

## ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ УТЕЧЕК РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРЫВЕ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ГИДРОПРИВОДА МАНИПУЛЯТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В.В. Лозовецкий<sup>1</sup>, В.Ф. Константинов<sup>1</sup>, В.М. Черкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Московский государственный строительный университет, Москва, Ярославское шоссе, д. 26

lozovetsky@mail.ru

Проведен анализ отказов гидроприводов манипуляторов транспортных средств, который показал, что основной их причиной является выход из строя рукавов высокого давления (РВД). Выявлен основной параметр их технического состояния — податливость, которая связана с логарифмическим декрементом колебания давления. Определен характер изменения данного параметра при эксплуатации РВД до достижения предельного состояния. Предложена конструкция защитного устройства, предотвращающего потери рабочей жидкости, находящейся в гидроцилиндре в момент повреждения РВД. Определена величина падения давления в зоне чувствительного элемента, которое обеспечивает срабатывание клапана, предотвращающего утечки.

**Ключевые слова:** гидропривод, рукав высокого давления, рабочая жидкость, податливость, логарифмический декремент колебания давления, манипулятор

**Ссылка для цитирования:** Лозовецкий В.В., Константинов В.Ф., Черкина В.М. Защита окружающей среды от утечек рабочей жидкости при разрыве рукавов высокого давления гидропривода манипуляторов транспортных средств // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 5. С. 62–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-62-68

Гидроприводы и их элементы — сложные динамические системы, работающие в условиях изменяющихся внешних воздействий, на надежность которых при эксплуатации оказывают влияние различные факторы: параметры окружающей среды, режимы работы, особенности конструктивного исполнения гидропривода, стационарность или мобильность применения, состояние организационно-эксплуатационных условий, квалификация обслуживающего персонала и наличие эффективных средств диагностирования и др.

Для поддержания гидропривода машин в исправном и работоспособном состоянии и своевременного обнаружения внезапно возникшего отказа необходимо периодически контролировать техническое состояние гидравлического оборудования. Средства технической диагностики позволяют: своевременно обнаружить возможность внезапного отказа; распознать характер и место скрытой неисправности; определить текущее рабочее состояние оборудования, его пригодность к дальнейшему использованию, степень удаленности от предельного состояния; предотвратить повреждения гидрооборудования, последующий ремонт и простой машины до восстановления работоспособного состояния. Таким образом, своевременное обнаружение неисправностей с помощью средств диагностики является более целесообразным, чем устранение отказа путем замены поврежденного гидрооборудования, так как позволяет снизить затраты на эксплуатацию гидрофицированных машин и их ремонт.

### Цель работы

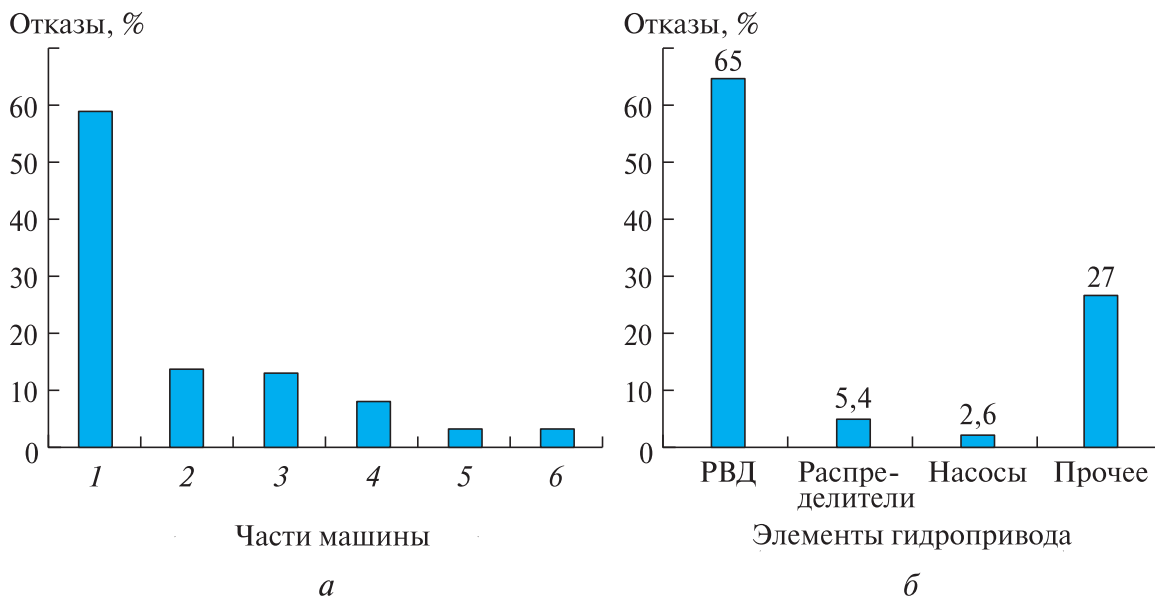
Цель работы — провести анализ отказов гидроприводов манипуляторов транспортных средств, доказать, что основной их причиной является выход из строя рукавов высокого давления (РВД).

### Материалы и методы

На рис. 1 приведены данные об отказах разных частей одной из машин лесного комплекса — машины «Урал-4320» с гидроманипулятором марки СФ-65С [1, 2].

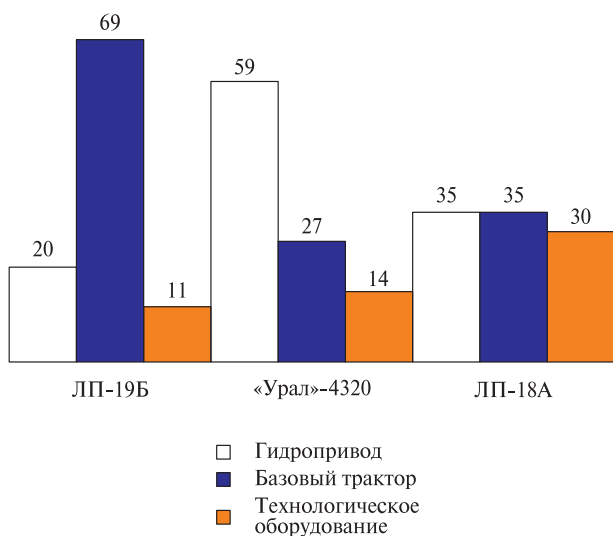
Анализ результатов исследования (рис. 1, а) показывает, что отказы гидропривода составляют 59 % от общего количества отказов по машине, а распределение отказов гидроприводов машины «Урал-4320» по элементам (рис. 1, б) свидетельствует о том, что чаще всего выходят из строя рукава высокого давления (65 % от общего количества отказов по гидроприводу).

Распределение количества отказов по машинам манипуляторного типа (рис. 2) [1, 3, 4] свидетельствует о том, что наименее надежными узлами данных машин являются гидроприводы, а наименее надежными элементами гидроприводов — РВД. Выход РВД из строя приводит к отказу систем управления транспортных средств и, соответственно, к большим человеческим жертвам, значительным потерям дорогостоящей рабочей жидкости, загрязнению окружающей среды и к пожарам на больших площадях лесных массивов и сельскохозяйственных угодий.



**Рис. 1.** Отказы разных частей машины «Урал-4320» с гидроманипулятором марки СФ-65С (а) и разных элементов гидроприводов машины (б): 1 — гидропривод; 2 — технологическое оборудование; 3 — прочее; 4 — ходовая часть; 5 — трансмиссия; 6 — двигатель [1, 2]

**Fig. 1.** Failures of different parts in Ural-4320 machine with a hydraulic manipulator of the SF-65S brand (a) and various elements of the hydraulic drives in the machine (b): 1 — hydraulic drive; 2 — technological equipment; 3 — other; 4 — running gear; 5 — transmission; 6 — engine [1, 2]



**Рис. 2.** Количество отказов, %, гидропривода, базового трактора и технологического оборудования для лесных машин ЛП-19Б, «Урал-4320» и ЛП-18А

**Fig. 2.** The number of failures, % of a hydraulic drive in a basic tractor and technological equipment for forest machines LP-19B, Ural-4320 and LP-18A

Параметром их технического состояния является податливость, которая связана с логарифмическим декрементом колебания давления в РВД. Необходимо определить характер изменения данного параметра РВД при их эксплуатации до достижения предельного состояния. Это позволит предотвращать тяжелые аварии при работе лесных машин.

Для создания системы автоматической защиты гидроприводов требуется решить следующие задачи: выявление начала процесса потери рабочей жидкости; изоляция поврежденного элемента от источника ее подачи. Потери рабочей жидкости могут быть большой интенсивности (выброс) и малой интенсивности (утечки).

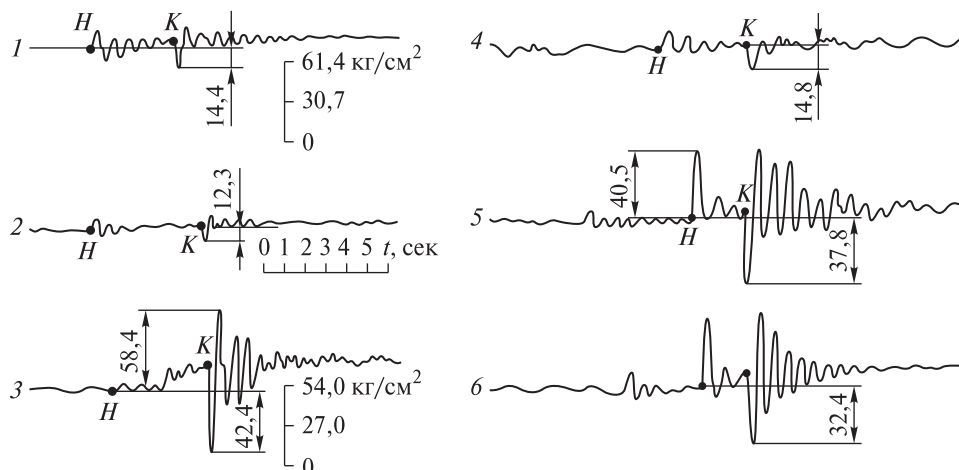
Выброс происходит при существенных повреждениях гидролиний (например, при вырыве накопника рукава из заделки), приводящих к образованию отверстия с большим проходным сечением и к падению давления в напорной магистрали.

Утечки характерны для негерметичных соединений гидролиний, повреждений с образованием отверстий с малым проходным сечением (свищи и т. п.). В этом случае индикация момента аварии не может осуществляться по величине рабочего давления. Оптимальный метод выявления утечек — автоматический контроль уровня рабочей жидкости в гидробаке.

### Результаты и обсуждение

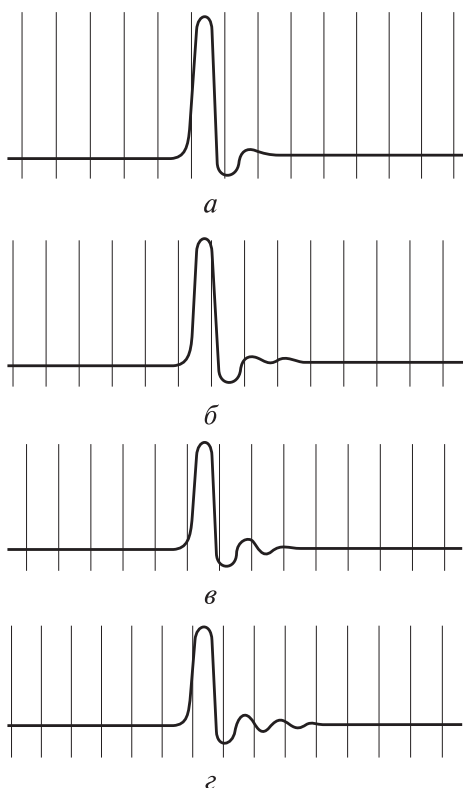
Как показали экспериментальные исследования, изменение давления в гидроцилиндрах манипулятора носит колебательный характер с явно выраженными пиками (рис. 3).

На рис. 4 представлены осциллограммы экспериментальных исследований рукавов высокого давления длиной 0,85 метра с внутренним диаметром 10 мм, которые показывают, что в результате динамических нагружений РВД наблюдается уменьшение их коэффициента податливости,



**Рис. 3.** Осциллограммы давления стрелового манипулятора: 1, 2 — давление в цилиндре стрелы при опускании рукояти с деревом весом 900 и 450 кг соответственно; 3, 4 — давление в цилиндре рукояти при опускании стрелы с большой и малой скоростью соответственно; 5, 6 — давление в цилиндре рукояти при опускании стрелы со стволом в горизонтальном и вертикальном положениях соответственно (*H* — начало движения, *K* — конец движения)

**Fig. 3.** Oscillograms of pressure in a boom manipulator: 1, 2 — pressure in the cylinder in the boom when lowering the handle with a tree weighing 900 and 450 kg, respectively; 3, 4 — pressure in the cylinder of the handle when lowering the boom with high and low speed, respectively; 5, 6 — pressure in the cylinder of the handle when lowering the boom with the barrel in the horizontal and vertical positions, respectively (*H* — the beginning of the movement, *K* — the end of the movement)



**Рис. 4.** Осциллограммы экспериментальных исследований РВД длиной 0,85 метра с внутренним диаметром 10 мм; количество моточасов *N* равно: а — 0; б — 750; в — 1500; г — 2180

**Fig. 4.** Oscillograms of experimental studies of HPH with a length of 0.85 meters with an internal diameter of 10 mm; the number of hours *N* is: а — 0; б — 750; в — 1500; г — 2180

т. е. потеря упругих свойств материала. Это приводит к уменьшению начальной амплитуды колебаний и увеличению длительности колебательного процесса при появлении и развитии неисправностей [1, 3, 5].

Результаты испытаний РВД различного типа (таблица) свидетельствуют о том, что уменьшение коэффициента податливости рукавов в результате потери упругих свойств материала приводит к уменьшению логарифмического декремента колебаний при появлении и развитии неисправностей [2–4].

Кроме того, увеличение длины и уменьшение диаметра РВД также приводит к снижению значения диагностического признака — логарифмического декремента колебаний. Это явление связано с тем, что при увеличении длины РВД возрастает их податливость, которая, в свою очередь, выполняет функцию гасителей колебаний. Снижение коэффициента податливости РВД в результате потерь упругих свойств материала приводит к уменьшению логарифмического декремента колебаний при появлении и развитии неисправностей [1, 3, 6].

При увеличении длины и уменьшении диаметра РВД также происходит снижение логарифмического декремента колебаний.

Изоляция поврежденного элемента от источника подачи рабочей жидкости наиболее просто достигается путем отключения привода насоса с помощью коробки отбора мощности. Кроме того, специальным гидроаппаратом можно

**Результаты экспериментальных испытаний рукавов высокого давления**  
**The results of experimental tests of high pressure hoses**

| Размеры рукавов          | Наработка на РВД, моточасов | Логарифмический декремент колебаний |                             |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
|                          |                             | Новый РВД                           | РВД с предельной наработкой |
| РВД 10-27,5-М22×1,5-850  | 2180                        | 0,623                               | 0,525                       |
| РВД 12-27,5-М22×1,5-1250 | 2300                        | 0,638                               | 0,539                       |
| РВД 12-27,5-М22×1,5-1450 | 2360                        | 0,641                               | 0,536                       |
| РВД 12-27,5-М22×1,5-1650 | 2450                        | 0,643                               | 0,530                       |

перекрывать подвод к гидроцилиндру с целью предотвращения потерь рабочей жидкости, находящейся в гидроцилиндре в момент повреждения рукава [7, 8].

Анализ известных защитных устройств гидропривода показал, что они не только не устраняют полностью потери рабочей жидкости, но и имеют следующие недостатки:

1) наличие подсоса воздуха при срабатывании данных устройств, что приводит к ухудшению условий смазки и повышенному износу деталей агрегатов гидросистемы;

2) сравнительно длительная настройка на рабочий режим [7, 9].

В связи с этим известные схемы защиты не очень надежны в процессе эксплуатации и требуют дальнейшего совершенствования. На рис. 5 представлены свободная от перечисленных недостатков конструкция и принцип действия специального предохранителя для предотвращения утечек масла из гидросистемы при обрыве шлангов.

Предохранитель состоит из корпуса 6 с входным и соединительным патрубками 7 и 16. В корпусе размещен клапанный элемент 13 с поршнем 8, пружина 12 которого взаимодействует с буртиком 5. В передней части клапанного устройства выполнено дроссельное отверстие 14, а в поршне — окно 11 с перемычкой, контактирующей с запорным элементом 9 (шариком). Предохранитель снабжен фиксатором 1 с кольцевым буртиком 4, уравнивающими канал 15, и пружиной 2, упирающейся в регулировочный винт 3. При разгерметизации гидросистемы за патрубком 16 поршень перемещается вперед, освобождая запорный элемент и перекрывая проход жидкости. Фиксатор при этом отжимается, обеспечивая перемещение клапана.

Его пружина 2 реагирует только на перепад давления в зоне дроссельного отверстия. Теоретический анализ взаимосвязи гидродинамиче-

ских характеристик потока рабочей жидкости с параметрами предохранителя позволяет обосновать основные конструктивные размеры деталей [10–18].

Условие равновесия сил, действующих на шарик

$$(p_1 - p_2) f_1 + F_{\text{пк}} + (p_2 - p_3) S + (p_2 - p_3) f = N + F_{\Phi},$$

где  $f_1$  — площадь клапана;

$F_{\text{пк}}$  — усилие сжатия пружины клапана;

$p_1$  — рабочее давление жидкости на входе в предохранитель;

$p_2$  — давление в проточной части предохранителя;

$p_3$  — давление в гидросети за предохранителем;

$$S = \frac{\pi(D^2 - d_2^2)}{4}$$

( $D$  — диаметр поршня;  $d_2$  — диаметр канала в клапане);

$$f = \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4}$$

( $d_1$  — диаметр дроссельного отверстия);

$N$  — усилие предварительного сжатия пружины поршня;

$F_{\Phi}$  — усилие, передаваемое фиксатором на коническую часть подвижного элемента предохранителя в осевом направлении.

Введя обозначения  $\Delta p_1 = p_1 - p_2$  и  $\Delta p_2 = p_2 - p_3$ , запишем

$$\Delta p_1 f_1 + \Delta p_2 (S + f) + F_{\text{пк}} = N + F_{\Phi}.$$

Условия свободного протекания рабочей жидкости через предохранитель при исправной гидросети и его срабатывания при снижении давления из-за разгерметизации, соответственно, имеют вид

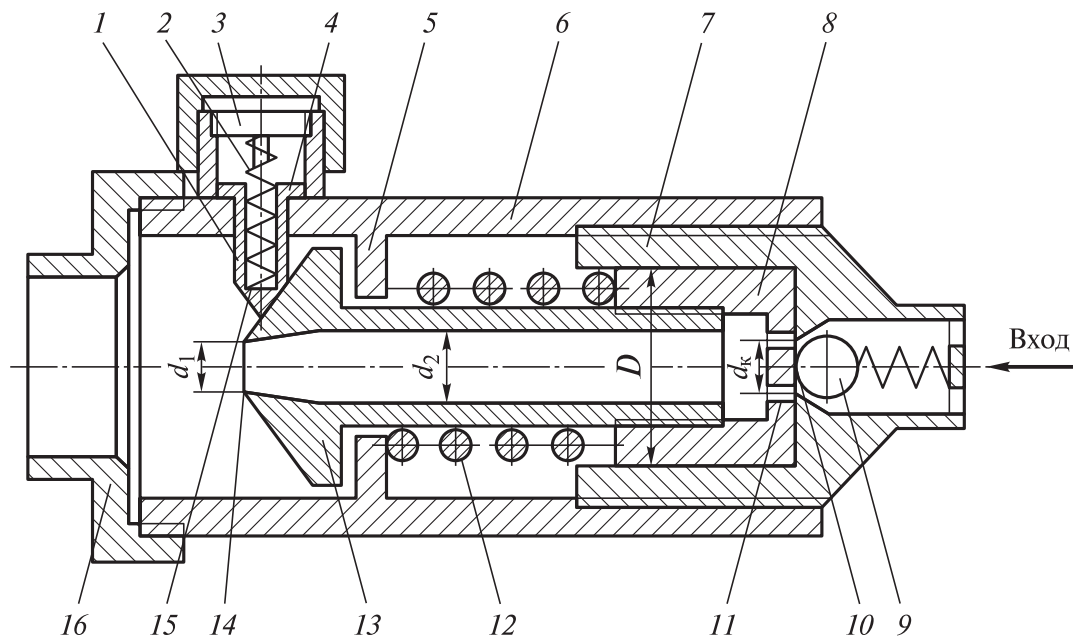
$$\Delta p_1 f_1 + \Delta p_2 (S + f) < N + F_{\Phi} - F_{\text{пк}};$$

$$\Delta p_1 f_1 + \Delta p_2 (S + f) > N + F_{\Phi} - F_{\text{пк}}.$$

Теоретически установлено, что в гидросети тракторов тягового класса 1,4 и 3,0 условие срабатывания предохранителя  $N + F_{\Phi} - F_{\text{пк}} > 48$  Н.

Приняв, что  $N + F_{\Phi} - F_{\text{пк}} = 60$  Н получим падение давления, равное  $7,3 \cdot 10^{-4}$  Па в зоне чувствительного элемента, которое обеспечивает срабатывание клапана.

В целях обеспечения устойчивой работы предохранителя при возможных колебаниях давления в гидросети целесообразно принимать значения  $N + F_{\Phi} - F_{\text{пк}}$  в два-три раза больше расчетного. Потери рабочей жидкости в процессе стендовых испытаний при обрыве шлангов не превысили 200 г.



**Рис. 5.** Схема предохранителя: 1 — фиксатор; 2 — пружина; 3 — регулировочный винт; 4, 5 — буртики; 6 — корпус; 7 — входной патрубок; 8 — поршень; 9 — запорный элемент (шарик); 10 — перемычка; 11 — окно поршня; 12 — пружина; 13 — клапан; 14 — дроссельное отверстие; 15 — уравнивающий канал; 16 — соединительный патрубок;  $d_k$  — диаметр отверстия клапана, закрываемого шариком

**Fig. 5.** Fuse circuit: 1 — retainer; 2 — spring; 3 — adjusting screw; 4, 5 — shoulder; 6 — case; 7 — inlet; 8 — the piston; 9 — locking element (ball); 10 — jumper; 11 — piston window; 12 — spring; 13 — valve; 14 — throttle hole; 15 — balancing channel; 16 — connecting pipe;  $d_k$  — diameter of the valve opening, closed with a ball

## Выводы

1. Анализ отказов гидроприводов манипуляторов транспортно-технологических средств свидетельствуют о том, что основной их причиной является выход из строя рукавов высокого давления.

2. Снижение коэффициента податливости РВД в результате потерь упругих свойств материала приводит к уменьшению логарифмического декремента колебаний при появлении и развитии неисправностей. При увеличении длины и уменьшении диаметра РВД также происходит уменьшение логарифмического декремента колебаний.

3. Разработанный способ диагностирования рукавов высокого давления позволяет определять техническое состояние и остаточный ресурс РВД в процессе проведения технического обслуживания или ремонта машин.

4. Предложенная конструкция предохранительного устройства обеспечивает своевременное перекрытие системы гидропривода при разрыве РВД, что подтверждается соответствием результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных.

## Список литературы

- [1] Тюкавин В.П., Попов Ф.П. Повышение надежности лесозаготовительной техники. М.: Лесная пром-сть, 1978. 168 с.
- [2] Павлов А.И., Полянин И.А., Лощенов П.Ю. Теоретические исследования динамических свойств элементов гидропривода лесных машин при диагностировании в функциональном режиме // Вестник МарГТУ, 2012. № 1. С. 44–54.
- [3] Павлов А.И. Надежность гидроприводов лесосечных машин. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. 212 с.
- [4] Лозовецкий В.В., Бирюков А.В. Влияние нагрузки и настройки предохранительного клапана на нагрузочные характеристики гидропривода // Научные труды МГУЛ. Лесопользование и воспроизводство лесных ресурсов, 2001. Вып. 31. С. 44–51.
- [5] Kisliakov D. Investigation of the dynamic interaction between a high-pressure pipeline and the moving liquid inside under seismic loading // Earthq. Eng. Struct. Dyn., 1990, v. 19, no. 8, pp. 1143–1152.
- [6] Павлов А.И. Математическая модель гидропривода лесосечных машин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2004. № 5. С. 22–26.
- [7] Рогожкин В.М., Ушаков Н.А. Защита гидросистем машин от аварийного выброса рабочей жидкости при разгерметизации напорной магистрали // Механизация строительства, 2011. № 2. С. 18–19.

- [8] Лощенов П.Ю. Диагностирование гидропривода в функциональном режиме // Тракторы и сельхозмашины, 2013. № 5. С. 46–47.
- [9] Namachchivaya N.S. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid. I. Subharmonic resonance. II. Combination resonance. *Int. J. Non-Linear Mech.*, 1989, v. 24, no. 3, pp. 185–196, 197–208.
- [10] Лебедев Н.И. Объемный гидропривод машин лесной промышленности. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.
- [11] Лозовецкий В.В. Гидро- и пневмосистемы транспортно-технологических машин. СПб.: Лань, 2012. 555 с.
- [12] Weaver D.S., Unny T.E. On the dynamic stability of fluid conveying pipes. *Trans ASME: J. Appl. Mech. Ser. E.*, 1973, v. 40, no. 1, pp. 48–52.
- [13] Остриков В.В., Матыцин Г.Д. Предотвращение аварийных утечек масла из гидросистемы // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1999. № 1. С. 26, 27.
- [14] Лозовецкий В.В., Комаров Е.Г., Кольниченко Г.И., Мурашев В.П. Расчет и проектирование электрогидравлических систем и оборудования транспортно-технологических машин. СПб.: Лань, 2017. 418 с.
- [15] Лозовецкий В.В., Константинов В.Ф., Пелевин Ф.В., Кохреидзе М.В. Предотвращение потерь рабочей жидкости при аварийном разрыве рукавов высокого давления гидроприводов манипуляторов транспортно-технологических машин // Транспорт: наука, техника, управление, 2017. № 7. С. 54–60.
- [16] Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1980. 261 с.
- [17] Павлов А.И., Ширнин Ю.А. Результаты исследования динамических свойств гидропривода сучкорезной машины в производственных условиях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2004. № 6. С. 63–66.
- [18] Орлов С.Ф., Гольдберг А.М. Сравнение параметров тяговой динамики лесотранспортных машин // Лесная промышленность, 1959. № 4. С. 12–17.

## Сведения об авторах

**Лозовецкий Вячеслав Владимирович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), lozovetsky@mail.ru

**Константинов Валерий Федорович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), v\_f\_konst@mail.ru

**Черкина Вера Михайловна** — канд. техн. наук, доцент Московского государственного строительного университета, khina@mail.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018.

Принята к публикации 22.10.2018.

## ENVIRONMENTAL PROTECTION AGAINST LIQUID LEAKAGE IN THE RUPTURE OF HIGH PRESSURE HOSES OF HYDRAULIC VEHICLE MANIPULATORS

V.V. Lozovetskiy<sup>1</sup>, V.F. Konstantinov<sup>1</sup>, V.M. Cherkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Moscow State Building University (NIU MGSU), 26, Yaroslavl highway, 129337, Moscow, Russia

lozovetsky@mail.ru

The analysis of failures of hydraulic drives of manipulators of vehicles, which showed that their main cause is the failure of high-pressure hoses (HPH). The main parameter of their technical condition — the compliance, which is associated with the logarithmic decrement of pressure oscillations is revealed. The nature of changes in this parameter in the operation of HPH to reach the limit state. The design of the protective device, preventing the loss of working fluid, located in the hydraulic cylinder at the time of damage to the HPH, is proposed. The value of pressure drop in the sensitive element zone, which provides operation of the valve, preventing leakage, is determined.

**Keywords:** hydraulic, high-pressure hose, fluid, compliance, logarithmic decrement of oscillations in the pressure manipulator

**Suggested citation:** Lozovetskiy V.V., Konstantinov V.F., Cherkina V.M. *Zashchita okruzhayushchey sredy ot utechek rabochey zhidkosti pri razryve rukavov vysokogo davleniya gidroprivoda manipulyatorov transportnykh sredstv* [Environmental protection against liquid leakage in the rupture of high pressure hoses of hydraulic vehicle manipulators]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 62–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-62-68

## References

- [1] Tyukavin V.P., Popov F.P. *Povyshenie nadezhnosti lesozagotovitel'noy tekhniki* [Increasing the reliability of forest machinery]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1978, 168 p.
- [2] Pavlov A.I., Polyatin I.A., Loshchenov P.Yu. *Teoreticheskie issledovaniya dinamicheskikh svoystv elementov gidroprivoda lesnykh mashin pri diagnostirovaniy v funktsional'nom rezhime* [Theoretical studies of the dynamic properties of the elements of the hydraulic drive of forest machines during diagnostics in the functional mode]. *Vestnik MarGTU*, 2012, no. 1, pp. 44–54.

- [3] Pavlov A.I. *Nadezhnost' gidroprivodov lesosechnykh mashin* [Reliability of hydraulic drives of logging machines]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2004, 212 p.
- [4] Lozovetskiy V.V., Biryukov A.V. *Vliyanie nagruzki i nastroyki predokhranitel'nogo klapana na nagruzochnye kharakteristiki gidroprivoda* [Influence of the load and setting of the safety valve on the load characteristics of the hydraulic drive]. Nauchnye trudy MGUL. Lesopol'zovanie i vosproizvodstvo lesnykh resursov [Scientific Works of MGUH. Forest use and reproduction of forest resources], 2001, iss. 31, pp. 44–51.
- [5] Kisliakov D. Investigation of the dynamic interaction between a high-pressure pipeline and the moving liquid inside a seismic loading. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 1990, v. 19, no. 8, pp. 1143–1152.
- [6] Pavlov A.I. *Matematicheskaya model' gidroprivoda lesosechnykh mashin* [Mathematical model of hydraulic drive for logging machines]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Forest Journal], 2004, no. 5, pp. 22–26.
- [7] Rogozhkin V.M., Ushakov N.A. *Zashchita gidrosistem mashin ot avariynogo vybrosa rabochey zhidkosti pri razgermetizatsii napornoj magistrali* [Protection of hydraulic systems of machines from emergency ejection of working fluid during depressurization of the pressure main]. *Mechanization of construction*, 2011, no. 2, pp. 18–19.
- [8] Loshchenov P.Yu. *Diagnostirovanie gidroprivoda v funktsional'nom rezhime* [Diagnosis of the hydraulic drive in the functional mode]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines], 2013, no. 5, pp. 46–47.
- [9] Namachchivaya N.S. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid. I. Subharmonic resonance. II. Combination resonance. *Int. J. Non-Linear Mech.*, 1989, v. 24, no. 3, pp. 185–196, 197–208.
- [10] Lebedev N.I. *Ob'emy gidroprivod mashin lesnoy promyshlennosti* [Volumetric hydraulic drive of forestry machinery]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1986, 296 p.
- [11] Lozovetskiy V.V. *Gidro- i pnevmosistemy transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Hydro- and pneumatic systems of transport-technological machines]. Saint Petersburg: Lan', 2012, 555 p.
- [12] Weaver D.S., Unny T.E. On the dynamic stability of fluid conveying pipes. *Trans ASME: J. Appl. Mech. Ser. E.*, 1973, v. 40, no. 1, pp. 48–52.
- [13] Ostrikov V.V., Matytsin G.D. *Predotvrashchenie avariynykh utechek masla iz gidrosistemy* [Prevention of emergency oil leaks from the hydraulic system]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture], 1999, no. 1, pp. 26, 27.
- [14] Lozovetskiy V.V., Komarov E.G., Kol'nichenko G.I., Murashev V.P. *Raschet i proektirovanie elektrogidravlicheskh sistem i oborudovaniya transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Calculation and design of electrohydraulic systems and equipment of transport-technological machines]. Saint Petersburg: Lan', 2017, 418 p.
- [15] Lozovetskiy V.V., Konstantinov V.F., Pelevin F.V., Kokhreizde M.V. *Predotvrashchenie poter' rabochey zhidkosti pri avariynom razryve rukavov vysokogo davleniya gidroprivodov manipulyatorov transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Prevention of loss of working fluid during emergency rupture of high-pressure hoses of hydraulic drives of manipulators of transport-technological machines]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], 2017, no. 7, pp. 54–60.
- [16] Potapov A.I. *Kontrol' kachestva i prognozirovanie nadezhnosti konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Quality control and prediction of reliability of structures from composite materials]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1980, 261 p.
- [17] Pavlov A.I., Shirnin Yu.A. *Rezultaty issledovaniya dinamicheskikh svoystv gidroprivoda suchkoreznoy mashiny v proizvodstvennykh usloviyakh* [Results of research of dynamic properties of a hydrodrive of the delimiting machine in production conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Forest Journal], 2004, no. 6, pp. 63–66.
- [18] Orlov S.F., Gol'dberg A.M. *Sravnenie parametrov tyagovoy dinamiki lesotransportnykh mashin* [Comparison of the parameters of the traction dynamics of forest transport vehicles]. *Lesnaya promyshlennost'*, 1959, no. 4, pp. 12–17.

## Authors' information

**Lozovetskiy Vyacheslav Vladimirovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), lozovetsky@mail.ru

**Konstantinov Valeriy Fedorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), v\_f\_konst@mail.ru

**Cherkina Vera Mikhailovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the Moscow State University of Civil Engineering, khina@mail.ru

Received 09.07.2018.

Accepted for publication 22.10.2018.