дроссель / **А.С. Лунев**, А.А. Никитин; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». 2008.

22. Патент № 67675 РФ на полезную модель МПК F16L 55/05. Демпфер гидравлического удара / **А.С. Лунев**, А.А. Никитин, А.А. Михайлов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». 2007.