

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 62-82:532.5

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.373-387

Оригинальная статья



Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства

П. А. Ионов¹, П. В. Сенин¹, А. М. Земсков¹✉,
С. В. Пьянзов¹, В. В. Салмин²

¹ *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)*

² *Пензенский государственный университет
(г. Пенза, Российская Федерация)*

✉ zam503@mail.ru

Аннотация

Введение. Заводы-изготовители российских и зарубежных объемных гидроприводов рекомендуют использовать для своих гидроагрегатов гидравлические масла (рабочую жидкость) определенных производителей: Lukoil, Gazpromneft, Mobil, Hydrau Gard, SHELL, Total и др. Масла имеют различные физико-химические свойства из-за различного набора присадок в своем составе. Однако изменения данных свойств в процессе эксплуатации являются негативным фактором. В связи с этим физико-химические свойства рабочей жидкости будут оказывать влияние на определение параметров диагностирования, а именно на их точность и достоверность. Поэтому в стендовом оборудовании при контроле технического состояния объемных гидроприводов необходимо использовать гидравлическое масло, которое будет обеспечивать постоянство физико-химических свойств. Для выбора рабочей жидкости, позволяющей определять параметры диагностирования новых и имеющих наработку объемных гидроприводов российского и зарубежного производства с минимальной погрешностью, необходимо проведение экспериментальных исследований.

Цель статьи. Определить закономерности изменения параметров диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства в зависимости от температуры рабочей жидкости.

Материалы и методы. В качестве рабочей жидкости использовались гидравлические масла МГЕ-46В и SHELL TELLUS S2 V46, рекомендованные заводами-изготовителями для объемных гидроприводов ГСТ-90, ГСТ-112 и Danfoss Power Solutions серии 90 соответственно. За анализируемые параметры диагностирования были

© Ионов П. А., Сенин П. В., Земсков А. М., Пьянзов С. В., Салмин В. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

приняты объемный КПД и крутящий момент, развиваемые объемными гидроприводами в процессе эксперимента. Испытания проводили на специализированном стендовом оборудовании в соответствии с требованиями (методикой) заводов-изготовителей. *Результаты исследования.* Экспериментальные исследования показали, что изменение температуры рабочей жидкости оказывает значительное влияние на точность диагностируемых параметров исследуемых гидроагрегатов. Установлено, что рабочая жидкость SHELL TELLUS S2 V46 позволяет достоверно определять диагностические параметры новых и имеющих наработку российских гидроагрегатов. Для рабочей жидкости МГЕ-46В получены оптимальные температурные диапазоны, равные 60...69 °С, при испытании новых и имеющих наработку зарубежных гидроагрегатов Danfoss Power Solutions серии 90.

Обсуждение и заключение. Установлено, что рабочая жидкость МГЕ-46В в оптимальных температурных диапазонах позволяет обеспечить полноту диагностирования новых и имеющих наработку российских и зарубежных гидроагрегатов с высокой точностью в соответствии с требованиями ГОСТ 17108 и заводов-изготовителей. Поэтому данное гидравлическое масло можно применять как универсальную рабочую жидкость для контроля технического состояния разномарочных гидроагрегатов на ремонтных предприятиях.

Ключевые слова: объемный гидропривод, техническое состояние, гидронасос, гидромотор, рабочая жидкость, тормозной момент, параметры диагностирования, стенд, температура

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Для цитирования: Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 373–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>

Original article

Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production

P. A. Ionov^a, P. V. Senin^a, A. M. Zemskov^a✉, S. V. Pyanzov^a, V. V. Salmin^b

^a *National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

^b *Penza State University (Penza, Russian Federation)*

✉ zam503@mail.ru

Abstract

Introduction. Russian and foreign manufacturers of volumetric hydraulic drives recommend using hydraulic oils (working fluid) from certain manufacturers for their hydraulic units: Lukoil, Gazpromneft, Mobil, Hydrau Gard, SHELL, Total, etc. The oils have different physicochemical properties, because of different additive packages in their composition. However, changes in these properties during operation are a negative factor. In this regard, the physicochemical properties of the power fluid will affect the determination of diagnostic parameters, namely their accuracy and reliability. Therefore, when monitoring the technical condition of volumetric hydraulic drives in bench equipment, it is necessary to use hydraulic oil, with

constant physico-chemical properties. To select power fluid for determining the parameters of diagnosing new and existing volumetric hydraulic drives of Russian and foreign production with a minimum error, it is necessary to conduct experimental studies.

Aim of the Article. The study was aimed at determining the dependence of changes in the parameters of diagnosing new and operating hydraulic units of Russian and foreign production on the power fluid temperature.

Materials and Methods. As power fluid there were used Hydraulic oils MGE-46B and SHELL TELLUS S2 V46 recommended by manufacturers for volumetric hydraulic drives HST-90, HST-112 and Danfoss Power Solutions 90-series respectively. During the experiment, the volume efficiency and torque of volumetric hydraulic drives were tested as diagnostic parameters. The tests were carried out on specialized bench equipment in accordance with the requirements (methodology) of the manufacturers.

Results. Experimental studies presented in the article have shown that the changes in the temperature of the power fluid affect significantly the accuracy of the diagnosed parameters of hydraulic units under study. It was found that the power fluid SHELL TELLUS S2 V46 allows reliably determining the diagnostic parameters of new and having operating time domestic hydraulic units. Optimal temperature ranges equal to 60...69 °C were obtained for power fluid – MGE-46V when testing new and having operating time foreign hydraulic units Danfoss Power Solutions 90-series.

Discussion and Conclusion. It has been found that the power fluid MGE-46B in optimal temperature ranges ensures the completeness and high accuracy of diagnosing new and having operating time hydraulic units of Russian and foreign production in accordance with the requirements of GOST 17108 and manufacturers. Therefore, this hydraulic oil can be used as a universal power fluid for monitoring the technical condition of various hydraulic units at repair enterprises.

Keywords: volumetric hydraulic drive, technical condition, hydraulic pump, hydraulic motor, power fluid, braking torque, diagnostic parameters, stand, temperature

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: The authors would like to thank the anonymous reviewers.

For citation: Ionov P.A., Senin P.V., Zemskov A.M., Pyanzov S.V., Salmin V.V. Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):373–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>

Введение

В гидравлических системах объемных гидроприводов в качестве рабочей жидкости (РЖ) применяется гидравлическое масло, что обеспечивает безотказную работу и преждевременный износ его деталей [1–3]. Выбор РЖ осуществляется с учетом требований заводоизготовителей объемных гидроприводов¹.

Основными производителями российских и зарубежных РЖ являются

Lukoil, Gazpromneft, Bashneft, Rosneft, SHELL, Mobil, Hydrau Gard, Castrol, Total и другие². Данные масла имеют различные физико-химические свойства из-за разнообразного набора присадок в своем составе (антикоррозионных, антиокислительных, противоизносных, загущающих и т. д.)³. Поэтому актуальной задачей является выбор РЖ, которая будет использоваться в стендовом оборудовании для диагностики новых

¹ ОАО «Пневмостроймашина». Каталог гидравлического оборудования. Екатеринбург, 2018. 52 с.; Technical Information Axial Piston Pumps Series 90. Sauer-Danfoss Company. Germany, March 2016. 91 p.;

² Масло гидравлическое МГЕ-46В [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oilright.ru/?item=104&page=catalogitem> (дата обращения: 10.05.2023); Гидравлическое масло Shell Tellus S2 V46 [Электронный ресурс]. URL: <https://market.shell/product/gidravlichesкое-maslo-shell-tellus-s2-v-46-20-1/> (дата обращения: 10.05.2023).

³ ГОСТ 17108-86. Гидропривод объемный и смазочные системы. Методы измерения параметров [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200013746> (дата обращения: 10.05.2023); Technical Information Axial Piston Motors Series 90. Sauer-Danfoss Company. Germany, January 2017. 32 p.

и имеющих наработку объемных гидроприводов российского и зарубежного производства [4; 5].

Перечислим основные критерии выбора РЖ для достоверного контроля технического состояния объемных гидроприводов в условиях ремонтного производства.

Во-первых, заводы-изготовители объемных гидроприводов в качестве РЖ рекомендуют применять гидравлические масла с разными характеристиками: для российских гидроагрегатов – МГЕ-46В по ГОСТ 17479.3-85 (используется при рабочем давлении до 35 МПа, с кратковременным повышением до 42 МПа), для зарубежных гидроагрегатов – *Hydrau Gard 46 Plus* или *SHELL TELLUS S2 V46* по ISO-11158 (используются при рабочем давлении до 42 МПа, с кратковременным повышением до 48 МПа) [6; 7].

Во-вторых, стендовое оборудование будет использовано для контроля технического состояния российских и зарубежных объемных гидроприводов, параметры диагностирования которых различны [8; 9].

В-третьих, стендовые испытания гидроагрегатов, по требованиям заводов-изготовителей, проводятся при следующих температурах РЖ: для МГЕ-46В – 50 ± 5 °С, для *SHELL TELLUS S2 V46* – 80 ± 5 °С, однако вязкость при этом значительно изменяется и приводит к снижению точности определения параметров диагностирования [10–12].

Цель исследования – определить закономерности изменения параметров диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства от температуры РЖ.

Обзор литературы

В работах [13; 14] представлено исследование влияния температуры гидравлического масла на производительность шестеренного насоса. Исследования заключались в определении объемной

подачи насоса при различных температурах гидравлического масла, для условий переменной скорости и давления. Наиболее эффективная работа шестеренного насоса обеспечивается до температуры 60 °С. Данные исследования позволяют определить только условия применения шестеренных насосов в гидравлических системах машин.

В научной статье [15] представлены исследования связи вязкости всесезонных гидравлических масел с производительностью гидравлических насосов. Определены внутренние потери потока гидравлической жидкости в гидронасосе, гидромоторе, регуляторе потока и предохранительном клапане при различных значениях давления, частоты вращения и температуры. Результаты исследований показали, что вязкость всесезонных гидравлических масел линейно снижается на протяжении всего периода испытаний. Однако внутренние потери потока в гидронасосе не показали статистически значимого увеличения при снижении вязкости. Кроме того, снижения крутящего момента и входной мощности гидравлических насосов являются более значимыми показателями всесезонных гидравлических масел, чем производительность.

В работах [16; 17] описаны результаты использования гидравлических масел с наночастицами оксида цинка ZnO для прогнозирования вязкости. Согласно лабораторным результатам, в температурном диапазоне от 25...50 °С и концентрациях наночастиц в диапазоне 0,125...1,5 % наблюдается увеличение коэффициента теплопередачи. Из результатов следует, что оптимальной является объемная концентрация ZnO – 1 %, при которой коэффициент тепловых характеристик увеличивается с повышением температуры и имеет максимальное значение. Однако отсутствуют данные применения данного гидравлического масла с наночастицами в объемном гидроприводе.

Исследования по подбору вязкостных присадок для гидравлических масел методом проведения экспериментов и обработки полученных результатов представлены в работах [18–20]. Определялось оптимальное содержание присадки для получения масел уровней вязкости *ISO VG 32* и *ISO VG 46*. Установлено, что высокая гидравлическая эффективность наблюдается при числах Рейнольдса от 500 000 до 700 000. Увеличение концентрации присадки более 40 частей на объем снижает эффективность, что связано с возникновением турбулентного потока. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях по разработке гидравлических масел уровня *HVLP*.

Таким образом, из проведенного анализа представленных работ и [21; 22] можно сделать вывод, что ни одно из представленных исследований не позволяет достигнуть заявленной цели. Поэтому предлагается провести собственные стендовые испытания новых и бывших в эксплуатации гидроагрегатов российского (ГСТ-90) и зарубежного (*Danfoss Power Solutions* серии 90) производства с рекомендованными гидравлическими маслами. Данные исследования позволяют определить закономерности изменения

параметров диагностирования от марки и температуры гидравлических масел.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на стендовом специализированном оборудовании, разработанном авторским коллективом МГУ им. Н. П. Огарева [2; 23].

На первом этапе было определено влияние свойств РЖ на параметры диагностирования широко представленных в Республике Мордовия гидроагрегатов российского (ГСТ-90, ГСТ-112) и зарубежного (*Danfoss Power Solutions*) производства, которые используются для сельскохозяйственной, дорожно-строительной и другой техники [24].

В качестве РЖ применяли гидравлические масла МГЕ-46В [6] и *SHELL TELLUS S2 V46* [7], рекомендованные заводами-изготовителями объемных гидроприводов. Физико-химические характеристики рекомендованных гидравлических масел рассмотрены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что кинематическая вязкость представленных гидравлических масел при увеличении температуры от +40 до +100 °С уменьшается: для РЖ МГЕ-46В – на 85 %; для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* – на 83 %.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Физико-химические характеристики гидравлических масел
Physico-chemical characteristics of hydraulic oils

Свойство / Features	МГЕ-46В / MGE-46B	Shell Tellus S2 V46
Класс вязкости по ISO / Viscosity class according to ISO	46,0	46,0
Тип жидкости по ISO / Type of liquid according to ISO	HH/HL	HV
Кинематическая вязкость, мм ² /с / Kinematic viscosity, mm ² /s		
0°С	639,0	600,0
+40°С	41,4...50,6	46,0
+100°С	7,0	7,9
Индекс вязкости / Viscosity index	90,0	143,0
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	875,0	872,0
Температура воспламенения, °С / Ignition temperature, °С	190,0	225,0
Температура замерзания, °С / Freezing point, °С	-32,0	-36,0

Физический показатель «индекс вязкости РЖ» определяет значение вязкости от температуры. То есть данный индекс для МГЕ-46В имеет наименьшее значение, а для *SHELL TELLUS S2 V46* – наибольшее соответственно. Благодаря этому РЖ производства *SHELL* в процессе стендовых испытаний обеспечит определение параметров диагностирования с большей точностью и достоверностью.

Дальнейшие исследования авторов были направлены на определение степени влияния величины температуры РЖ и на параметры диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства. За анализируемые параметры диагностирования принимали объемный КПД и крутящий момент, развиваемые объемными гидроприводами в процессе эксперимента.

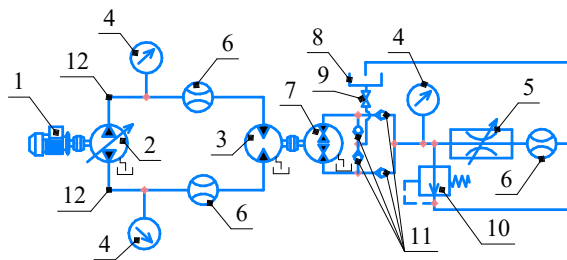
Для этого были подготовлены комплекты объемных гидроприводов ГСТ-90 [8] и *Danfoss Power Solutions* серии 90 [9], технические характеристики которых удовлетворяли требованиям заводов-изготовителей. Испытания объемных гидроприводов на стендовом оборудовании проводили, согласно гидравлической схеме, представленной на рисунке 1.

В процессе испытания контролировали следующие параметры, развиваемые гидроагрегатами объемного гидропривода: частоту вращения (об/мин); давление в линиях управления и нагнетания (МПа); подачу и расход (л/мин) в линиях нагнетания; температуру (°С) РЖ; выходной крутящий момент (Н·м); объемный КПД.

Испытания проводили при номинальных значениях частоты вращения и давления в линии нагнетания гидроагрегатов в соответствии с требованиями заводов-изготовителей. Переменными в эксперименте принимались такие параметры объемного гидропривода, как давление в линиях нагнетания и управления; частота вращения приводных валов, подача (расход) РЖ.

Исследования начинали от минимального значения температуры РЖ в линиях нагнетания, установленного заводами-изготовителями объемного гидропривода +45 °С с последующим пошаговым увеличением +5 °С до максимального значения +85 °С.

Для ГСТ-90 и ГСТ-112 эксперимент проводили при температуре РЖ от +45...+55 °С до +85 °С [8]. Для объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 эксперимент проводили при



Р и с. 1. Гидравлическая схема стендового оборудования: 1 – электродвигатель; 2 и 3 – испытуемые гидронасос и гидромотор объемного гидропривода; 4 – манометры; 5 – дроссель; 6 – расходомеры; 7 – гидронасос гидравлического нагружающего устройства; 8 – гидробак гидравлического нагружающего устройства; 9 – вентиль; 10 и 11 – предохранительный и обратные клапаны; 12 – линии нагнетания

Fig. 1. Hydraulic scheme of bench equipment: 1 – electric motor; 2 and 3 – tested hydraulic pump and hydraulic motor of volumetric hydraulic drive; 4 – pressure gauges; 5 – throttle; 6 – flow meters; 7 – hydraulic pump of hydraulic loading device; 8 – hydraulic tank of hydraulic loading device; 9 – valve; 10 and 11 – safety and check valves; 12 – discharge lines

температуре РЖ от +60 °С до +85 °С [9]. Заводом-изготовителем за критерий предельного состояния гидроагрегатов принято снижение величины объемного КПД от 20 % [4; 5].

Результаты исследования

Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в таблице 2, а также на рисунках 2 и 3.

Анализ таблицы 2 показал, что в рабочем диапазоне температур +45...+55 °С объемный КПД новых гидронасосов ГСТ-90 при стендовых испытаниях с РЖ МГЕ-46В составляет 0,954...0,952, для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* – 0,958...0,956 (снижение на 0,2 %).

Крутящий момент новых гидромоторов ГСТ-90 при той же температуре находится в диапазонах 324...322 Н·м (снижение на 0,62 %) для гидравлического масла МГЕ-46В и 325...324 Н·м (снижение на 0,3 %) для *SHELL TELLUS S2 V46* соответственно.

Испытания имеющих наработку гидронасосов и гидромоторов показали, что для РЖ МГЕ-46В объемный КПД гидронасоса составляет 0,73...0,7 (снижение на 3,6 %), крутящий момент гидромотора при этом составляет 317...310 Н·м (снижение на 2,2 %), для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* объемный КПД составляет 0,72...0,71 (снижение на 1,4 %), крутящий момент гидромотора составляет 317...314 Н·м (снижение на 0,96 %).

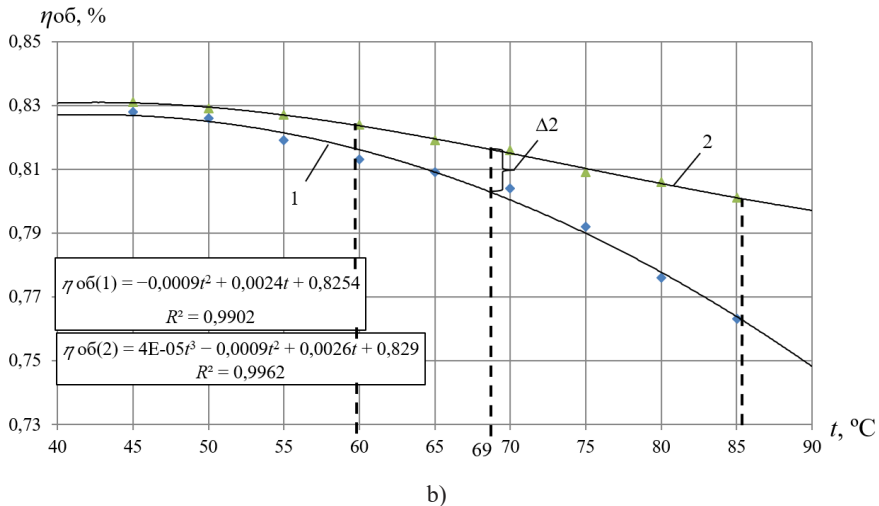
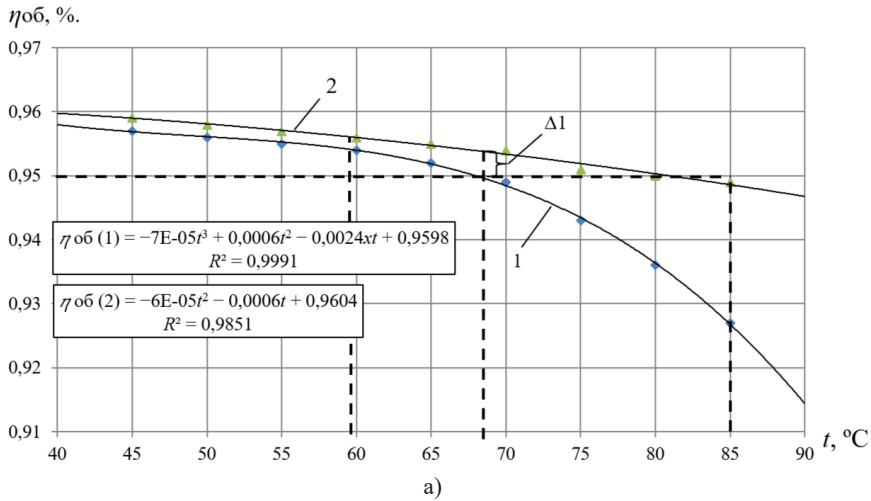
Следовательно, наибольшая погрешность определения объемного КПД и крутящего момента для новых и имеющих наработку гидронасосов и гидромоторов ГСТ-90 с учетом температуры +55 °С достигается для РЖ МГЕ-46В в первом случае 0,2 % и 0,62 %, во втором – 2,2 % и 3,6 %. Поэтому РЖ зарубежного производителя *SHELL* в процессе стендовых испытаний обеспечит определение параметров диагностирования гидроагрегатов с большей достоверностью.

Таблица 2

Table 2

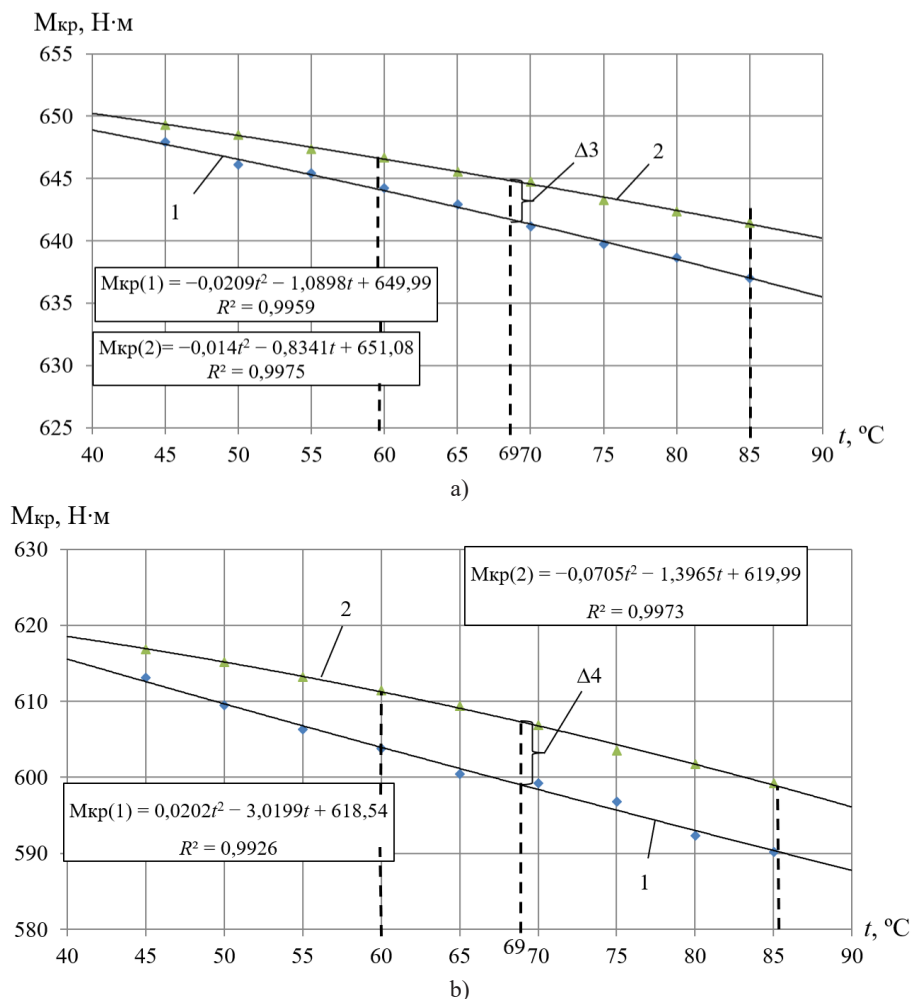
Зависимость объемного КПД и крутящего момента нового и имеющего наработку гидроагрегатов ГСТ-90 от температуры с исследуемыми марками гидравлических масел
The dependence of the volumetric efficiency and torque of the new and having operating time hydraulic units GST-90 on the temperature with the studied brands of hydraulic oils

Температура, °С / Temperature, °С	Новый объемный гидропривод ГСТ-90 / New volumetric hydraulic drive GST-90				Бывший в эксплуатации объемный гидропривод ГСТ-90 / Used volumetric hydraulic drive GST-90			
	Объемный КПД / Volumetric efficiency		Крутящий момент / Torque		Объемный КПД / Volumetric efficiency		Крутящий момент / Torque	
	Марки гидравлических масел / Brands of hydraulic oils				Марки гидравлических масел / Brands of hydraulic oils			
	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>
40	0,955	0,958	325,50	325,67	0,726	0,730	319,03	318,88
45	0,955	0,957	325,43	325,65	0,723	0,728	316,85	317,41
50	0,954	0,956	323,84	325,01	0,710	0,724	313,69	316,17
55	0,953	0,955	322,25	324,05	0,697	0,712	310,32	314,24
60	0,945	0,954	320,66	323,90	0,665	0,702	308,74	312,32
65	0,936	0,952	319,07	322,46	0,636	0,684	306,75	310,29
70	0,927	0,945	317,48	320,98	0,593	0,656	304,07	308,95
75	0,907	0,934	315,83	319,49	0,547	0,628	301,83	306,43
80	0,891	0,925	314,31	318,01	0,525	0,604	298,96	304,67
85	0,870	0,901	312,73	316,53	0,486	0,586	296,62	302,11



Р и с. 2. Результаты определения объемного КПД нового (а) и имеющего наработку (б) гидронасоса объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 с исследуемыми марками гидравлических масел в зависимости от температуры: 1 – кривая определения объемного КПД для нового и имеющего наработку гидронасоса с РЖ МГЕ-46В; 2 – кривая определения объемного КПД для нового и имеющего наработку гидронасоса с РЖ *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_1 и Δ_2 – величины погрешностей определенной объемного КПД при температуре +69 °С для нового и имеющего наработку гидронасоса между исследуемыми марками гидравлических масел

Fig. 2. The results of determining the volumetric efficiency of the new a) and operating time b) hydraulic pump of the *Danfoss Power Solutions* 90-series volumetric hydraulic drive with the brands of hydraulic oils under study, depending on temperature: 1 – curve of determining the volumetric efficiency for the new and having operating time hydraulic pump with WF MGE-46V; 2 – curve of determining the volumetric efficiency for the new and having operating time hydraulic pump with *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_1 and Δ_2 – values of errors in determining the volumetric efficiency at a temperature of +69°C for a new and having operating hydraulic pump between the brands of hydraulic oils under study



Р и с. 3. Результаты определения крутящего момента нового (а) и имеющего наработку (б) гидромотора объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 с исследуемыми марками гидравлических масел в зависимости от температуры: 1 – кривая определения крутящего момента нового и имеющего наработку гидромотора с РЖ МГЕ-46В; 2 – кривая определения крутящего момента нового и имеющего наработку гидромотора с РЖ *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_3 и Δ_4 – величины погрешностей определенная крутящего момента при температуре $+69^\circ\text{C}$ для нового и имеющего наработку гидромотора между исследуемыми марками гидравлических масел

F i g. 3. The results of determining the torque of a new a) and having operating time b) hydraulic motor volume hydraulic drive *Danfoss Power Solutions* 90-series with the brands of hydraulic oils under study, depending on temperature: 1 – curve of determining the torque of a new and operating time hydraulic motor with WF MGE-46V; 2 – curve of determining the torque of a new and having operating time hydraulic motor with WF *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_3 and Δ_4 – values of the errors of the torque measurement at a temperature of $+69^\circ\text{C}$ for a new and having operating hydraulic motor between the brands of hydraulic oils under study

Из рисунка 2 следует вывод, что в рабочем диапазоне температур $+60...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ объемный КПД новых гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 при стендовых испытаниях с РЖ зарубежного производителя *SHELL TELLUS S2 V46* составляет $0,96...0,95$ (снижение на $1,05\%$), что не противоречит нормам завода-изготовителя [5], для РЖ российского производителя МГЕ-46В – $0,95...0,93$ (снижение на $2,2\%$).

Испытания имеющих наработку гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 показали, что для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* объемный КПД составляет $0,82...0,80$ (снижение на $2,5\%$), для РЖ МГЕ-46В – $0,81...0,76$ (снижение $6,6\%$).

Для РЖ МГЕ-46В предельная (максимальная) температура, равная $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствует паспортному значению объемного КПД – $0,95$ гидронасоса *Danfoss Power Solutions* серии 90.

Наибольшая погрешность определения объемного КПД для новых и бывших в эксплуатации гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 между исследуемыми марками гидравлических масел составляет $\Delta_1 = 0,5\%$ и $\Delta_2 = 1,4\%$ при температуре $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$. С увеличением температуры до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешность определения объемного КПД для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* и МГЕ-46В увеличивается и составляет $2,4\%$ и $5,0\%$ соответственно.

Из рисунка 3 следует, что в рабочем диапазоне температур $+60...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ крутящий момент новых гидромоторов *Danfoss Power Solutions* серии 90 в при стендовых испытаниях с РЖ зарубежного производителя *SHELL TELLUS S2 V46* составляет $647...642\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $0,78\%$), для РЖ российского производителя МГЕ-46В – $645...637\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $1,3\%$).

Испытания имеющих наработку гидромоторов *Danfoss Power*

Solutions серии 90 показали, что для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* крутящий момент гидромотора составляет $612...599\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $2,1\%$), для РЖ МГЕ-46В – $604...590\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $2,4\%$).

Наибольшая погрешность определения крутящего момента для новых и бывших в эксплуатации гидромоторов *Danfoss Power Solutions* серии 90 между исследуемыми марками гидравлических масел составляет $\Delta_3 = 0,4\%$ и $\Delta_4 = 1,3\%$ при температуре $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С увеличением температуры до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешность определения крутящего момента для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* и МГЕ-46В увеличивается и составляет $0,8\%$ и $1,5\%$ соответственно. Согласно данным исследованиям, гидравлическое масло марки МГЕ-46В в рабочем температурном диапазоне $+60...+69\text{ }^{\circ}\text{C}$ является годным для определения объемного КПД и крутящего момента гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90.

Обсуждение и заключение

Полученные в статье результаты показали, что разномарочные гидравлические масла, в настоящее время используемые в качестве РЖ, оказывают влияние на достоверность определения параметров диагностирования различных объемных гидроприводов российского и зарубежного производства.

Установлено, что РЖ МГЕ-46В в оптимальных температурных диапазонах $+60...+69\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет обеспечить полноту диагностирования новых и имеющих наработку российских и зарубежных гидроагрегатов с высокой точностью в соответствии с требованиями ГОСТ 17108 и заводов-изготовителей. Поэтому данное гидравлическое масло можно, применять как универсальную РЖ для контроля технического состояния разномарочных гидроагрегатов на ремонтных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности использования метода тепловой диагностики гидростатической трансмиссии лесозаготовительных машин / А. В. Латынин [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 2, № 2 (36). С. 42–49. URL: <https://naukaru.ru/ru/storage/viewWindow/83009> (дата обращения: 11.06.2023).
2. Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 529–545. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>
3. Пугин К. Г., Шаякбаров И. Э. Повышение надежности гидравлических систем строительных и дорожных машин, эксплуатируемых в зимний период времени в арктической зоне РФ // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 1. С. 154–162. EDN: QTJVZV
4. Моделирование связи крутящего момента объемного гидропривода с параметрами гидравлического нагружающего устройства / С. В. Пьянзов [и др.] // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 72–82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-otsenki-tehnicheskogo-sostoyaniya-obemnogo-gidroprivoda/viewer> (дата обращения: 11.06.2023).
5. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump / S. Lijian [et al.] // Renewable Energy. 2020. Vol. 153. P. 1455–1464. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>
6. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines / A. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. Article no. 042086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
7. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation / M. N. Kostomakhin [et al.] // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, Issue 4. P. 360–364. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>
8. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П. В. Чумаков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 426–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
9. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks / E. V. Pestryakov [et al.] // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2022. Vol. 121. P. 92–101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9
10. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 99. P. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
11. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses / A. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
12. Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей, восстановленных с применением нанокomпозиционного гальванического железнения / В. В. Сафонов [и др.] // Научная жизнь. 2019. № 2. С. 43–50. <https://doi.org/10.26088/INOB.2019.90.30271>
13. Effect of Temperature Change on Hydraulic Oil Luminescence / B. Duan [et al.] // Journal of Harbin Engineering University. 2020. Vol. 41, Issue 12. P. 1785–1789. <https://doi.org/10.11990/jheu.201904082>
14. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance / Ł. Stawiński [et al.] // Eksploatacja i Niezawodność. 2022. Vol. 24, Issue 2. P. 289–296. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.2.10>
15. Temporary and Permanent Viscosity Loss Correlated to Hydraulic System Performance / P. W. Michael [et al.] // Tribology Transactions. 2018. Vol. 61, Issue 5. P. 901–910. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1439210>
16. Thermo-hydraulic Performance of a Lubricant Containing Zinc Oxide Nano-particles: A Two-phase Oil / Z. Li [и др.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020. Vol. 142, Issue 11. P. 107–112. <https://doi.org/10.1115/1.4047256>

17. Direct Driven Hydraulic Drive: Effect of Oil on Efficiency in Sub-Zero Conditions / Т. Minav [et al.] // *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 2. P. 219. <https://doi.org/10.3390/en12020219>
18. Study Effect of Antiturbulence Additives on Hydraulic Efficiency in Oil Pipelines by Disk Turborheometer / А. М. Nechval [et al.] // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021. Vol. 12, Issue 4. P. 0402161-1–0402161-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000610)
19. High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil-Hydraulic Pipe Flow / М. Jansson [et al.] // *Fluids*. 2022. Vol. 7, Issue 3. <https://doi.org/10.3390/fluids7030102>
20. Исследования по подбору отечественной вязкостной присадки для всепогодных гидравлических масел уровня HVLP / Л. А. Радченко [и др.] // *Мир нефтепродуктов*. 2020. № 5. С. 45–49. <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2020-0-5-45-49>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control // *Measurement and Control*. 2020. Vol. 53, Issue 1–2. P. 119–125. <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids / Z. Tkac [et al.] // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 1. P. 149–155. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
23. Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов / С. В. Пьянзов [и др.] // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 4. С. 500–517. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
24. Влияние температуры рабочей жидкости на объемный коэффициент полезного действия аксиально-поршневого гидронасоса / С. В. Пьянзов [и др.] // *Пермский аграрный вестник*. 2018. № 4 (24). С. 9–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperatury-rabochey-zhidkosti-na-obemnyy-koeffitsient-poleznogo-deystviya-aksialno-porshnevo-go-gidronasosa/viewer> (дата обращения: 11.06.2023).

Поступила 13.06.2023; одобрена после рецензирования 27.07.2023; принята к публикации 10.08.2023.

Об авторах:

Ионов Павел Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор, первый проректор Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Земсков Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Пьянзов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Салмин Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, Researcher ID: Q-9667-2017, salmin-penza@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

П. А. Ионов – формирование структуры статьи, доработка начального варианта текста статьи, проведение и описание экспериментальных исследований, составление выводов и заключения.

П. В. Сенин – научное руководство, анализ и доработка текста статьи.

А. М. Земсков – анализ литературных данных, подготовка текста статьи с последующей доработкой, проведение и описание экспериментальных исследований, оптимизация регрессионных моделей, обработка полученных результатов исследования статьи.

С. В. Пьянзов – проведение экспериментальных исследований.

В. В. Салмин – анализ литературных данных и доработка текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Latynin A.V., Shvyriov A.N., Kondratenko I.Yu., Andreisheva I.S. Features of Thermal Diagnosis Method For Hydrostatic Transmission of Forest Machines. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2021;2(2):42–49. Available at: <https://naukaru.ru/ru/storage/viewWindow/83009> (accessed 11.06.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., Stolyarov A.V., Zemskov A.M. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(4):529–545. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

3. Pugin K.G., Shayakbarov I.E. Improving the Reliability of Hydraulic Systems of Construction and Road Vehicles Operated in Winter in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2022;(1):154–162. (In Russ.) EDN: QTJVZV

4. Pyanzov S.V., Ionov P.A., Velichko S.A., Zemskov A.M. Modeling of the Coupling of the Torque of a Volumetric Hydraulic Drive with the Parameters of a Hydraulic Loading Device. *Technical Service of Machines*. 2021;(1):72–82. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-otsenki-technicheskogo-sostoyaniya-obemnogo-gidroprivoda/viewer> (accessed 11.06.2023). (In Russ.)

5. Lijian S., Wenpeng Z., Haifeng J., Fangping T., Li W., Dandan S., et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump. *Renewable Energy*. 2020;153:1455–1464. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>

6. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., Polyaniin I.A., Abibekov S.A., Lysyannikov A.V., et al. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:042086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>

7. Kostomakhin M.N., Kataev Y.V., Petrishchev N.A., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation. *Russian Engineering Research*. 2022;42(4):360–364. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>

8. Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., Petrishehev N.A. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):426–447. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>

9. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022;121:92–101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

10. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019;99:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>

11. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K., et al. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
12. Safonov V.V., Shishurin S.A., Gorbushin P.A., Paramonov S.V., Khaikin A.A. Results of Bench Tests of Hydraulic Valves Restored Using Nanocomposition Galvanic Iron Plating. *Scientific Life*. 2019;(2):43–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26088/INOB.2019.90.30271>
13. Duan B., Jiang J., Zhang J., Hu Z., Che M. Effect of Temperature Change on Hydraulic Oil Luminescence. *Journal of Harbin Engineering University*. 2020;41(12):1785–1789. <https://doi.org/10.11990/jheu.201904082>
14. Stawiński L., Kosucki A., Cebulak M., Gorski A.G., Grala M. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance. *Eksploracja i Niezawodność*. 2022;24(2):289–296. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.2.10>
15. Michael P., Cheekolu M., Panwar P., Devlin M., Davidson R., Johnson D., et al. Temporary and Permanent Viscosity Loss Correlated to Hydraulic System Performance. *Tribology Transactions*. 2018;61(5):901–910. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1439210>
16. Li Z., D’Orazio A., Karimipour A., Bach Q.V. Thermo-Hydraulic Performance of a Lubricant Containing Zinc Oxide Nano-Particles: A Two-Phase Oil. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2020;142(11):107–112. <https://doi.org/10.1115/1.4047256>
17. Minav T., Heikkinen J., Schimmel T., Dietola M. Direct Driven Hydraulic Drive: Effect of Oil on Efficiency in Sub-Zero Conditions. *Energies*. 2019;12(2):219. <https://doi.org/10.3390/en12020219>
18. Nechval A.M., Muratova V.I., Valeev A.R., Yang Ch., Tashbulatov R.R. Study Effect of Antiturbulence Additives on Hydraulic Efficiency in Oil Pipelines by Disk Turborheometer. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021;12(4):0402161-1–0402161-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000610)
19. Jansson M., Andersson M., Karlsson M. High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil-Hydraulic Pipe Flow. *Fluids*. 2022;7(3). <https://doi.org/10.3390/fluids7030102>
20. Radchenko L.A., Morshanskaya Yu.A., Beskova A.V., Zhumlyakova M.A., Tyschenko V.A. Studies on the Selection of Domestic Viscosity Additives for Multi-Grade Hydraulic Oils HVLP. *The World of Petroleum Products*. 2020;(5):45–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2020-0-5-45-49>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Y. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load Sensing Synchronous Control. *Measurement and Control*. 2020;53(1–2):119–125. <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Tkáč Z., Kosiba J., Hujo L., Jablonický J., Nosian J. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids. *Tribology in Industry*. 2018;40(1):149–155. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
23. Pyanzov S.V., Senin P.V., Ionov P.A., Jabloniky J., Nosian J. Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):500–517. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
24. Pyanzov S.V., Stolyarov A.V., Ionov P.A., Zemskov A.M. The Effect of the Temperature of the Working Fluid on the Volumetric Efficiency of the Axial Piston Hydraulic Pump. *Perm Agrarian Bulletin*. 2018;(4):9–16. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperatury-rabochey-zhidkostina-obemnyy-koeffitsient-poleznogo-deystviya-aksialno-porshnevoogo-gidronasosa/viewer> (accessed 11.06.2023). (In Russ.)

Submitted 13.06.2023; revised 27.07.2023; accepted 10.08.2023.

About the authors:

Pavel A. Ionov, Cand.Sci. (Engr.), Head of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, First Vice-Rector of National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Aleksandr M. Zemskov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Sergey V. Pyanzov, Cand.Sci. (Engr.), Senior Lecturer of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Vladimir V. Salmin, Cand.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Transportation Machines, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, Researcher ID: Q-9667-2017, salmin-penza@yandex.ru

Authors contribution:

P. A. Ionov – developing the structure of the article, finalizing the initial text, conducting and describing experimental studies, and drawing a conclusion.

P. V. Senin – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. M. Zemskov – literature data analysis, text preparation with further revision, conducting and description of experimental studies, optimization of regression models, processing the obtained research results.

S. V. Pyanzov – experimental research.

V. V. Salmin – literature analysis and text revision.

All authors have read and approved the final manuscript.