



ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, ВАКУУМНАЯ, КОМПРЕССОРНАЯ ТЕХНИКА, ГИДРО- И ПНЕВМОСИСТЕМЫ/HYDRAULIC MACHINES, VACUUM, COMPRESSOR TECHNOLOGY, HYDRAULIC AND PNEUMATIC SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2026.12.2> EDN: ТОНЗХМ

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОСИСТЕМЕ НА ВИБРОАКУСТИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ ОПЕРАТОРА И ДОЛГОВРЕМЕННУЮ НАДЕЖНОСТЬ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Научная статья

Рудиков Д.А.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-2612-7486;

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (d-studio[at]mail.ru)

Предложена: 23.06.2026; Принята: 29.09.2026; Опубликовано: 30.09.2026

Аннотация

Пульсирующий характер подачи насосных агрегатов остается одним из наименее контролируемых источников вибрационной и акустической нагрузки в гидроприводах мобильных и стационарных машин. В статье рассматривается взаимосвязь между неравномерностью расхода рабочей жидкости, вибрационной нагрузкой на оператора и деградацией эластомерных уплотнительных узлов насосов, гидроцилиндров и распределительной арматуры. Анализируются частотные диапазоны пульсаций, характерные для шестеренных и аксиально-плунжерных насосов, механизмы передачи колебательной энергии через трубопроводы и элементы кабины, а также кинетика износа манжетных и торцовых уплотнений при циклическом нагружении. Обосновывается необходимость комплексного нормирования виброакустических характеристик гидросистем с учетом требований охраны труда и ресурса уплотнительных узлов. Научная новизна работы заключается в систематизации взаимосвязи между пульсациями расхода и давления рабочей жидкости, виброакустическим воздействием на оператора и динамической нагруженностью уплотнительных узлов. Предложен комплексный подход к рассмотрению указанных последствий на основе единой причинно-следственной цепочки «источник пульсаций — гидравлическая сеть — механическая конструкция — объект воздействия». В отличие от раздельного рассмотрения вибрационной безопасности и надежности уплотнений, такой подход позволяет выявить общие технические мероприятия, способные одновременно снижать вибрационную нагрузку и динамическое воздействие на уплотнительные узлы.

Ключевые слова: пульсации расхода, гидропривод, виброакустическая нагрузка, уплотнительные узлы, вибрационная безопасность, надежность гидросистем, гаситель колебаний.

THE EFFECT OF FLUCTUATIONS IN THE MASS-FLOW RATE PERTURBATION OF THE POWER FLUID IN A HYDRAULIC SYSTEM ON THE OPERATOR'S VIBROACOUSTIC LOAD AND THE LONG-TERM RELIABILITY OF SEAL ASSEMBLIES

Research article

Rudikov D.A.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-2612-7486;

¹ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (d-studio[at]mail.ru)

Suggested: 23.06.2026; Accepted: 29.09.2026; Published: 30.09.2026

Abstract

The pulsating nature of the flow from pump units remains one of the least controllable sources of vibration and noise in the hydraulic systems of mobile and stationary machinery. The article examines the relationship between the non-uniformity of the power flow, the vibration load on the operator and the degradation of elastomeric seal assemblies in pumps, hydraulic cylinders and distribution valves. The frequency ranges of pulsations characteristic of gear and axial plunger pump are analysed, along with the mechanisms by which vibrational energy is transmitted through pipework and cab components, and the wear kinetics of lip and face seals under cyclic loading. The necessity for comprehensive standardisation of the vibroacoustic characteristics of hydraulic systems is substantiated, taking into account occupational health and safety requirements and the service life of seal assemblies. The scientific novelty of the work lies in the systematisation of the interrelationship between pulsations in the flow rate and pressure of the power fluid, the vibroacoustic impact on the operator, and the dynamic loading of the sealing assemblies. A complex approach is proposed for analysing these effects, based on a single cause-and-effect chain: 'source of pulsations – hydraulic network – mechanical structure – object of impact'. Unlike the separate analysis of vibration safety and seal reliability, this approach makes it possible to identify common technical measures capable of simultaneously reducing both the vibration load and the dynamic impact on the seal assemblies.

Keywords: mass-flow rate perturbation, hydraulic gear, vibroacoustic load, seal assemblies, vibration safety, reliability of hydraulic systems, vibration damper.

Введение

Пульсационный характер подачи рабочей жидкости является одним из факторов, определяющих динамическое состояние гидравлических систем. В объемных насосах неравномерность подачи обусловлена периодичностью рабочего процесса и сопровождается возникновением пульсаций расхода и давления. Их величина и частотный состав зависят от конструктивного исполнения насоса, числа рабочих органов, частоты вращения, режима эксплуатации и параметров гидравлической сети.

Пульсации давления и расхода распространяются по трубопроводам и взаимодействуют с элементами гидропривода, в результате чего могут формироваться вибрационные и акустические нагрузки [1]. При наличии конструктивных связей между трубопроводами, насосным агрегатом, рамой и кабиной машины часть колебательной энергии передается на рабочее место оператора. Одновременно циклическое изменение давления в элементах гидропривода оказывает динамическое воздействие на уплотнительные узлы, работающие в условиях многократного изменения контактных и деформационных нагрузок.

Вопросы вибрационной безопасности операторов мобильных машин и надежности элементов гидросистем традиционно рассматриваются преимущественно как самостоятельные направления. Вместе с тем общим фактором для них может выступать динамика рабочей жидкости, определяемая пульсациями расхода и давления [2]. Это позволяет рассматривать снижение пульсаций не только как средство повышения стабильности работы гидропривода, но и как конструктивное мероприятие, потенциально направленное одновременно на снижение вибрационной нагрузки и уменьшение динамического воздействия на уплотнительные узлы.

Актуальность такого подхода обусловлена необходимостью комплексной оценки динамических процессов в гидроприводах мобильных и стационарных машин. При этом существенное значение имеет не только амплитуда пульсаций, но и их частотный состав, условия распространения колебаний, наличие резонансных явлений и режим работы гидросистемы.

Объектом исследования являются динамические процессы в гидравлических системах с объемными насосами, сопровождающиеся пульсациями расхода и давления рабочей жидкости.

Предметом исследования является взаимосвязь между параметрами пульсационного процесса, виброакустической нагрузкой элементов машины и динамическим воздействием на уплотнительные узлы гидропривода.

Цель исследования заключается в систематизации физических механизмов возникновения и распространения пульсаций рабочей жидкости и обосновании комплексного подхода к оценке их влияния на виброакустическую нагрузку оператора и долговременную надежность уплотнительных узлов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Рассмотреть основные источники пульсаций расхода и давления в гидравлических системах.
- Систематизировать основные пути распространения колебательной энергии от насосного агрегата к рабочему месту оператора.
- Рассмотреть механизмы динамического воздействия пульсаций на уплотнительные узлы.
- Проанализировать связь между частотными характеристиками пульсаций, условиями распространения колебаний и характером их воздействия.

рассмотреть технические способы снижения пульсаций и оценить возможность их одновременного применения для снижения вибрационной нагрузки и динамического воздействия на уплотнения.

В работе использованы положения теории гидравлических машин и гидроприводов, представленные в нормативных документах, научной и учебной литературе, а также результаты опубликованных исследований динамики гидравлических и насосных систем. Исследование носит преимущественно аналитический и концептуальный характер и направлено на систематизацию взаимосвязей между пульсационными процессами в гидросистеме, виброакустическим воздействием и условиями работы уплотнительных узлов.

Методы и принципы исследования

Исследование выполнено на основе аналитического рассмотрения взаимосвязанных процессов, возникающих при пульсационной подаче рабочей жидкости в гидравлических системах. Методологической основой является последовательное рассмотрение цепочки «источник пульсаций — гидравлическая сеть — механическая конструкция — объект воздействия».

На первом этапе анализируется образование пульсаций расхода и давления в насосном агрегате. В качестве основных характеристик пульсационного процесса рассматриваются средний расход рабочей жидкости, амплитуда его периодической составляющей и частота возбуждения. Для объемных насосов частота основных гармоник определяется конструктивными параметрами рабочего органа и частотой вращения вала. При этом реальный спектр пульсаций может включать основную гармонику и ряд высших гармонических составляющих.

На втором этапе рассматривается распространение пульсаций давления по гидравлической сети. При анализе учитываются местные сопротивления, элементы трубопроводов, гидроаппаратура и исполнительные механизмы. Пульсации давления рассматриваются как источник динамического воздействия на трубопроводную обвязку и элементы конструкции. Особое внимание уделяется возможности возникновения резонансных явлений при совпадении или сближении частот возбуждения с собственными частотами элементов гидравлической и механической системы.

На третьем этапе анализируются основные каналы передачи колебательной энергии к рабочему месту оператора. Рассматриваются три взаимосвязанных механизма: передача вибрации через жесткие элементы конструкции машины, передача через трубопроводную обвязку и органы управления, а также акустическое излучение насосного оборудования и элементов гидросистемы [3]. Для оценки воздействия учитываются общая и локальная составляющие вибрации.

На четвертом этапе рассматривается динамическое воздействие пульсаций давления на уплотнительные узлы. Анализируется возможность многократного изменения деформационного состояния контактной зоны уплотнения при периодическом изменении давления, а также связанные с этим процессы трения, локального тепловыделения и постепенного изменения свойств эластомерного материала [4].

На пятом этапе проводится сопоставление частотных характеристик пульсаций с предполагаемыми каналами передачи и характером воздействия. Такое сопоставление используется не как универсальная нормативная классификация, а как аналитический инструмент систематизации рассматриваемых механизмов [5].

Для обобщения результатов применяется причинно-следственная схема:

параметры насосного возбуждения → пульсации расхода → пульсации давления → распространение колебаний в гидравлической и механической подсистемах → виброакустическое воздействие и динамическое нагружение уплотнений.

При анализе технических мероприятий по снижению пульсаций рассматривается их воздействие на различные звенья указанной цепочки. Гасители пульсаций и гидроаккумуляторы рассматриваются как средства снижения амплитуды пульсационного процесса; конструктивная оптимизация насоса — как средство уменьшения возбуждения непосредственно в источнике; гибкие элементы — как средство ограничения передачи колебаний на конструкцию; активные системы компенсации — как способ управляемого подавления динамической составляющей давления.

Таким образом, методический подход исследования основан не на проведении самостоятельного экспериментального определения вибрационных и ресурсных характеристик, а на аналитической систематизации физических механизмов, сопоставлении опубликованных результатов и установлении взаимосвязи между параметрами пульсационного процесса и двумя основными направлениями его воздействия: виброакустической нагрузкой и динамической нагруженностью уплотнительных узлов.

Основные результаты

Гасители колебаний рабочей жидкости остаются наиболее апробированным техническим решением, и здесь стоит выделить их принципиальное разнообразие по механизму действия.

- Гидроаккумуляторы газожидкостного типа — накапливают избыточный объем жидкости на пике пульсации и отдают его на спаде, выравнивая расход.
- Резонаторы Гельмгольца, настраиваемые на доминирующую частоту возбуждения насоса, эффективные в узком, но предсказуемом диапазоне частот.
- Упругие вставки и гибкие рукава высокого давления, снижающие передачу структурного шума на жесткие элементы кабины.
- Активные системы компенсации пульсаций с обратной связью по датчику давления — решение более дорогое, но перспективное для тяжелой техники с высокими требованиями к комфорту оператора.

Проведенные исследования динамики трубопроводных систем с гасителями колебаний рабочей жидкости показали, что в первой главе таких работ традиционно проводится анализ состояния исследований в области виброакустики гидромеханических систем с последующей классификацией источников виброакустической нагруженности [5]. Такой подход методологически оправдан, но он оставляет за скобками экономический вопрос: установка полноценного гасителя колебаний увеличивает стоимость гидросистемы, а для техники массового применения — скажем, для сельскохозяйственных погрузчиков или коммунальных машин — производитель нередко идет на компромисс в пользу упрощенной конструкции.

Существует и альтернативный, менее очевидный путь — оптимизация геометрии насоса на стадии проектирования, снижающая амплитуду пульсаций в источнике. В исследовании [4] показано снижение среднеквадратического значения виброскорости в 1,25 раза при применении безлопаточного конфузора и обеспечении гарантированного осевого зазора для рассмотренного в работе электронасосного агрегата. Цифра не выглядит революционной, однако для агрегатов, работающих в замкнутом объеме кабины или отсека, даже такое снижение способно перевести суммарную вибронгрузку из одного нормативного класса в другой.

Здесь напрашивается контраргумент: конструктивная оптимизация насоса решает проблему только для конкретной модели агрегата и не защищает от резонансных эффектов, возникающих ниже по потоку — в трубопроводной обвязке, гидроцилиндрах, распределителях. Задачу приходится решать системно, а не точечно, и именно поэтому в современной практике проектирования гидроприводов тяжелой техники все чаще применяется частотный анализ всей гидросистемы как единого динамического объекта, а не последовательности изолированных элементов.

Отдельного внимания заслуживает вопрос совместного нормирования вибрационной безопасности оператора и ресурса уплотнительных узлов — задачи, которые на практике решаются разными подразделениями одного и того же конструкторского бюро, причем нередко без должной координации. Нормирование параметров вибрации согласно действующим санитарным нормам и стандарту вибрационной безопасности устанавливает классификацию вибраций, методы гигиенической оценки, нормируемые параметры и требования к вибрационным характеристикам самих машин [3], [6]. Эти требования формально не связаны с ресурсными характеристиками уплотнений, однако конструктивные меры по снижению виброакустической нагруженности источника — те же гасители пульсаций и оптимизированная геометрия проточной части — одновременно снижают циклическую нагрузку на уплотнительные узлы. Таким образом, возникает синергетический эффект, заключающийся в одновременном снижении виброакустического воздействия на оператора и динамической нагрузки на уплотнительные узлы.

Ниже приведена обобщенная схема соотнесения частотных диапазонов пульсаций с преимущественным характером их воздействия — она основана на систематизации приведенных выше источников и носит иллюстративный характер, отражая общую логику распределения рисков, а не результаты отдельного экспериментального исследования.

Таблица 1 - Схематическое представление возможных каналов воздействия пульсаций рабочей жидкости

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2026.12.2.1>

Характеристика пульсационного процесса	Возможный канал воздействия	Потенциально чувствительные элементы
Низкочастотные составляющие	Передача через конструкцию	Рама, кабина, сиденье
Среднечастотные составляющие	Передача через трубопроводы и органы управления	Органы управления, руки оператора
Высокочастотные составляющие	Акустическое и структурное воздействие	Элементы насоса, трубопроводы
Составляющие, близкие к собственным частотам системы	Резонансное усиление	Трубопроводы, арматура, элементы конструкции

Прогнозировать дальнейшее развитие ситуации несложно, хотя и без иллюзий относительно скорости изменений. Ужесточение требований охраны труда, наблюдаемое в последние годы в целом ряде отраслей машиностроения, рано или поздно затронет и нормативную базу для гидроприводов мобильных машин, вынуждая производителей закладывать гасители пульсаций уже на этапе базовой конфигурации, а не в качестве опции. Параллельно можно ожидать более активного применения расчетных методов численного моделирования виброакустических процессов на стадии проектирования — подход, который позволяет выявлять резонансные зоны до изготовления физического прототипа и, соответственно, избегать дорогостоящих переделок трубопроводной обвязки уже на серийной машине.

Заключение

Пульсации расхода рабочей жидкости представляют собой первопричину целого комплекса взаимосвязанных проблем — от повышенной вибронагрузки на оператора до ускоренной деградации уплотнительных узлов насосов, гидроцилиндров и арматуры. Связь между этими двумя, казалось бы, разнородными последствиями обеспечивается общим источником энергии колебаний и общими путями ее распространения по гидравлической и механической структуре машины.

Полученные результаты позволяют рассматривать пульсации расхода и давления рабочей жидкости как общий динамический фактор, связывающий виброакустическое воздействие на оператора и нагруженность уплотнительных узлов. При этом характер и степень воздействия определяются не только амплитудой пульсаций, но и их частотным составом, режимом работы гидросистемы, конструкцией трубопроводной обвязки, параметрами механической системы машины и характеристиками применяемых уплотнительных материалов.

Практическая значимость рассмотренного подхода заключается в возможности учитывать указанные взаимосвязи уже на стадии проектирования гидропривода. Снижение пульсаций в источнике возбуждения, применение гасителей и оптимизация условий передачи колебаний могут одновременно способствовать снижению вибрационной нагрузки и уменьшению динамического воздействия на уплотнительные узлы. При этом количественная оценка взаимосвязи между параметрами пульсаций, вибрационной нагрузкой и ресурсом уплотнений требует дальнейшей экспериментальной и расчетной верификации.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка расчетной модели, объединяющей частотный анализ гидросистемы, оценку параметров вибрационного воздействия и прогнозирование ресурса уплотнительных узлов. Такая модель должна быть дополнительно проверена экспериментальными данными и может стать основой для количественной оценки комплексного риска при проектировании гидроприводов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. — Введ. 2007-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2007. — 54 С.
- Дергачева Л.В. Гидравлика и гидропривод / Л.В. Дергачева, С.В. Ракуленко, Д.А. Рудиков. — Ростов-На-Дону: РГУПС, 2025. — 234 с.
- СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы. — Введ. 1996-10-31. — Москва: Стандартинформ, 1996. — 23 С.
- Юдина З.А. Причины возникновения вибрации в агрегате электронасосном космического аппарата и способы их снижения / З.А. Юдина, М.И. Синиченко, А.П. Ладыгин и др. // Космические аппараты и технологии. — 2021. — № 2. — С. 63–76. — DOI: 10.26732/j.st.2021.2.01



5. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б.Ф. Гликман. — Москва: Наука, 1986. — 368 с.
6. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. — Москва: Машиностроение, 1987. — 464 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 12.1.012-2004 Sistema standartov bezopasnosti truda. Vibracionnaya bezopasnost'. Obshhie trebovaniya [Occupational safety standards system. Vibration safety. General requirements]. — Introduced 2007-07-01. — Moscow: Standartinform, 2007. — 54 P. [in Russian]
2. Dergacheva L.V. Gidravlika i gidroprivod [Hydraulics And Hydraulic Drive] / L.V. Dergacheva, S.V. Rakulenko, D.A. Rudikov. — Rostov-Na-Donu: RGUPS, 2025. — 234 p. [in Russian]
3. SN 2.2.4/2.1.8.566-96 Proizvodstvennaya vibraciya, vibraciya v pomeshheniyax zhily'x i obshchestvenny'x zdaniy. Sanitarny'e normy' [The sanitary norms of industrial vibration, vibration of residential and public buildings]. — Introduced 1996-10-31. — Moscow: Standartinform, 1996. — 23 P. [in Russian]
4. Yudina Z.A. Prichiny' vzniknoveniya vibracii v agregate e'lektronasosnom kosmicheskogo apparata i sposoby' ix snizheniya [Causes of Vibration in the Electric Pump Unit of a Spacecraft and Methods for Their Reduction] / Z.A. Yudina, M.I. Sinichenko, A.P. Lady'gin et al. // Spacecraft and Technologies. — 2021. — № 2. — P. 63–76. — DOI: 10.26732/j.st.2021.2.01 [in Russian]
5. Glikman B.F. Matematicheskie modeli pnevmogidravlicheskih sistem [Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems] / B.F. Glikman. — Moscow: Nauka, 1986. — 368 p. [in Russian]
6. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem [Dynamics and Control of Hydraulic and Pneumatic Systems] / D.N. Popov. — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 464 p. [in Russian]