

**В.А. Марков, А.Н. Марков, В.И. Кретинин, В.А. Соколова,  
П.А. Гайдукова**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

*Введение.* В настоящее время ремонт лесозаготовительной техники приобретает решающее значение. В леспромхозах и лесхозах эксплуатируется большое количество отечественной и зарубежной техники. В условиях рыночных отношений вопрос выбора рациональных методов ремонта и восстановления изношенных рабочих поверхностей имеет актуальное значение, так как от его решения зависит производительность труда, экономия электроэнергии и материалов для нанесения покрытий, состав операций маршрута восстановления изношенной поверхности, в конечном счете, долговечность детали, узла, агрегата машины.

В процессе выбора метода ремонта детали, узла, агрегата следует различать термины ремонт и восстановление. Под термином ремонт следует понимать комплекс мероприятий, направленных на возобновление исправного или работоспособного состояния объекта, с обеспечением ресурса не менее 80% от нового агрегата. Снижение ресурса объясняется старением материалов, из которых состоит объект. Восстановление – часть ремонта относится к изношенным рабочим поверхностям детали, который представляет комплекс мероприятий, направленных на возобновление исправного состояния рабочих поверхностей деталей, с обеспечением коэффициента восстановления ресурса выше ( $> 1$ ) по сравнению с новой деталью [Соколова, 2002].

В настоящее время предприниматели практически не сдают машины на проведение полнокомплектного капитального ремонта.

Восстановление изношенных поверхностей деталей предусматривает разработку маршрута восстановления поверхности, где основной операцией является нанесения покрытия. Задача выбора операции нанесения покрытия осложняется тем, что способов нанесения покрытия насчитывается более 40, а их разновидностей свыше 200 [Марков, 2010].

Оптимизация выбора технологического процесса восстановления деталей является очень сложной задачей и решается методами математического моделирования.

Под руководством профессоров Андреева В.Н., Балихина В.В. в рамках данного научного направления разработано большое количество математических моделей восстановления деталей применительно к различным методам ремонта деталей, которые нашли свое отражение в работах следующих ученых: Андреева В.Н., Балихина В.В., Абашина Э.Я., Корыхалова В.Д., Ивановой И.В., Чугунова А.В., Маркова А.Н., Маркова В.А., Кретинина В.И., Садовникова В.И., Шильникова В.В., Чаусова А.А. и многих других. Данной проблемой также занимались, в связи с ее актуальностью ГОСНИТИ, ВНПО «Ремдеталь», МГАУ и многие другие.

*Методика исследования* заключается в применении теории производительности к процессам восстановления и ремонта деталей.

*Цели и задачи исследования.* Целью исследования является выявлении методики сравнения различных способов восстановления деталей с использованием их оценочных показателей. Задачами исследования является: выявление оценочных показателей методов восстановления деталей и разработка методики проведения сравнительного анализа способов восстановления деталей.

*Объектами исследования* являются современные методы ремонта и восстановления деталей.

*Научная новизна* заключается в применении современного подхода к проведению анализа методов восстановления и возможности их применения в условиях конкретного предприятия.

*Теоретическая и практическая ценность работы.* Теоретическая ценность работы заключается в выявлении функция для решения задачи оптимизации выбора метода восстановления по критериям себестоимости. Практическая ценность работы заключается в возможности точного определения себестоимости восстановления деталей машин, зная оценочные показатели технологического процесса.

Решая вопросы оптимизации выбора технологических процессов восстановления деталей, необходимо иметь оценочные показатели, позволяющие оценить их технологические маршруты (так как они могут иметь различную физическую сущность).

Для определения оценочных показателей предложено использовать теорию производительности оборудования и труда, примененную для выбора рациональной технологии эксплуатации лесных машин проф. Прохоровым В.М. [Прохоров, 1963].

Согласно данной теории, технологическая производительность технологического процесса  $\Pi_T$  определяется работой (непрерывной) оборудования в единицу времени:

$$\Pi_T = A / t, \quad (1)$$

где  $A$  – непрерывная технологическая работа.

Непрерывная технологическая работа на операциях нанесения покрытия может быть оценена в граммах,  $\text{м}^3$ .

С учетом коэффициента использования основного времени  $\eta_{io}$  действительная производительность операции нанесения покрытия определяется по формуле

$$\Pi_D = \eta_{io} \Pi_T; \quad (2)$$

$$\eta_{io} = t_O / t_H, \quad (3)$$

где  $t_O$  – основное время обработки, мин;  $t_H$  – норма времени на операцию, мин.

Для учета затрат технологического процесса технологическая производительность выразится следующей зависимостью:

$$\Pi_T = K_2 / N_{II}, \quad (4)$$

где  $K_2$  – удельные энергетические затраты технологического процесса ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ,  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{г}$ );  $N_{II}$  – полезная мощность, затрачиваемая при проведении операции нанесения покрытия в зоне обработки, кВт.

Часть мощности при ее передаче от источника до зоны обработки теряется, и эта потеря может быть учтена коэффициентом полезного использования по мощности  $\eta_N$ .

В этом случае технологическая производительность на проведение операции определится по формуле

$$\Pi_T = K_2 N_{II} = K_2 \eta_N \frac{N_{II}}{\eta_N} = K_1 N_T; \quad (5)$$

$$K_1 = K_2 \eta_N, \quad (6)$$

где  $K_1$  – удельные энергетические затраты оборудования;  $N_T$  – технологическая мощность, затрачиваемая при проведении операции с использованием данного оборудования, кВт.

Таким образом, действительная производительность оборудования, на котором выполняется операция нанесения покрытия, вычисляется по формуле

$$\Pi = \eta_{io} \eta_N K_2 N_T = \eta_{io} K_1 N_T. \quad (7)$$

С учетом оценочных показателей по теории производительности оборудования и труда, технологическая себестоимость операции, входящей в маршрут восстановления, равна

$$C_{TC} = G \left( \frac{C_1}{\Pi} + \frac{C_2}{K_1} + \frac{C_3}{\Pi_T} \right), \quad (8)$$

где  $G$  – объем (масса) наносимого, срезаемого, упрочняемого металла в зависимости от операции;  $C_1$  – сумма часовых затрат по заработной плате, амортизации оборудования, его ремонту и технического обслуживания, амортизации помещения, занятого оборудованием, и т. д.;  $C_2$  – стоимость кВт·ч электроэнергии;  $C_3$  – сумма часовых затрат на вспомогательные материалы или инструмент в зависимости от операции маршрута восстановления.

Удельная технологическая себестоимость операции маршрута восстановления равна

$$g_{TC} = \left( \frac{C_1}{\Pi} + \frac{C_2}{K_1} + \frac{C_3}{\Pi_T} \right). \quad (9)$$

Таким образом, использование показателей эффективности (оценочных показателей) позволяет любую операцию, входящую в маршрут восстановления, выразить в сравнительных единицах.

Наличие сравнительных оценочных показателей позволяет перейти к решению параметрической задачи как отдельной операции восстановления, так и операций, входящих в маршрут операций восстановления, так и маршрута восстановления в целом.

Суммарная удельная технологическая себестоимость маршрута восстановления равна

$$g_{TC} = \sum_{i=1}^K \frac{C_{1i}}{\Pi_i} + \sum_{i=1}^K \frac{C_{2i}}{K_{1i}} + \sum_{i=1}^K \frac{C_{3i}}{\Pi_{T2}}, \quad (10)$$

где  $K$  – количество операций, составляющих технологический процесс восстановления.

Каждую часть целевой функции можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^K \frac{C_{1i}}{\Pi_i} = \frac{C_1}{\Pi_1} + \frac{C_1}{\Pi_1} \alpha + \frac{C_1}{\Pi_1} \beta + \dots + \frac{C_1}{\Pi_1} \gamma, \quad (11)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – долевой вклад операций по отношению к операции, принимаемой за базовую (как правило, операция нанесения покрытия или являющаяся ограничением).

Решая оптимизационную задачу методом геометрического программирования [Даффин, 1972], получим

$$g_{TC} = \left[ \frac{C_1^\Sigma}{G_1(1-r_1-r_2)} \right]^{1-\eta-r_2} \left( \frac{C_2^\Sigma}{r_1 G_2} \right)^\eta \left( \frac{C_3^\Sigma}{r_2 G_3} \right)^{r_2}, \quad (12)$$

где  $r_1, r_2$  – базовые переменные;  $G_1$  – ограничение базовой  $\Pi$  – действительной производительности;  $G_2$  – ограничение базовой операции по  $K_1$  – удельной энергопроизводительности;  $G_3$  – ограничение по  $\Pi_T$  – технологической производительности базовой операции.

Базовые переменные определяются из следующих уравнений:

$$\frac{1-r_1-r_2}{r_1} = \frac{C_1^\Sigma G_2}{G_1 C_2^\Sigma}, \quad (13)$$

$$\frac{1-r_1-r_2}{r_2} = \frac{C_1^\Sigma G_3}{G_1 C_3^\Sigma}. \quad (14)$$

Значение оптимальной удельной технологической себестоимости позволяет определить оптимальные режимы обработки по операциям, составляющим технологический процесс в рамках, рекомендуемых как по отдельным операциям, так и по маршруту восстановления в целом.

При проектировании технологических процессов восстановления следует особое внимание уделить материалу (металлу) покрытия. Наносимый материал должен быть по физико-механическим свойствам близким к основному металлу. В этом отношении значительный теоретический и практический интерес представляют композиционные материалы.

Под композиционными материалами понимаются отдельные порошки металлов железа, никеля, меди, олова и т. д., а также их механические смеси (шихта). Благодаря возможности получения материалов с широким диапазоном физико-механических свойств, достигаемых за счет варьирования химическими составными порошков, порошковая металлургия получила широкое распространение в ремонтной практике. Применительно к восстановлению деталей лесных машин рекомендуется применять железоникелевые порошки [Балихин, 2008].

Механическую обработку следует производить композиционными инструментальными материалами (эльбор – Р, композит 05, гексанит-Р), для которых характерен в процессе обработки силовой фактор, а не тепловой

фактор (быстрорежущие стали, твердые сплавы и т. д.), что позволяет после обработки покрытия получать в обработанной поверхности остаточные напряжения сжатия.

Завершающей операцией маршрута восстановления после шлифования должна быть операция упрочняющей технологии (упрочнение ППД, электромеханическое упрочнение, вибрационное обкатывание и другие методы).

Операция упрочняющей технологии должна перекрывать по упрочнению  $\delta_y$  величину максимального износа  $u_{\max}$ :

$$\delta_y = u_{\max}, \quad (15)$$

где  $u_{\max}$  – максимальный износ по восстанавливаемой поверхности.

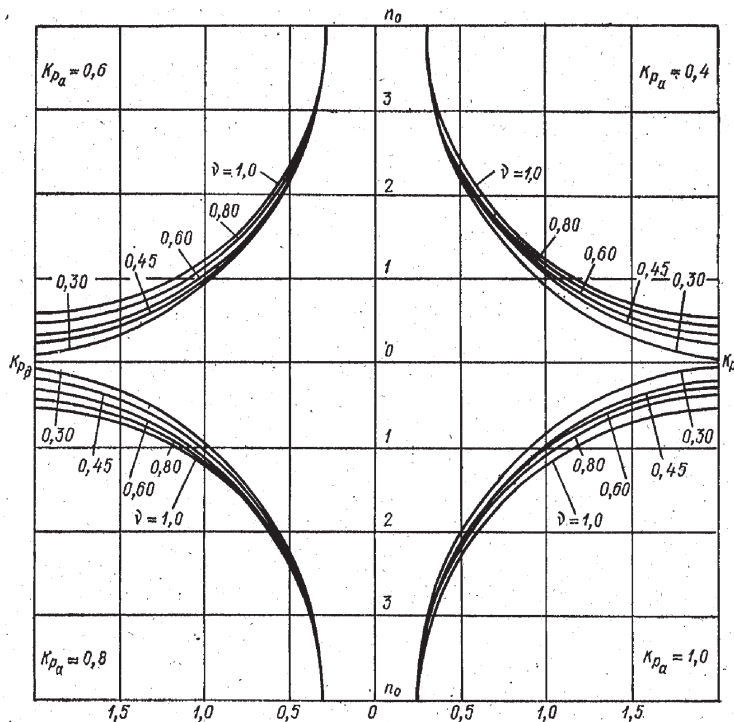
При сборке агрегата после ремонта следует иметь ввиду, что одна восстановленная деталь, имеющая коэффициент восстановления ресурса больше 1 не сможет повысить ресурс агрегата. Поэтому повышение ресурса агрегата возможно только при использовании нескольких деталей с повышенными ресурсами, в первую очередь это касается пар трения и сопряжений. Особое внимание следует обратить на восстановленные и отремонтированные детали, которые при сборке устанавливаются в первую очередь, например валик вилки муфты включения (коробка передач трехлопастного трактора), упорный диск в сборе (муфта сцепления) и т. д.

Если принять допущение, что распределение ресурса агрегата и деталей подчиняется закону Вейбула, то ресурс агрегата можно выразить в виде формулы

$$T_{\text{ав}} = T_a \left\{ \frac{-0,223}{-0,223 + \left[ \left( \frac{T_a}{T_b} \right)^3 - \left( \frac{T_a}{T} \right)^3 \right] \ln \gamma_g} \right\}^{0,7}, \quad (16)$$

где  $T_{\text{ав}}$  – гамма-процент ресурса агрегата с восстановленными деталями (деталью);  $T_a$  – гамма - процентный ресурс с базовой деталью;  $T_b$  – гамма-процентный ресурс восстановленной детали;  $T$  – гамма – процентный ресурс базовой детали;  $\gamma_g$  – значение гаммы для деталей.

На основании данной зависимости рассчитана нанограмма (см. рисунок), позволяющая в зависимости от значений коэффициента восстановления ресурса деталей, при заданном или определенном коэффициенте восстановления ресурса агрегата, определить число отказов, ожидаемое в эксплуатации за послеремонтный срок службы агрегата.



Номограмма для определения числа отказов детали в агрегате за послеремонтный срок службы:  $v$  – коэффициент вариации детали;  $K_{pa}$  – коэффициент ресурса агрегата;  $K_{pb}$  – коэффициент ресурса восстановленной детали

*Результаты исследования.* Значение числа возможных отказов по восстановленной детали в послеремонтный срок службы агрегата позволяет выделить долю затрат из общих затрат на устранение возможных отказов, связанных с ремонтом и восстановлением детали.

Выбор рационального технологического процесса восстановления изношенных рабочих поверхностей при условии обеспечения коэффициента ресурса выше ( $> 1$ ) по сравнению с новой деталью производится с учетом выполнения условия:

$$ПЗ_{в} < Ц K_{т}, \quad (17)$$

где  $ПЗ_{в}$  – удельные приведенные затраты на восстановление в условиях конкретного ремонтного предприятия;  $Ц$  – цена детали как запасной части;

$K_T$  – коэффициент, учитывающий транспортные расходы по доставке запасных частей на ремонтный завод.

Целевая функция для решения задачи оптимизации для агрегата, где может быть несколько восстанавливаемых деталей имеет вид

$$\min \leftarrow \text{ПЗ} = \text{ПВ}_B + \frac{\text{ПЗ}_a n_0}{(N-1) \Gamma k_p^A} \leq \text{Ц} K_T, \quad (18)$$

где  $\text{ПЗ}_a$  – приведенные затраты, связанные с транспортировкой агрегата, его ремонтом (в условиях ремонтно-механического завода);  $n_0$  – ожидаемая часть отказов по восстанавливаемым деталям;  $N$  – количество восстановленных деталей в агрегате ( $N > 1$ );  $T$  – послеремонтный срок службы агрегата;  $K_p^a$  – коэффициент восстановления ресурса агрегата;  $\text{Ц}_a$  – стоимость агрегата;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий транспортные расходы по доставке нового агрегата на ремонтный завод.

#### *Выводы*

1. Выбор маршрута восстановления рабочих изношенных поверхностей деталей является в настоящее время актуальной задачей.

2. Для сравнения маршрутов восстановления следует применять оценочные показатели согласно теории производительности оборудования и труда: действительная и технологическая производительность оборудования и процесса, удельная энергопроизводительность оборудования: коэффициент, учитывающий потери металла.

3. Целевой функцией может быть использована зависимость удельной технологической себестоимости восстановления от оценочных показателей с учетом их ограничений.

4. Методом решения задачи параметрической оптимизации маршрута восстановления может быть использован метод геометрического программирования.

5. Коэффициент восстановления ресурса детали должен быть на уровне новой детали и выше.

#### **Библиографический список**

Балихин В.В., Быков В.В., Иванов Н.Я. Технология ремонта машин и оборудования: учеб. пособие для высших учебных заведений. М.: Изд-во ЛТА. 2008. С. 435.

Даффин Р. и др. Геометрическое программирование. М.: Мир, 1972. 212 с.



*Марков В.А.* Повышение долговечности подвижных сопряжений ходовой части лесных машин при ремонте с применением композиционных материалов : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. С. 131.

*Прохоров В.П.* Эксплуатация машин в лесозаготовительной промышленности. М.: Лесн. пром-сть. 1963. С. 162.

*Соколова В.А.* Исследование удара технологической щепы о неподвижную плоскость // Сборник докладов молодых ученых на ежегодной науч. конф. 2002. Вып. 6. С. 85–89.

### **Bibliography**

*Balikhin V.V., Bykov V.V., Ivanov N.Ia.* Tekhnologiiia remonta mashin i oborudovaniia: uchebnoe posobie dlia vysshikh uchebnykh zavedenii. M.: Izd-vo LTA. 2008. S. 435. (Rus)

*Daffin R.* i dr. Geometricheskoe programmirovanie. M.: Mir, 1972. 212 s. (Rus)

*Markov V.A.* Povyshenie dolgovechnosti podvizhnykh sopriazhenii khodovoi chasti lesnykh mashin pri remonte s primeneniem kompozitsionnykh materialov : dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2010. S. 131. (Rus)

*Prokhorov V.P.* Ekspluatatsiia mashin v lesozagotovitel'noi promyshlennosti. M.: Lesn. prom-st'. 1963. S. 162. (Rus)

*Sokolova V.A.* Issledovanie udara tekhnologicheskoi shchepy o nepodvizhnuuiu pljoskost'. *Sbornik dokladov molodykh uchenykh na ezhegodnoi nauch. konf.* 2002. Vyp. 6. S. 85–89. (Rus)

*Материал поступил в редакцию 10.05.2016 г.*

---

**Марков В.А., Марков А.Н., Кретинин В.И., Соколова В.А., Гайдукова П.А.** Оптимизация выбора технологических процессов восстановления деталей // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 217. С. 194–205. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.217.194-205

В условиях рыночных отношений вопрос выбора рациональных методов ремонта и восстановления изношенных рабочих поверхностей имеет актуальное значение, так как от его решения зависит производительность труда, экономия электроэнергии и материалов для нанесения покрытий, состав операций маршрута восстановления изношенной поверхности; в конечном счете, долговечность детали, узла, агрегата машины. В настоящее время предприниматели практически не сдают машины на проведение полнокомплектного капитального ремонта. Восстановление изношенных поверхностей деталей предусматривает разработку маршрута восстановления поверхности, где основной операцией является нанесения покрытия. Задача выбора операции нанесения покрытия ос-

ложняется тем, что способов нанесения покрытия насчитывается более 40, а их разновидностей свыше 200. При проектировании технологических процессов восстановления следует особое внимание уделить материалу (металлу) покрытия. Наносимый материал должен быть по физико-механическим свойствам близким к основному металлу. В этом отношении значительный теоретический и практический интерес представляют композиционные материалы. Использование показателей эффективности (оценочных показателей) позволяет любую операцию, входящую в маршрут восстановления выразить в сравнительных единицах. Значение числа возможных отказов по восстановленной детали в послеремонтный срок службы агрегата позволяет выделить долю затрат из общих затрат на устранение возможных отказов, связанных с ремонтом и восстановлением детали. Для сравнения маршрутов восстановления следует применять оценочные показатели согласно теории производительности оборудования и труда: действительная и технологическая производительность оборудования и процесса, удельная энергопроизводительность оборудования; коэффициент, учитывающий потери металла. Целевой функцией может быть использована зависимость удельной технологической себестоимости восстановления от оценочных показателей с учетом их ограничений. Коэффициент восстановления ресурса детали должен быть на уровне новой детали и выше.

Ключевые слова: лесные машины, восстановление, производительность, композиционные материалы, отказы.

**Markov V.A., Markov A.N., Kretinin V. I., Sokolova V.A., Gaidukova P.A.** Optimization of choice of technological processes of details' restoration. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2016, is. 217, pp. 194–205 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2016.217.194-205

In the conditions of the market relations the question of the choice of rational methods of repair and restoration of worn-out working surfaces has relevance as labor productivity, economy of the electric power and materials for drawing coverings, structure of operations of a route of restoration of a worn-out surface. Eventually, durability of a detail, knot, the car unit depends on his decision. Restoration of worn-out surfaces of details provides development of surface's route of restoration. The main operation is drawing a covering. For resolving issues of optimization of the choice of technological processes of details restoration it is necessary to have the estimated indicators which allowing to estimate their technological routes by criterion of cost of restoration. According to the theory of productivity of the equipment and work to comparison of routes of restoration It is necessary to apply estimated indicators: valid and technological productivity of the equipment and process, specific power productivity of the equipment, the coefficient considering metal losses. After repair one restored detail with a coefficient of restoration of a resource more than 1 won't be able to raise a unit resource. Therefore increase of a resource is possible only when

using several details with the raised resources, first of all it concerns couples of friction and interfaces. Existence of comparative estimated indicators allows to pass to the solution of a parametrical task, both separate operation of restoration, and the operations entering a route of operations of restoration, and a restoration route in general. Value of number of possible refusals on the restored detail in post repair service life allows to distinguish a share of expenses from the general costs of elimination of the possible refusals connected with repair and restoration of a detail. Use of dependences of estimated indicators of technological restoration processes of details will allow the logging enterprises to choose the most suitable technological processes.

**Key words:** forest cars; restoration; productivity; composite materials; refusals.

---

**МАРКОВ Виктор Александрович** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

**MARKOV Victor A.** – PhD (Technical), associate professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

**МАРКОВ Александр Николаевич** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

**MARKOV Alexander N.** – PhD (Technical), associate professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

**КРЕТИНИН Виктор Иванович** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kvi\_1960@mail.ru

**KRETININ Victor Iv.** – PhD (Technical), associate professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: kvi\_1960@mail.ru

**СОКОЛОВА Виктория Александровна** – заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

**SOKOLOVA Victoria A.** – PhD (Technical), head of Department of technology of woodworking, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

**ГАЙДУКОВА Полина Алексеевна** – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: full\_moonpg@mail.ru

**GAYDUKOVA Polina A.** – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: full\_moonpg@mail.ru