

УДК 630.3

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3181

*Статья*

## **Формирование поставок запасных частей для импортных лесных машин в Российской Федерации**

**Вениамин Н. Шиловский<sup>1</sup>, Александр В. Питухин<sup>1</sup> и Вадим М. Костюкевич<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, 185910 Петрозаводск, Россия; E-Mails: [shilovsky@petrsu.ru](mailto:shilovsky@petrsu.ru); [pitukhin@petrsu.ru](mailto:pitukhin@petrsu.ru); [vadim9595@yandex.ru](mailto:vadim9595@yandex.ru)

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: [vadim9595@yandex.ru](mailto:vadim9595@yandex.ru); Tel.: +7(8142)563187; Fax: +7(8142)571317.

*Получена: 15 января 2016 / Принята: 15 апреля 2016 / Опубликовано: 27 апреля 2016*

---

**Аннотация:** В статье обоснована и апробирована методика определения номенклатуры деталей периодического и непериодического типа, а также форма их поставки в качестве запасных частей для лесных машин зарубежного производства. Рассматривается задача оптимизации поставок запасных частей по форме и объему. Данная методика апробирована на примере деталей форвардеров компании «John Deere» серий 1010 и 1040. Проведен анализ чувствительности полученных оптимальных решений.

**Ключевые слова:** запасные части; форма и величина поставки; групповой комплект; гарантийный период; техническое обслуживание и ремонт

---

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3181

*Article*

## **Formation of the supply of spare parts for imported forest machines in the Russian Federation**

**Veniamin N. Shilovsky<sup>1,\*</sup>, Alexander V. Pitukhin<sup>1</sup> and Vadim M. Kostyukevich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; E-Mails: [shilovsky@petsu.ru](mailto:shilovsky@petsu.ru); [pitukhin@petsu.ru](mailto:pitukhin@petsu.ru); [vadim9595@yandex.ru](mailto:vadim9595@yandex.ru)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: [vadim9595@yandex.ru](mailto:vadim9595@yandex.ru); Tel.: +7(8142)563187; Fax: +7(8142)571317.

*Received: 15 January 2016 / Accepted: 15 April 2016 / Published: 27 April 2016*

---

**Abstract:** The article proved and tested method of determining the range of parts periodic and non-periodic type and form of supply as spare parts for forest machines of foreign manufacture. The problem of optimizing the supply of spare parts in shape and volume is examined. This method was tested on the example of the details forwarder company «John Deere» series 1010 and 1040. The analysis of the sensitivity of an optimal solutions is conducted.

**Keywords:** spare parts; shape and size of supply; group kit; warranty period; maintenance and repair

---

## 1. Введение

Количество зарубежных лесных машин, используемых на лесозаготовительных предприятиях Российской Федерации (РФ), ежегодно увеличивается. За последние три года на 950 лесозаготовительных машин, произведенных в России, приходится 1800 единиц импортируемой техники аналогичного назначения [1]. В настоящее время в парке преобладает отечественная техника, однако вследствие её значительного износа (до 70 %) объём лесозаготовок древесины с помощью зарубежной техники, особенно ориентированной на сортиментную технологию, в ближайшие годы будет только возрастать. Согласно рекомендациям работы [2] затраты на ремонт и техническое обслуживание зарубежных лесных машин рассчитываются на основании срока службы как среднегодовые. Они включают в себя приобретение запасных частей и оплату услуг по ремонту и техническому обслуживанию сторонними организациями. Для форвардера расчетные затраты на ремонт и ТО за срок службы соответствуют 100 % от закупочной цены машины, для харвестера – соответственно 125 %. Если учесть, что средний срок службы данных машин составляет порядка 5–6 лет, а стоимость, например, базового харвестера, около 350 тысяч евро, то затраты на его ТО и ремонт составят более 400 тысяч евро за срок его службы [2]. Поэтому данная задача обеспечения холодным резервом надежности, т. е. запасными частями, территориально распределенных комплексов зарубежных лесных машин относится к задачам оптимизации по экономическому критерию и является актуальной для данного вида техники.

Цель проводимых исследований и данной статьи – разработка и апробация алгоритма (методики) рациональной, экономически оптимальной по номенклатуре и количеству поставки запасных частей, осуществляемой в пространстве и во времени для разных по количеству парков машин, особенно находящейся на гарантии завода-изготовителя.

## 2. Материалы и методы

Процесс разработки экономически обоснованного объема (формы) поставки деталей и сборочных единиц в качестве запасных частей осуществляется в следующем порядке:

1. На основании экспериментальных исследований (рядовой технической и технологической эксплуатации машин) определяются ресурсные характеристики деталей и сборочных единиц техники.
2. Рассчитываются экономические потери, как от недопоставки, так и от избыточной поставки запасных частей.
3. Определяются детали периодического (каждый типонаминал деталей имеет свой среднестатистический, например, больше гарантийного период замен) и непериодического (замена за гарантийный период) типа и чувствительность объема поставки от величины изменения ресурса детали (сборочной единицы).

4. Определяется форма поставки: россыпью, индивидуальными или групповыми (на несколько машин) комплектами. Детали периодического типа поставляются групповыми комплектами, непериодического – индивидуальными.
5. Определяется объем поставки (состав комплекта) с учетом конкретных характеристик поставляемых деталей и сборочных единиц, а также количественного состава парка машин.

### 3. Проведение исследований и их результаты

Исследования проводились на примере деталей форвардеров компании «John Deere» серий 1010 и 1040. Показатели долговечности отдельных деталей форвардеров приведены в таблице 1 [3, 10, 4].

**Таблица 1.** Показатели долговечности отдельных деталей форвардера «John Deere».

Код детали по каталогу запасных частей (наименование детали)	Показатели долговечности			
	Вид закона распределения	$L_{cp}$	$\sigma_l$	$V$
F058748 (Серьга манипулятора)	Логарифмически нормальный	2314	1231	0.532
RE518088 (Топливный насос высокого давления)	Вейбулла	2972	1248	0.420
F064910 (Рукав высокого давления на поворот ротора грейфера)	Нормальный	568	119	0.210
F06520 (Рукав высокого давления на телескопическом удлинителе манипулятора)	Логарифмически нормальный	998	117	0.117

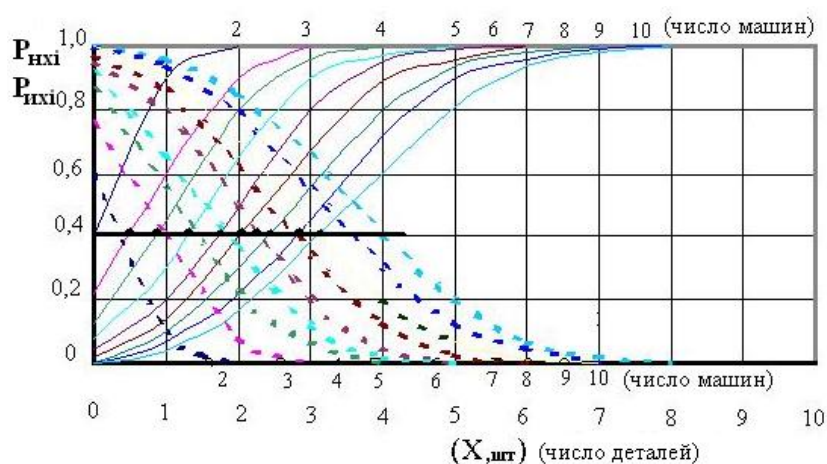
$L_{cp}$  – оценка среднего ресурса, моточас;

$\sigma_l$  – оценка среднеквадратического отклонения ресурса, моточас;

$V$  – оценка коэффициента вариации.

На примере двух деталей: F058748 (серьги манипулятора) и F064910 (рукава высокого давления (РВД) на поворот ротора грейфера) определим рациональную (оптимальную) форму (объем) поставки данных элементов форвардера в качестве запасных частей.

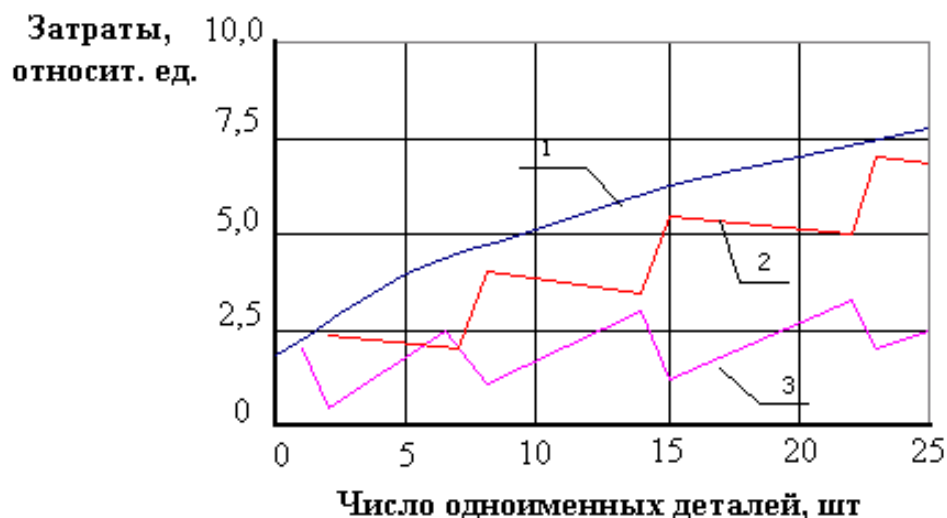
При определении объемов поставки (комплектов) запасных частей все детали можно разделить на два типа – периодические и непериодические. К деталям периодического типа следует отнести те детали, чувствительность которых к числу машин невелика, т.е. разные по численности группы машин могут удовлетворяться одним и тем же количеством резервных деталей [5]. Причина возникновения свойства периодичности при поставке запчастей заключается в дискретности и характере зависимости суммы, определяемой с помощью формул (4 - 6), вероятности необеспеченности  $P_{нхi}$  и суммы вероятности избыточности  $P_{ихi}$  от числа деталей, поставляемых на определенное число машин, что проиллюстрировано на рис.1 [5].



**Рисунок 1.** Зависимость вероятности необеспеченности ( $P_{нхi,-}$ ) машин и избыточности ( $P_{ихi,-}$ ) запасных частей от числа обеспечиваемых машин (2, ..., 10) и количества ( $X$ ) деталей в поставке (комплекте).

Как видно из рис. 1, при любом соотношении эксплуатационных затрат на резервирование оптимум числа запасных частей, например, при вероятности отказа – 0.4, равен одной детали и одинаков для трех, четырех и пяти машин. Две детали необходимы как для шести, так и семи машин, а три резервных детали удовлетворяют как восемь, так и девять и даже десять машин. Примером такой детали является серьга манипулятора F058748 (табл. 1).

Характер целевой функции (минимальных суммарных затрат) и ее составляющих, вычисляемых согласно выражениям 1, 2 при определении необходимого числа поставляемых деталей, обладающим свойством периодичности, представлены на рис. 2.



**Рисунок 2.** Зависимость величины целевой функции и ее составляющих от числа одноименных деталей, включаемых в состав поставляемого комплекта и обладающих свойствами периодичности. 1 - суммарные ожидаемые затраты (H); 2 - ожидаемые затраты на резервирование (G); 3 - ожидаемые эксплуатационные затраты (C).

Ожидаемые эксплуатационные затраты по парку из  $Q$  машин при наличии в поставке  $X$  деталей  $i$ -го наименования –  $C_{xi}$  определяется следующим образом:

$$C_{xi} = R_1 \cdot P_{gxi} + R_2 \cdot P_{nxi}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – затраты на устранение отказов при наличии запчастей, руб.

$P_{gxi}$  – математическое ожидание числа отказов в парке из  $Q$  машин, устраняемых за счет  $X$  деталей  $i$ -го наименования,

$R_2$  – затраты, связанные с отказами, при отсутствии запчастей  $i$ -го наименования, руб.,

$P_{nxi}$  – математическое ожидание числа отказов в парке из  $Q$  машин при отсутствии запчасти  $i$ -го наименования.

Ожидаемые затраты на создание запаса в  $X$  деталей  $i$ -го наименования и из-за его недоиспользования для парка из  $Q$  машин -  $G_{xi}$  равны:

$$G_{xi} = C_i \cdot X_i + C_i \cdot P_{uxi} \cdot K_b, \quad (2)$$

где  $C_i$  – стоимость детали  $i$ -го наименования, руб.,

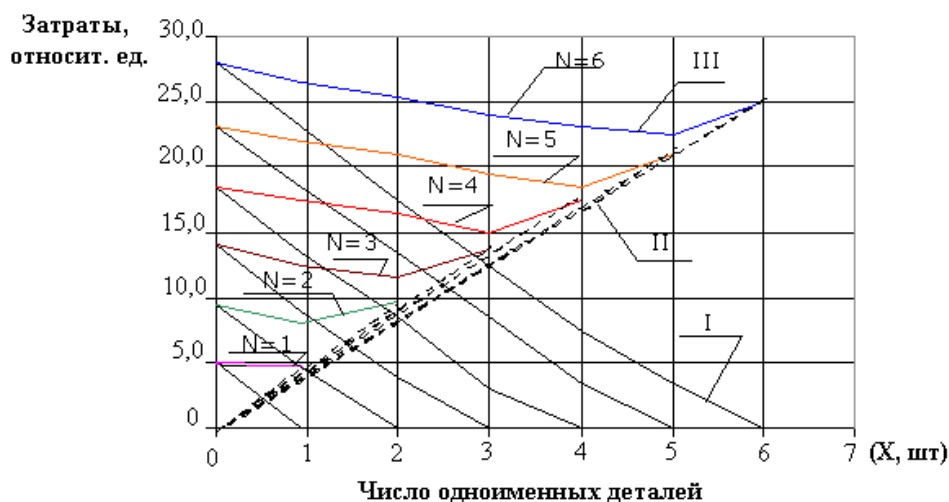
$P_{uxi}$  – математическое ожидание числа недоиспользованных запчастей (неликвидов),

$K_b$  – банковский коэффициент.

У детали неперiodического типа оптимальное количество запасных деталей в поставке должно быть пропорционально числу эксплуатируемых машин.

Это связано с тем, что при изменении числа обслуживаемых машин хотя бы на единицу, число данного типа поставляемых деталей изменяется не менее чем на одну штуку. Об этом свидетельствует зависимость величины целевой функции от количества деталей

непериодического типа в поставляемом комплекте и числа обслуживаемых этим комплектом машин, приведенная на рис. 3.



**Рисунок 3.** Величина целевой функции и ее составляющих для деталей, обладающих свойством пропорциональности, отражающая связь между количеством (X) деталей в поставляемом комплекте и числом (N) машин, на которое рассчитывается поставляемый комплект: I - ожидаемые затраты в эксплуатации; II - ожидаемые затраты на резервирование; III - суммарные ожидаемые затраты.

Целевая функция определяется выражением:

$$H(X_i^*) = \min\{ H_{xi} = C_{xi} + G_{xi} \}, \quad (3)$$

где  $X_i^*$  - оптимальное число запчастей  $i$ -го наименования, соответствующее минимуму суммарных затрат на резервирование и эксплуатацию парка из  $Q$  машин, шт.;

$H_{xi}$  - суммарные ожидаемые затраты на эксплуатацию парка из  $Q$  машин и от резервирования  $X$  деталей  $i$ -го наименования, руб.

Математические ожидания  $P_{uxi}$ ,  $P_{vxi}$ ,  $P_{gxi}$  при предположении, что отказы на  $Q$  машинах являются независимыми событиями и возникают не более одного у каждой детали, могут быть определены с использованием биномиального распределения [6]:

$$P_{gxi} = \sum_{m=1}^x m \cdot \frac{K_i! Q}{m!(K_i \cdot Q - m)!} \cdot P_i^m \cdot q_i^{K_i \cdot Q - m} + \sum_{m=x+1}^{K_i \cdot Q} x \cdot \frac{K_i! Q}{m!(K_i \cdot Q - m)!} \cdot P_i^m \cdot q_i^{K_i \cdot Q - m}; \quad (4)$$

$$P_{uxi} = \sum_{m=x+1}^{K_i \cdot Q} (m - x) \cdot \frac{K_i! Q}{m!(K_i \cdot Q - m)!} \cdot P_i^m \cdot q_i^{K_i \cdot Q - m}; \quad (5)$$

$$P_{uxi} = x - P_{gxi}, \quad (6)$$

где  $K_i$  - число деталей  $i$ -го наименования, установленных на одной машине, шт.;

$Q$  - число машин, обеспечиваемых комплектом запчастей, шт.;

$P_i$  - вероятность отказа  $i$ -й детали за период, на который поставляются запчасти;

$q_i$  - вероятность безотказной работы  $i$ -й детали за период, на который поставляются запчасти.

В связи с тем, что исходные данные при решении оптимизационной задачи определяются с конечной точностью, возникает задача анализа чувствительности оптимальных решений. Анализ чувствительности необходим и для того, чтобы определить пределы точности параметров оптимизации с целью

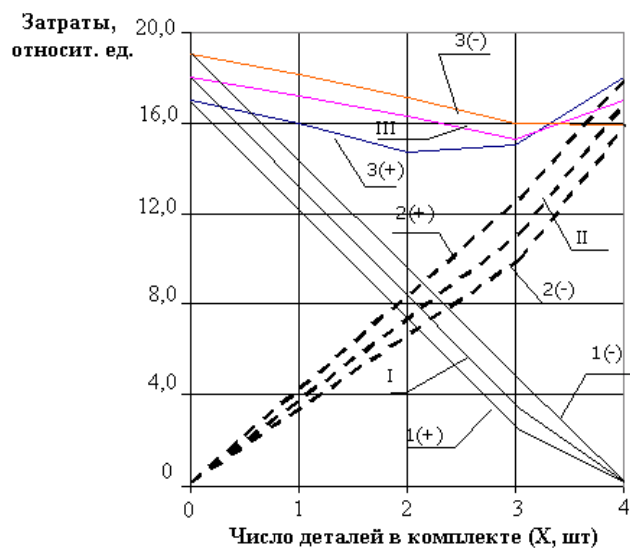
- уменьшения затрат для получения исходных данных с высокой точностью,
- получить возможность учета условий эксплуатации.

Вероятности избыточности запаса и необеспеченности парка зависят от вероятности отказа детали, которая, в свою очередь, зависит от параметров распределения ресурса. Необходимо определить, как влияет изменение среднего ресурса детали на оптимальное решение, то есть найти пределы изменения среднего ресурса, при превышении которых оптимальное значение управляемой переменной становится неоптимальным. Величину такого приращения назовем критической. Обозначим критическое значение приращения в сторону увеличения числа запасных частей от оптимального как  $+\Delta u_i$ , а критическое значение приращения в сторону уменьшения от оптимального как  $-\Delta u_i$ .

Для анализа чувствительности произведем необходимые расчеты в отношении рукава высокого давления на поворот ротора грейфера F064910 форвардеров «John Deere» серий 1010 и 1410. Значениям среднего ресурса детали давалось приращение, равное пяти моточасам.

С целью получения сопоставимых результатов шаги изменения математического ожидания и среднего квадратического отклонения ресурса детали задавались пропорционально друг другу, то есть коэффициент вариации ресурса детали оставался неизменным. Результаты измерений представлены на рис. 4.





**Рисунок 4.** Зависимость величины номинальных и критических величин ожидаемых затрат от числа деталей, поставляемых в качестве запчастей в поставляемых комплектах

I - ожидаемые затраты в эксплуатации, в том числе при критических значениях числа  $X[1(-); 1(+)]$ ;

II - ожидаемые затраты на резервирование, в том числе при критических значениях числа  $X[2(-); 2(+)]$ ;

III - суммарные ожидаемые затраты, в том числе при критических значениях числа  $X[3(-); 3(+)]$ ,

1(-); 2(-); 3(-) – значения затрат, соответственно, в эксплуатации, на резервирование и суммарные при уменьшении среднего ресурса на 75 моточасов,

1(+); 2(+); 3(+)- значения затрат при увеличении среднего ресурса на 82 моточаса.

При уменьшении среднего ресурса РВД суммарные ожидаемые затраты повышаются за счет увеличения эксплуатационных затрат, ожидаемые убытки от резервирования уменьшаются.

При снижении величины математического ожидания ресурса РВД на 75 моточасов значение управляемой переменной возрастает до четырех. Это говорит о том, что, если средний ресурс РВД будет снижен на 75 моточасов, величина необходимого резерва возрастет на одну деталь.

Повышение среднего ресурса детали снижает эксплуатационные затраты и повышает убытки от резервирования. Критическое значение среднего ресурса РВД в этом случае составляет 650 моточасов, что на 82 моточаса выше номинального (среднего) [3, 10]. При повышении среднего ресурса РВД на 82 моточаса расход запасных частей снижается на одну треть.

#### 4. Выводы и рекомендации

1. Предложена методика определения экономически обоснованного способа и объема поставки запасных частей (россыпью, индивидуальными и групповыми комплектами) как на период гарантии, так и на послегарантийный период эксплуатации лесных машин на примере деталей форвардеров компании «John Deere» серий 1010 и 1040. Проведен анализ чувствительности полученных оптимальных решений.

2. Установлено, что изменение величины математического ожидания ресурса, рассмотренного РВД на 75 моточасов в сторону уменьшения и на 82 моточаса в сторону увеличения, приводит к такому изменению величины целевой функции, при котором оптимальное значение управляемой переменной соответственно увеличится или уменьшится на единицу. В результате могут быть установлены пределы точности оценки математического ожидания (среднего) ресурса детали. Ошибка в оценке ресурса для рассмотренного РВД не должна превышать 14 % от номинального значения.

3. Эффективное обеспечение запасными частями лесной техники в гарантийный период возможно с одновременным использованием одиночных или групповых комплектов запасных частей. Разработчики и изготовители техники должны предусматривать и обеспечивать их поставку в оптимальном составе в рамках фирменного сервисного обслуживания выпускаемой и продаваемой техники. Например, рукав высокого давления F061/910 наряду с подобными деталями рационально поставлять в виде индивидуального комплекта запчастей, а серьга манипулятора F058748 может поставляться в составе группового комплекта для трех и даже четырех машин.

4. Величина допустимой относительной ошибки зависит от соотношения эксплуатационных затрат и затрат на резервирование детали, величины математического ожидания ресурса и его коэффициента вариации. С ростом среднего ресурса детали, величина допустимой ошибки уменьшается.

5. Анализ чувствительности позволяет учитывать условия эксплуатации машины. Разность между номинальным и критическим значениями затрат указывает на допустимые пределы различий в средних ресурсах детали, имеющих место в различных районах и регионах эксплуатации машин. Если региональное (районное) значение среднего ресурса превышает одно из критических, то необходимо соответственно зарезервировать на одну деталь больше или меньше оптимального их числа.

#### Литература

1. Большаков Б. М. Актуальные вопросы развития лесных машин и оборудования // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 2. – С. 21-24.
2. Герасимов Ю. Ю. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин / Ю. Ю. Герасимов, К. Н. Сибиряков, С. Л. Мошков, Э. Вяльккю, С. Карвинен. – Йоенсуу: Коріјувä Оу, Научно-исследовательский институт леса Финляндии, 2009. – 44 с.

3. Саливоник А. В. Повышение эффективности лесозаготовительных машин путем оптимального резервирования запасных частей и материалов (на примере машин компании «John Deere»: автореф. дис. канд. техн. наук. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2002. – 28 с.
4. Шиловский В. Н. Маркетинг и менеджмент технического сервиса машин и оборудования / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 278 с.
5. Шиловский В. Н. Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределенных машин и оборудования: монография – Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. – 324 с.
6. Питухин А. В. Повышение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, И. Г. Скобцов, В. А. Кильвийнен. – Петрозаводск: Петропресс, 2012. – 240 с.
7. Шиловский В. Н. Prospects for the development of imported forest machines maintenance in the Russian Federation / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич // XXIII International Scientific Technical Conference trans&MOTAUTO'15 proceedings. 2015. – Vol. 3. – P. 53-56.
8. Шиловский В. Н. Прогнозирование надежности машин по результатам незавершенных испытаний / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич, Г. Ю. Гольштейн // Фундаментальные исследования. – Москва, 2015. – Вып. 2, часть 16. – С. 3513-3517.
9. Шиловский В. Н. Обеспечение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич, В. А. Кильвийнен // Ученые записки ПетрГУ. Сер. «Технические науки». 2014. № 9. – Петрозаводск, – С. 84-87.
10. Шиловский В. Н. Организация технического обслуживания зарубежной лесозаготовительной техники [Электронный ресурс] / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич // Resources and Technology. 2013. – Т.10 (2013), № 2. – Режим доступа: <http://rt.petsu.ru/files/pdf/2621.pdf>.

## References

1. Bolshakov V. M. Actual issues development of forest machinery and equipment / Building and road machines. 2015. № 2. pp 21-24.
2. Gerasimov Yu. Yu. Calculation of operating costs of harvesting machinery / Y. Y. Gerasimov, K. N. Sibirjakov, S. L. Moshkov, E. Vyalkky, S. Karvinen // 2009. Kопijyvä Oy, Joensuu: Finnish Research Forest Institute, 2009. 44 pp.
3. Salivonic A. V. 2006. Improving the efficiency of forest machines by optimum reserve of spare parts and materials (for example, machines «John Deere»), PhD thesis abstract, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, 19 pp.
4. Shilovsky V. N. Marketing and management of machinery and equipment maintenance / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich. - St. Petersburg: Lan, 2015. 278 pp.

5. Shilovsky V. N. 2001. Theoretical background and marketing and management strategy of geographically distributed machines and equipment technical service. Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, 324 pp.
6. Pitukhin A. V., Shilovsky V. N., Skobtsov I. G., Kilvilainen V. A. 2012. Increase maintainability forest machines. Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Publisher Petropress, Russia, 240 pp.
7. Shilovsky V. N. Prospects for the development of imported forest machines maintenance in the Russian Federation / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich // XXIII International Scientific Technical Conference trans&MOTAUTO'15 Proceedings. 2015. Vol.3. pp.53–56.
8. Shilovsky V. N. Prediction reliability of machines based on the results of pending tests / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich, G. Yu. Gholstein // Fundamental Research. - Moscow, 2015. – Issue 2, № (part 16). pp. 3513–3517.
9. Shilovsky V. N. Provide maintainability forest machines / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich, V. A. Kyalviyaynen // Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences. 2014. № 9. Petrozavodsk, pp 84-87.
10. Shilovsky V. N. Maintenance performance of Imported Forest Machines in the Russian Federation [Electronic resource] / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich // Resources and Technology. 2013. – Vol. 10 (2013), № 2. – Online at: <http://rt.petsu.ru/files/pdf/2621.pdf>.