

Научная статья
УДК 62-82:625.74
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>
EDN: DOFLIH



ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА АЭРОДРОМНОЙ ТЕХНИКИ

И.В. Лесковец¹ ✉, А.А. Грац², В.Д. Рогожин¹

¹Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь

²Национальный аэропорт Минск,
г. Минск, Республика Беларусь

✉ ответственный автор
leskovets1966@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен обзор современных методов диагностирования мобильных машин. Выделены направления диагностирования: с помощью применения алгоритмов, основанных на использовании комплекса контроллеров, предназначенных для сбора и хранения актуальной диагностической информации; искусственного интеллекта, позволяющего выполнить поэтапное диагностирование на основе текущей информации о скоростях движения гидродвигателей, давления и скорости жидкости. А также отмечены направления использования статопараметрических методов, позволяющих определить состояние рабочей жидкости и спрогнозировать состояние различных узлов гидропривода; показателей состояния фильтра для оценки степени износа шестеренных насосов; системы показателей, позволяющих установить остаточный ресурс элементов гидропривода.

Материалы и методы. Авторами предлагается применить уравнение Бернулли для определения скоростных и пьезометрических напоров на выбранных участках гидропривода с целью построения цифровой модели в виде кривой гидравлического уклона. Отмечается, что для гидросистем, оснащенных гидромоторами, возможно получение разных режимов работы гидравлических участков при минимальной и максимальной частоте вращения насосов, что дает возможность анализа работы гидросистемы при давлениях, которые изменяются в широком диапазоне. Цифровая модель строится на основании известных зависимостей, позволяющих теоретическим путем определить скоростной и пьезометрический напоры на разных участках гидросистемы.

Результаты. Применение данной цифровой модели на различных участках во время технического обслуживания гидропривода и сравнение измеренных показателей и теоретических на участках гидросистемы позволит установить его исправность или спрогнозировать выход из строя.

Обсуждение и заключение. Данный подход позволит своевременно провести ремонтные работы и исключить внезапный выход техники из строя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диагностирование, гидропривод, скоростной напор, пьезометрический напор, остаточный ресурс, аэродромная техника

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Лесковец И.В., Грац А.А., Рогожин В.Д. Диагностирование гидропривода аэродромной техники // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 356-367. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>

© Лесковец И.В., Грац А.А., Рогожин В.Д., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>
EDN: DOFLIH

DIAGNOSTICS OF HYDRAULIC DRIVE OF AIRFIELD EQUIPMENT

Igor' V. Leskovets¹ ✉, Alexandr A. Grats², Vladimir D. Rogozhyn³

¹Belarusian-Russian University,
Mogilev, Republic of Belarus

²Minsk National Airport,
Minsk, Republic of Belarus

✉ corresponding author
leskovets1966@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article presents an overview of modern diagnostic methods for mobile machines. The directions of diagnosis are outlined: with the applications of algorithms based on the use of a complex of controllers designed to collect and store up-to-date diagnostic information; with the help of artificial intelligence allowing to perform step-by-step diagnostics on current information about the speed of hydraulic motors, pressure and fluid velocity. The article also demonstrates the ways for using parametric statistical methods that are possible to determine the state of the working fluid and predict the state of various hydraulic drive units; filter condition indicators for assessing the wear degree of gear pumps; a system of indicators demonstrating unconsumed residual resource of hydraulic drive elements.

Materials and Methods. The authors propose to use the Bernoulli equation to determine the velocity and piezometric heads in selected sections of the hydraulic drive in order to construct a digital model in the form of a hydraulic slope curve. It is noted that for hydraulic systems equipped with hydraulic motors, it is possible to obtain different operating modes of hydraulic sections at minimum and maximum pump speeds, which makes it capable to analyze the operation of the hydraulic system at pressures that vary over a wide range. The digital model is built on the basis of known dependencies, which theoretically allow us to determine the velocity and piezometric pressures in different parts of the hydraulic system.

Results. The application of this digital model in various areas, during maintenance of the hydraulic drive and a comparison of the measured values in the sections of the hydraulic system with the theoretical ones will make it possible to establish its serviceability or predict failure.

Discussions and Conclusions. The proposed approach will allow to carry out repairs in a timely manner and eliminate sudden equipment failure.

KEYWORDS: diagnostics, hydraulic drive, velocity pressure, piezometric head, unconsumed residual resource, airfield equipment

The article was submitted: April 01, 2025; approved after reviewing: April 18, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Leskovets I.V., Grats A.A., Rogozhyn V.D. Diagnostics of hydraulic drive of airfield equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 356-367. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>

© Leskovets I.V., Grats A.A., Rogozhyn V.D., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве средств для поддержания аэродрома в рабочем состоянии используется специальная техника на базе тракторов и автомобилей. К такой технике можно отнести снегоочистители, уборочные машины, тепловые машины, поливочную и пожарную технику. Рабочее оборудование этих машин, как правило, приводится в действие с помощью гидропривода, эксплуатация техники производится в летний и зимний периоды. К особенностям данных машин можно отнести повышенные требования к надежности. Это обусловлено тем, что содержание аэродромов относится к работам, которые необходимо выполнять в любое время года, независимо от погодных условий. Одним из важнейших показателей работоспособности техники является коэффициент готовности, его значение должно стремиться к единице. Таким образом, необходимо снижать количество незапланированных ремонтов, чтобы время вынужденных простоев было равно нулю.

Как правило, поддержание техники в работоспособном состоянии осуществляется с помощью системы планово-предупредительного ремонта (ППР) [1]. Комплекс мероприятий, применяемый на основе системы ППР, предусматривает проведение нескольких видов плановых технических обслуживаний, направленных на поддержание техники в исправном состоянии и своевременном выявлении неисправностей, которые могут оказать влияние на работоспособность машин. При эксплуатации техники система ППР предусматривает не только проведение технических обслуживаний, но и диагностирование механизмов машин, предназначенное для своевременного выявления повреждений в случае внезапных отказов.

Современный гидропривод, который используется в аэродромной технике, отличается большой сложностью и высокой степенью автоматизации. К задачам диагностирования таких гидроприводов можно отнести поиск возникших неисправностей, а также прогнозирование остаточного ресурса и возникновения дефектов в период эксплуатации между техническими обслуживаниями.

В настоящее время в области диагностирования мобильных машин, оснащенных гидроприводом, образовалось несколько направлений. К таким направлениям можно отнести работы, которые нацелены на создание комплекса систем для диагностирования и определения фактического состояния техники в

целом [2]. Целью работы является создание алгоритмов определения технического состояния техники на основе использования комплекса контроллеров, который собирает диагностическую информацию с различных узлов отдельной машины или нескольких машин. Рекомендуется использовать универсальный программируемый бортовой контроллер, который предназначен для фиксации параметров и управления исполнительными устройствами по определенным критериям. Кроме того, предлагается специализированное программное обеспечение, дающее возможность применения терминального доступа для организации исследования технического состояния различных моделей строительных и дорожных машин. Данные терминальные решения позволяют использовать полученную информацию для различных целей, в том числе для контроля технического состояния машины, накопления статистической информации, формирования на её основании заключений о возможных неисправностях и остаточном ресурсе техники.

Одним из направлений комплексного диагностирования машин, оснащенных гидроприводом, является использование искусственного интеллекта [3]. Авторами исследования отмечается, что расходы на эксплуатацию гидрофицированных экскаваторов в значительной степени зависят от региона эксплуатации, производителя и типа машины и могут составлять до 30–40% от других затрат. Наиболее частыми отказами для такой техники являются отказы гидравлических компонентов: фитингов, трубок, шлангов, клапанов и уплотнений. В этом случае требуется постоянный мониторинг, осмотр и замена элементов для поддержания экскаватора технической готовности. В статье предлагается применение теории искусственного интеллекта, которая позволяет разбить диагностирование состояния гидравлической системы экскаватора на несколько уровней, включающих прямое диагностирование неисправностей в гидравлической системе по физическим величинам, включающим давление, температуру, расход и скорость движения. Ко второму уровню авторы относят использование комбинированного анализа данных, основанного на установленных в гидроприводе датчиках. Для автоматизации процесса контроля и диагностирования предлагается использовать нейронную сеть, работа которой основана на анализе дерева неисправностей. Использование в качестве инструмента для прогнозирования ресурса

различных компонентов гидравлических систем является перспективным методом технической диагностики, их применение позволяет обеспечить контроль действия оператора, предотвратить выход из строя оборудования вследствие неправильной работы.

Авторами исследования, посвященного повышению эффективности методов диагностирования гидропривода строительных и дорожных машин [4], отмечается, что в настоящее время распространение нашел статопараметрический метод, основанный на анализе состояния рабочей жидкости [5]. Препятствием для распространения данного метода является возникновение проблем с циркуляцией рабочей жидкости, вследствие чего возникают проблемы со смазывающей способностью очистительными и охлаждающими функциями гидравлической жидкости, что может привести к серьезному снижению ресурса элементов гидропривода, удаленных от насосной станции. Авторами проведены исследования, показывающие, что в гидродвигателях, значительно удаленных от насосной станции, где не осуществляется полная циркуляция рабочей жидкости, отклонения кислотности и массовая доля механических примесей значительно отличаются в худшую сторону по сравнению с гидродвигателями, где происходит полная циркуляция рабочей жидкости. Авторами данного исследования предлагается внедрение дополнительных систем фильтрации, установленных на входе и выходе из гидродвигателей, в которых циркуляция рабочей жидкости не обеспечивается из-за конструктивных параметров гидравлической системы.

В работе [6] на основе экспериментальных испытаний доказано, что с течением времени при эксплуатации шестеренных насосов гидромеханических передач происходит ухудшение их характеристик. Исследования проводились на специальном стенде, который позволяет измерять расходы, возникающие при работе гидромеханической коробки передач. При диагностировании гидравлической системы авторами предлагается определять гидравлическое сопротивление фильтра, которое влияет на пропускную способность в связи с тем, что гидравлическое сопротивление возрастает с течением времени в процессе эксплуатации гидропривода. Авторами установлено, что значительное влияние на диагностируемые параметры имеет температура рабочей жидкости. Предложена методика оценки технического состояния гидравлической передачи на основе анализа изменения диагностических

параметров с учетом закономерностей отклонения этих параметров от допустимых значений. В исследовании [7] представлено специализированное гидравлическое оборудование для испытания шестеренных насосов, которое на основании диагностических показателей позволяет установить состояние оборудования. Методы диагностирования постоянно совершенствуются, в том числе проводятся разработки применения различных способов и последовательностей диагностирования, в зависимости от возникших неисправностей [8]. Авторами разрабатываются и внедряются диагностические устройства и стенды для повышения эффективности диагностирования гидропривода, сокращения затрат и времени на определение неисправностей [9].

Авторы в статье [10] отмечают, что остаточный ресурс машины является основой для прогнозирования работоспособности, рекомендуется определять его значения по динамике диагностических параметров в процессе наработки от номинального до предельного значений. Остаточный ресурс машины предлагается определять через текущее значение контролируемых параметров инструментальными методами. В этом случае от точности определения текущих значений контролируемых параметров значительно зависит достоверность получаемых результатов. Установление динамики изменения измеряемых параметров позволяет определить интенсивность изменения технического состояния исследуемой техники. Одним из важнейших показателей определения состояния элементов гидропривода машины является давление и перепад давления между точками измерения. Измерение давления с помощью манометров требует разгерметизации системы при их подключении, что сопровождается возможными потерями гидравлической жидкости и имеет достаточно большую трудоемкость. Авторами исследования с помощью разработанного комплекта диагностирования гидропривода реализован тепловой метод диагностики, основанный на фиксации изменения температуры поверхности сборочных единиц, что позволяет определить нагрузочные режимы, в которых работают сборочные единицы, и на основании сравнения с эталонными сделать вывод о техническом состоянии сборочных единиц и гидросистемы в целом.

Авторами исследования [11] предлагается использовать специальные датчики, которые позволят установить уровень загрязнения гидравлического масла и на основе этой инфор-

мации определить работоспособность и остаточный ресурс гидравлического оборудования. В работе [12] обоснована необходимость повышения требований к гидравлическим жидкостям строительных машин. Обоснование аргументировано повышением удельных мощностей и нагрузок на гидравлическое оборудование. В [13] определена интенсивность износа рабочих элементов для различных уровней загрязнения масла твердыми частицами. Результаты экспериментов показали, что существуют различия между теоретически рассчитанным и измеренным расходом через радиальный зазор. При измерении значений перепада давления во время прохождения жидкости через клапан установлено, что масла с самым низким уровнем чистоты имеют больший разброс измеренных значений. Значительное внимание уделяется авторами исследования [14] совершенствованию существующих и разработке новых диагностических систем, методических рекомендаций по организации и технологии диагностирования гидравлических элементов с целью установления предполагаемого момента отказа и устранения причин его наступления в процессе технического обслуживания. Прогнозированию остаточного ресурса гидромоторов посвящена работа [15]. Исследование основано на использовании теории надежности, математической статистики и моделирования. Целью работы является повышение эксплуатационной надежности, снижению простоев и затрат на техническое обслуживание и ремонт техники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ методов диагностирования мобильной техники показывает, что основными направлениями являются определение остаточного ресурса системы в целом или отдельных сборочных единиц. Диагностирование предполагается осуществлять различными методами измерения прямых и интегральных показателей работающего гидропривода, а также измерения показателей качества гидравлической жидкости. Все методы, направленные на определение остаточного ресурса машин, не вполне подходят для выявления локальных неисправностей машин гидравлических аппаратов и гидролиний.

Если рассматривать работу гидропривода на основании уравнения Бернулли, то можно утверждать, что напор на выходе из насоса равен напору на любом участке трубопровода

$$z + \frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{v_{cp}^2}{2g} = \sum_i \left(z_i + \frac{P_i}{\rho g} + \alpha_i \frac{v_{cp,i}^2}{2g} + h \right), \quad (1)$$

где z, z_i – потери в местных сопротивлениях;

P – пьезометрический напор жидкости на участке;

ρ – плотность жидкости;

g – гравитационное ускорение;

α – коэффициент Корриолиса;

$v_{cp}, v_{cp,i}$ – средняя скорость жидкости на участке;

h – геометрический напор.

С использованием систем мониторинга пьезометрического напора, определяемого манометрами в характерных точках гидропривода, можно установить его значения в каждой из этих точек. В связи с тем, что пьезометрический напор современного гидропривода и средние скорости жидкости на участках достаточно велики, то для исключения несущественных переменных значениями h можно пренебречь. Учитывая, что скоростной напор является функцией подачи и диаметра сечения трубопровода, имеется возможность установления потерь давления в характерных точках гидропривода на машине, которая находится в начальной стадии эксплуатации. Напор жидкости зависит от нагрузок на рабочее оборудование и подачи насоса, поэтому важным будет выбор режима нагружения гидропривода при проведении тестирования. Для диагностирования гидропривода по мощности имеются рекомендации применения режима максимальной нагрузки, т.к. в этом случае насос развивает максимальное давление, однако в условиях проведения технического обслуживания режим максимальной нагрузки не всегда и не для всех гидродвигателей можно реализовать. Поэтому предлагается использовать режим холостого хода, который легко реализуется для гидродвигателей поступательного и вращательного действия. В этом случае расход жидкости определяется на основе замера скорости движения гидродвигателя поступательного действия, или частоты вращения гидродвигателя вращательного действия. В то же время при проведении диагностирования имеется возможность использования различных режимов работы насоса, соответствующих диапазону от минимальной до максимальной частоты вращения. Таким образом, оптимальным представляется принять режим номинальной частоты вращения насоса, т.к. в этом случае достигается максимальный теоретический к.п.д.

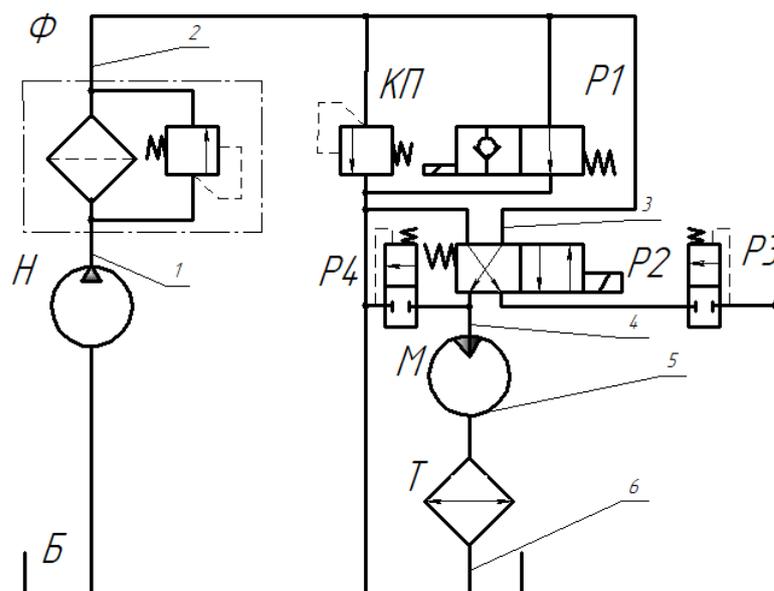


Рисунок 1 – Фрагмент гидравлической схемы машины уборочной аэродромной:
 1, 2, ..., 6 – гидравлические участки; Б – гидробак; Н – насос шестеренный;
 Ф – фильтр; КП – клапан предохранительный; P1, P2, P3, P4 – гидрораспределители;
 М – гидромотор; Т – теплообменник
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Fragment of the hydraulic diagram of the airfield sweeping machine
 1, 2, ..., 6 – hydraulic sections, B – hydraulic tank, H – gear pump,
 F – filter, KP - safety valve, P1, P2, P3, P4 – hydraulic distributors,
 M – hydraulic motor, T – heat exchanger
 Source: compiled by the authors.

На основании полученного расхода определяются скорости движения жидкости на участках трубопроводов, что позволяет установить скоростные напоры и определить значение одного из членов уравнения Бернулли. Таким образом, для определения скоростного напора не требуется установка расходомеров, что, как правило, сопряжено с разгерметизацией трубопроводов и потерями гидравлической жидкости и внесением в гидравлическую жидкость загрязнений.

Рассмотрим фрагмент гидравлической схемы аэродромной щетки, представленной на рисунке 1.

В гидравлической схеме используются: гидронасос Н – насос шестеренный GP20K - R2,5; М – гидромотор A2-16/25 07.6; гидроаппараты: Ф – фильтр ФГИ-20/3 KB(MB), P1 – гидрораспределитель KV 2/2-10, P2 – гидрораспределитель KV 4/2-5KO-10-2A-L, P3 – гидрораспределитель KV 2/2-10, P4 – гидрораспределитель KV 2/2-10; Т – теплообменник 4000-52.13.200.00. Рабочее давление гидросистемы составляет 20 МПа, максимальное кратковременное давление – 25 МПа.

Рабочий объем гидронасоса 20 см³, рабочий объем гидромотора 16 см³. При включении гидрораспределителя P1 рабочая жидкость по линии 3 направляется к гидрораспределителю P2 и на гидромотор, а затем в гидробак через теплообменник. При повышении давления выше номинального срабатывает предохранительный клапан КП, через который жидкость направляется в гидробак. При возникновении динамических нагрузок на гидромоторе срабатывает гидрораспределитель P4, после чего жидкость, проходящая через распределитель P2, направляется в гидробак. Работа гидрораспределителей P1 и P2 обеспечивается электронной системой управления рабочим оборудованием.

Одним из параметров, формирующим давление в гидросистеме при работе на холостом ходу, является скорость рабочей жидкости, которая определяется подачей насоса. Подача насоса зависит от его частоты вращения и высчитывается по формуле

$$Q_n = q_n 10^6 n_n \eta_n, \quad (2)$$

где q_n – рабочий объем насоса, для шестерённого насоса GP20K - R2,5 рабочий объем равен 20 см³;

n_n – частота вращения насоса, для первого случая примем 100 мин⁻¹;

η_n – механический КПД насоса, рекомендуется принять $\eta_n = 0,96$.

На основании условия неразрывности потока частота вращения вала гидромотора измеряется по формуле

$$n_m = \frac{Q_n \cdot \eta_m}{q_m}, \quad (3)$$

где q_m – рабочий объем гидромотора.

Скорость жидкости на участках считается по формуле

$$V_i = \frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot d_i^2}, \quad (4)$$

где d_i – диаметр i -го участка.

На основании уравнения Бернулли скоростной напор на участках определяется по формуле¹ [14]

$$P_i V_i = \frac{V_i^2}{2 \cdot g}, \quad (5)$$

где P_i – давление на i -м участке.

Давление на каждом i -м участке отличается и зависит от потерь давления на трение по длине участка, потерями в местных сопротивлениях и потерями в гидроаппаратах.

Потери давления на трение на участках гидросхемы измеряются по формуле

$$\Delta P_i = \frac{\rho \cdot \lambda_i \cdot l_i \cdot V_i^2}{2 \cdot d_i}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, который зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубопровода.

Число Рейнольдса является критерием для определения режима движения и выбора способа определения коэффициента гидравлического трения. Число Рейнольдса считается по формуле

$$Re_i = \frac{V_i d_i}{\nu}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость гидравлической жидкости.

Для исследуемой гидравлической схемы в исследуемых режимах движения жидкости

$$Re_{кр} < Re_i < \frac{10}{\Delta_r}, \quad (8)$$

где Δ_r – относительная шероховатость, значение которой определяется по формуле

$$\Delta_r = \frac{\Delta_3}{d}, \quad (9)$$

где Δ_3 – эквивалентная шероховатость, значение которой высчитывается на основании ГОСТ 6286–2017, в связи с тем, что в исследуемой гидравлической схеме трубопроводы выполнены в виде рукавов высокого давления $\Delta_3 = 3$ мкм.

Коэффициенты гидравлического трения на участках трубопроводов определяются по формуле

$$\lambda_i = 0,3164 \frac{1}{Re_i^{0,25}}. \quad (10)$$

Результаты, полученные на основании зависимостей (5)– (9) занесем в таблицу 1.

Потери давления в местных сопротивлениях зависят от типа местного сопротивления и коэффициента местных сопротивлений и вычисляются по формуле

$$\Delta PM = \sum_{i=1}^n 0,5 \cdot \xi_i \cdot \rho \cdot V_i^2, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления.

В таблице 2 представлены значения коэффициентов местных сопротивлений и потерь давления в местных сопротивлениях.

Значительное влияние на величины давления на гидравлических участках в исследуемом контуре оказывает гидромотор, который развивает момент, зависящий от угловой скорости щетки

$$M_m = J \cdot \omega_m, \quad (12)$$

где J – момент инерции щетки,

ω – угловая скорость вращения щетки.

Тогда перепад давления на гидромоторе высчитывается по формуле

¹ Исаев А.П., Кожевникова Н.Г., Ещин А.В. Гидравлика: учебник. М.: ИНФРА-М, 2019. 420 с. (Высшее образование: Бакалавриат). ISBN 978-5-16-009983-5. Текст : электронный. URL: <https://znanium.com/catalog/product/937454>.

Таблица 1
Результаты расчета потерь давления на трение по длине трубопроводов
Источник: составлено авторами.

Table 1
Calculation results of friction pressure losses along the length of the pipelines
Source: compiled by the authors.

Номер участка	Марка трубопровода	Диаметр трубопровода, мм	Длина трубопровода, м	Скорость жидкости, м/с	Число Рейнольдса	Относительная шероховатость, мкм	Коэффициент гидравлического трения	Потери давления, кПа
1	DN 31	31	3	5,088	3356	0,01	0,042	44,78
2	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
3	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
4	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
5	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
6	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2

Таблица 2
Значения коэффициентов местных сопротивлений и потерь давления в местных сопротивлениях
Источник: составлено авторами.

Table 2
Values of local resistance coefficients and pressure losses in local resistances
Source: compiled by the authors.

Номер участка	Значения коэффициентов местных сопротивлений					Потери давления в местных сопротивлениях, кПа
1	0,5	0,2	-	-	-	7,791
2	0,2	0,5	1	0,15	1	7,5
3	0,5	1	0,5	1	1	10,53
4	0,5	1	0,5	1	1	92,1
5	0,5	-	0,5	1	1	78,94
6	0,5	1	-	-	-	39,47

Таблица 3
Величины перепада давления в гидроаппаратах
Источник: составлено авторами.

Table 3
Pressure drop values in hydraulic apparatus
Source: compiled by the authors.

Номер участка	Наименование гидроаппарата	Потери давления, кПа
1	Ф – фильтр ФГИ-20/3 КВ(МВ)	80
2	гидрораспределитель KV 2/2-10	100
3	гидрораспределитель KV 4/2-5КО-10-2А-L	100
4	гидромотор А2-16/25 07.6	2590
5	теплообменник 4000-52.13.200.00	100

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_m}{q_m} \quad (13)$$

Кроме давления, создаваемого в гидроприводе для привода гидромотора, давление создается гидроаппаратами, величина этого

перепада давления определяется производителем и представлена в технической документации.

Величины перепада давления в гидроаппаратах и на гидромоторе при частоте вращения насоса 100 мин⁻¹ представлены в таблице 3.

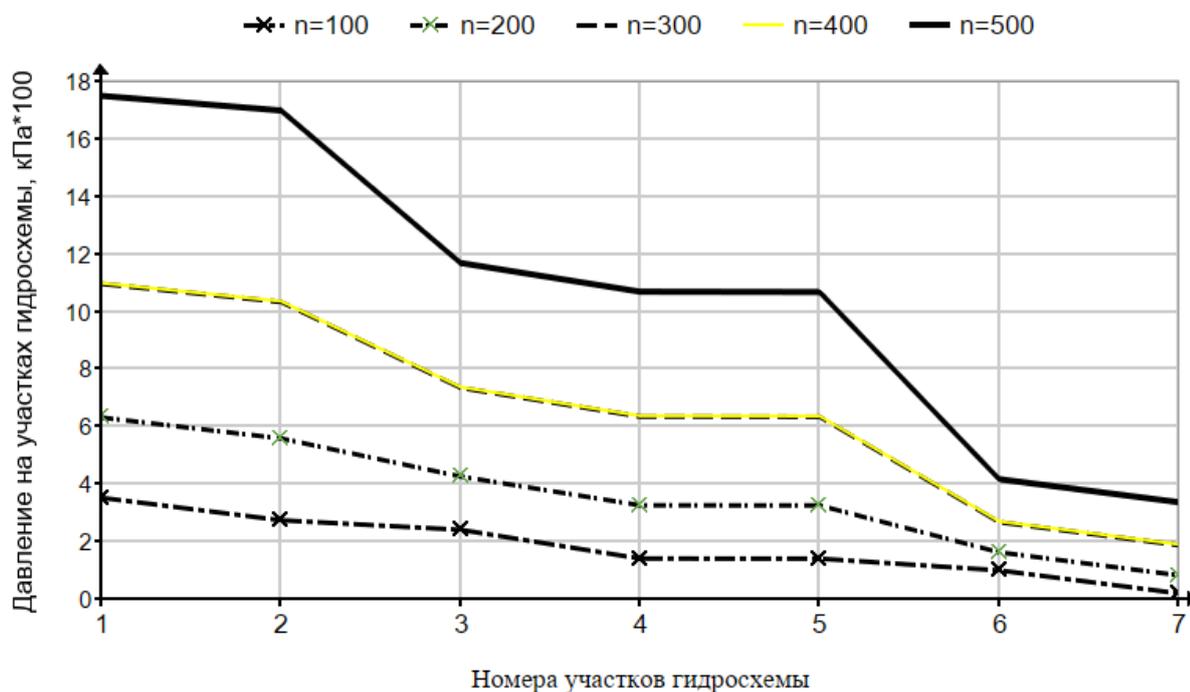


Рисунок 2 – Графики гидравлических уклонов на участках гидросистемы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphs of hydraulic gradients at hydraulic system sections
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Потери давления на каждом участке складываются из потерь давления на трение, в местных сопротивлениях, потерь давления в гидроаппаратах и на гидромоторе. Если изменить подачу насоса, то изменится частота вращения гидромотора, и, как следствие, изменится вращающий момент, развиваемый гидромотором, и давление на участках исследуемой гидросистемы. Таким образом, можно построить пакет теоретических кривых гидравлического уклона на данных участках гидропривода. Графики кривых гидравлического уклона для разных частот вращения насоса на участках гидросистемы представлены на рисунке 2.

Представленный на рисунке 2 набор кривых является теоретической цифровой моделью конкретного участка гидросистемы. Измерения давления на различных участках и его фиксация во время технических обслуживаний машины позволит накопить информацию об утечках и возможном увеличении давления, позволит создать базу данных о текущем состоянии конкретных гидравлических аппаратов. Сопоставление полученных результатов с теоретической кривой гидравлического уклона позволит определить возможное ухудшение технического состояния из-за естественного

износа, загрязнения гидравлической жидкости, расслоения рукавов высокого давления. Наличие данной технической информации позволит эксплуатирующей организации сделать своевременные выводы о техническом состоянии техники и принять меры для своевременной замены гидравлической жидкости, фильтров или гидроаппаратов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании уравнения Бернулли и известных методик определения потерь давления на участках трубопроводов гидросистемы представлена методика построения пьезометрического напора на участках трубопроводов, расположенных в контуре привода гидравлического мотора. Анализ полученных пьезометрических кривых показывает, что на разных участках выбранной ветви гидравлической схемы давление жидкости имеет конкретные значения и зависит от параметров трубопроводов, местных сопротивлений и гидроаппаратов. Анализ величин давления на различных участках трубопроводов позволяет установить места для установки манометров во время диагностирования гидропривода. Эти места определяются перепадом давления в характерных точках. Полученные теоретическим путем кон-

кретные величины давления на участках характеризуют нормальную работу гидросистемы. Отклонения практически измеренных величин давления от теоретических значений в большую или меньшую сторону может служить признаком неисправности. Таким образом, полученные результаты могут оказать помощь при поиске внезапно возникших неисправностей гидропривода. Ведение протоколов измерений практических значений измеренных давлений в выбранных характерных точках участков гидросистемы может посодействовать в прогнозировании неисправностей гидросистемы. Практически полученные значения конкретных измерений давления могут зависеть от различных параметров, которые не имеют отношения к исследуемой системе, например, температуры окружающего воздуха, температуры и вязкости рабочей жидкости. Сравнение результатов измерения давления в разные периоды работы машины могут помочь установить зависимость давлений, измеряемых в определенных точках гидропривода, определить направление изменения давлений в сторону увеличения или уменьшения. Постоянное направление изменения давления и постоянное увеличение отклонений от теоретических величин по методике, представленной авторами статьи, позволят предположить, что в гидросистеме происходят процессы, которые могут привести к внезапному отказу техники. Мониторинг изменения измеряемых давлений может оказать помощь эксплуатирующим организациям в выборе времени для постановки техники на текущий ремонт для своевременной замены гидроаппаратов или для их ремонта, исключив возникновение внезапных отказов, которые влекут за собой значительные потери средств из-за простоев техники. Для техники, к которой предъявляются повышенные требования к надежности, например, аэродромной технике, т.к. содержание в постоянной готовности аэродромных взлетно-посадочных полос имеет важнейшее значение для безопасности полетов авиации.

Предлагаемая авторами методика основана на измерении давления на участках гидропривода. Это давление формируется скоростным и пьезометрическим напором, величины которых определяются на основании уравнения Бернулли. Такой подход совпадает с методиками, предложенными другими авторами, указывающими, что давление является одним из важнейших показателей, характеризующих работу гидропривода. В отличие от рекомендаций других авторов предлагаемая методика позволяет определить теоретические значения давлений в установленных местах гидро-

привода, и на основании измеренных величин давлений во время диагностирования или технического обслуживания определить место возникшей неисправности или сделать прогноз о вероятном возникновении повреждений в будущие периоды эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика определения давлений на участках гидропривода гидравлического мотора основана на фундаментальном уравнении Бернулли. Эта методика позволяет детально рассчитать распределение давления жидкости вдоль всей выбранной ветви гидравлической схемы. Расчет учитывает геометрические параметры трубопроводов (диаметр, длину, шероховатость), характеристики местных сопротивлений (расширения, сужения, угольники, тройники, колена), а также рабочие параметры гидроаппаратуры (клапаны, фильтры, теплообменники) и параметры гидродвигателей. Полученные в результате расчетов пьезометрические кривые представляют собой графическое изображение изменения давления вдоль трубопровода. Анализ этих кривых позволяет оценить распределение давления на каждом участке системы, выявляя зоны перепадов давлений. Это, в свою очередь, является основой для выбора мест установки манометров для целей диагностики гидропривода. Рассчитанные давления на данных участках представляют собой теоретические значения, соответствующие нормальной работе гидросистемы. Любое отклонение фактически измеренных значений давления от теоретически рассчитанных как в сторону повышения, так и в сторону понижения может служить сигналом о возникновении неполадок в системе. Чем значительнее отклонение, тем серьезнее, вероятно, неисправность. Эта методика позволяет оперативно обнаружить проблемы, такие как засорение фильтров, расслоение рукавов высокого давления, неисправности блоков клапанов, распределителей, насоса или гидравлического мотора. Важно подчеркнуть, что своевременное выявление неисправностей позволяет предотвратить более серьезные поломки и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Для более эффективного контроля состояния гидропривода планируется вести протоколы измерений давления в выбранных точках. Эти протоколы должны содержать не только значения давления, но и время измерения, рабочие параметры машины, температуру окружающей среды и другие факторы, которые могут повлиять на результаты измерений. Сравнение данных, полученных в разные периоды эксплуатации

машины, позволят выявить тенденции изменения давления, спрогнозировать возникновение неисправностей и планировать техническое обслуживание или текущий ремонт. Систематический мониторинг давления в характерных точках гидросистемы, а также сравнение полученных данных с теоретическими расчетами позволяет своевременно обнаруживать неисправности и обеспечивать безопасную работу техники. Значительные отклонения измеренных давлений от теоретических требуют анализа и своевременного реагирования для предотвращения внезапных отказов. Анализ полученных данных позволит не только выявлять существующие проблемы, но и оптимизировать работу гидросистемы в целом, повышая ее надежность и долговечность. Поэтому разработанная методика является не просто способом обнаружения неисправностей, а инструментом для постоянного мониторинга состояния и эффективного управления гидроприводом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максименко А.Н., Бездников Д.В., Лесковец И.В., Кутузов В.В. Определение остаточного ресурса гидропривода машин // Грузовик. 2015. № 5. С. 36–43.
2. Зорин В.А., Пегачков А.А., Рузанов Е.В. Прогнозирование надежности дорожной и строительной техники с применением универсальных бортовых контроллеров // Техника и технология транспорта. 2019. № 4 (15). С. 6. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N15-06KN419.pdf> (дата обращения: 25.03.2025)
3. Миллер А.П. Современные тенденции в области определения технического состояния гидравлических систем строительных машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 1. 2021. URL: https://vestnik.pstu.ru/obgtrans/archives/?id=&folder_id=9987 (дата обращения: 25.03.2025)
4. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Повышение эффективности существующих методов диагностирования гидропривода строительного дорожных машин // Техника и технология транспорта. 2019. № 13. URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-20TKR.19.pdf> (дата обращения 25.03.2025:)
5. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Корректировка методов диагностирования гидравлических систем строительного дорожных машин // Строительные и дорожные машины. 2019. № 5. С. 37–41.
6. Архипенко М.Ю., Строганова Н.В. Моделирование процесса диагностики шестеренных насосов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2008. № 4 (10). С. 69–74.
7. Рынкевич С.А., Хадкевич И.Ю. Экспериментальные исследования физических свойств гидропривода мобильной машины // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 4. С. 68–78.
8. Чиликин А.А., Трушин Н.Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 117–127.
9. Пьянзов С.В. Методика динамической оценки технического состояния объемных гидроприводов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (55). С. 184–191. DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12184>
10. Максименко А.Н., Антипенко Г.Л., Бездников Д.В., Кутузов В.В. Повышение работоспособности гидропривода строительного дорожных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. № 4. С. 24–30.
11. Felix Ng., Jennifer A. Harding, Jacqueline Glass. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. no 83. p. 176–193.
12. Blum K.H., Ellenrieder K. Validated Hydraulic Fluids for Increased Hydraulic Life // ATZoffhighway worldwide. 2017. T. 10. no. 1. p. 50–55.
13. Hydraulic fluids: Controlling contamination in hydraulic fluids // Filtration & Separation. 2010. Vol. 47, no 3 (May-June 2010) p. 28–30.
14. Зорин В.А., Нгуен Чонг М. Прогнозирование остаточного ресурса гидромоторов строительных машин по результатам имитационного моделирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 3. С. 15–19. DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-15-19
15. Жмуров В.В., Кобзов А.Ю., Кобзова И.О., Герасимов С.В., Жук Е.А. Средства переносного и встроенного диагностирования силовых гидроцилиндров машин по параметрам несущей способности // Механика XXI века. 2024. № 23. С. 132–139. URL https://elibrary.ru/download/elibrary_67315115_84265878.pdf. (дата обращения: 22.04.2025).

REFERENCES

1. Maksimenko A.N., Bezdnikov D.V., Leskovets I.V., Kutuzov V.V. The residual resource hydraulic machines. *Truck*. 2015; 5: 36–43. (In Russ.)
2. Zorin V.A., Pegachkov A.A., Ruzanov E.V. Forecasting of reliability of the road and construction equipment using universal onboard controllers. *Technique and technology of transport*. 2019; 4 (15): 6. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N15-06KN419.pdf> (accessed: 25.03.2025) (In Russ.)
3. Miller A.P. Modern trends in the field of determining the technical state of hydraulic systems of construction machines. *Transport facilities. Ecology*. 2021; 1. URL: https://vestnik.pstu.ru/obgtrans/archives/?id=&folder_id=9987 (accessed: 25.03.2025) (In Russ)
4. Piramatov U.A., Pugin K.G. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods for diagnosing hydraulic drive of road construction machines. *Technique and technology of transport*. 2019; 13: 20. URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-20TKR.19.pdf> (accessed: 25.03.2025) (In Russ)
5. Piramatov U.A., Pugin K.G. Correction of methods of diagnostics of hydraulic systems of road

construction machines. *Construction and road building machines*. 2019; 5: 37–41. (In Russ)

6. Arkhipenko M.Yu., Stroganova N.V. Modeling of the process of diagnostics of gear pumps. *Vestnik SibADI*. 2008; 4 (10): 69-74. (In Russ)

7. Rynkevich S.A., Khadkevich I.Yu. Experimental studies of physical properties of hydraulic drive of mobile machine. *Belarusian-Russian University Bulletin*. 2015; 4: 68-78. (In Russ)

8. Chilikin A.A., Trushin N.N. Comparative analysis of modern methods of hydraulic systems condition diagnostics. *Izvestiya Tula State University*. 2014; 3: 117–127. (In Russ)

9. Pyanzov S.V. Methodology of dynamic estimation of technical condition of volumetric hydraulic drives. *Izvestiya St. Petersburg State Agrarian University*. 2019; 2 (55):184–191. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12184>

10. Maksimenko A.N., Antipenko G.L., Bezdnikov D.V., Kutuzov V.V. Improvement of serviceability of hydraulic drive of construction and road building machines. *Belarusian Russian University Bulletin*. 2007; 4: 24–30. (In Russ)

11. Felix Ng., Jennifer A. Harding, Jacqueline Glass. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017; 83: 176–193.

12. Blum K.H., Ellenrieder K. Validated Hydraulic Fluids for Increased Hydraulic Life. *ATZoffhighway worldwide*. 2017; T. 10. no. 1: 50-55.

13. Hydraulic fluids: Controlling contamination in hydraulic fluids. *Filtration & Separation*. 2010; Vol. 47, no 3 (May-June 2010): 28-30.

14. Zorin V.A., Nguyen Trong M. Prediction of residual life of hydraulic motors of construction machines by results of simulation. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2023;3: 15-19. (in Russ) DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-15-19

15. Zhmurov V.V., Kobzov A.Y.U., Kobzova I.O., Gerasimov S.V., Zhuk E.A. Tools for portable and built-in diagnostics of hydraulic power cylinders of machines based on load-bearing capacity parameters. *Mechanical engineers to XXI cen*. 2024; 23: 132-139. (in Russ) URL https://elibrary.ru/download/elibrary_67315115_84265878.pdf. (accessed: 22.04.2025).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесковец И.В. – математический расчет, оформление графической и табличной информации, написание и оформление статьи

Грац А.А. – анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по методикам, оборудованию и концепциям проведения диагностирования гидропривода мобильных машин и его элементов

Рогожин В.Д. – Постановка задач исследования, анализ полученных результатов, разработка заключения, обсуждение полученных результатов

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Leskovets I.V. *Mathematical calculation, graphic and tabular design, writing and formatting the article*

A.A. Gratz *Domestic and foreign scientific work analysis on methods, equipment and diagnostic concepts of hydraulic drive of mobile machines and its elements*

V.D. Rogozhin *Setting the research objectives, analysis and discussion of the obtained results, conclusion development.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесковец Игорь Вадимович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Межгосударственного образовательного учреждения «Белорусско-Российский университет» (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author: ID 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-код: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Грац Александр Андреевич – инженер, Республиканское унитарное предприятие «Национальный аэропорт Минск» Республика Беларусь, г. Минск, тер. Национального аэропорта Минск.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3954-9602>,

e-mail: grats1975@bk.ru

Рогожин Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, доц., декан инженерного факультета заочного образования Межгосударственного образовательного учреждения «Белорусско-Российский университет» (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7270-5438>,

e-mail: vd-al@yandex.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Leskovets – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Transport and Technological Machines” Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author: ID 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-code: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Alexander A. Grats – engineer, Republican Unitary Enterprise “Minsk National Airport” (Territory of Minsk National Airport, Minsk, Republic of Belarus).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3954-9602>

e-mail: grats1975@bk.ru

Vladimir D. Rogozhin – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of Engineering Faculty of Correspondence Education, Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7270-5438>,

e-mail: vd-al@yandex.by