

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4703

УДК 630.362: 621.891

*Статья*

## **Влияние динамики работы пильной цепи на изнашивание режущих звеньев**

**Валерий Ф. Константинов<sup>1</sup>, \*, Вячеслав А. Борисов<sup>1</sup>, Дмитрий В. Акинин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1; [konstantinov@mgul.ac.ru](mailto:konstantinov@mgul.ac.ru) (В. К.); [vborisov@bmstu.ru](mailto:vborisov@bmstu.ru) (В. Б.); [akinin.dmitrij2013@yandex.ru](mailto:akinin.dmitrij2013@yandex.ru) (Д. А.).

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: [vborisov@bmstu.ru](mailto:vborisov@bmstu.ru) (В. Б.);  
Tel.: +7(910)4201702

*Получена: 17 июня 2019 / Принята: 19 сентября 2019 / Опубликовано: 29 сентября 2019*

---

**Аннотация:** Данное исследование посвящено определению нормального контактного давления, которое действует на режущей кромке, в разных точках контактной площадки: закон их распределения описывается формулами теории упругости. Для расчёта нормальных давлений на фаске износа определённой шириной в сечениях, перпендикулярных главной режущей кромке, можно воспользоваться одним из решений плоской контактной задачи для случая жёсткого штампа (задача Фламанна). Анализ проведённых вычислений показывает, что дополнительное давление, вызванное относительными колебаниями инструмента и заготовки, неограниченно возрастает вблизи режущей кромки и плавно уменьшается при удалении от неё. Кроме того, очевидно, что касательные напряжения вблизи режущей кромки также неограниченно возрастают, обуславливая быстрый износ и округление режущей кромки.

**Ключевые слова:** зубы пильной цепи; режущая кромка; толщина стружки; сопротивление резанию; скорость резания; изнашивание режущих звеньев; динамика работы

---

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4703

*Article*

## **The influence of a saw chain dynamics on cutting links wear**

**Valery Konstantinov<sup>1, \*</sup>, Vyacheslav Borisov<sup>1</sup>, Dmitry Akinin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Mytishchi branch), Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, ul. 1-I Institutskaya, 1; [konstantinov@mgul.ac.ru](mailto:konstantinov@mgul.ac.ru) (V. K.); [vborisov@bmstu.ru](mailto:vborisov@bmstu.ru) (V. B.); [akinin.dmitrij2013@yandex.ru](mailto:akinin.dmitrij2013@yandex.ru) (D. A.)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: [vborisov@bmstu.ru](mailto:vborisov@bmstu.ru) (V. B.);  
Tel.: +7(910)4201702

*Received: 17 Jun 2019 / Accepted: 19 September 2019 / Published: 29 September 2019*

---

**Abstract:** This study is aimed at determination of the normal contact pressure which acts on the cutting edge at different points of the contact area. The law of their distribution is described by the formulas of the theory of elasticity. To calculate normal pressures at a wear chamfer of a certain width in the cross sections perpendicular to the main cutting edge one of the solutions of the plane contact problem for the case of a rigid stamp (Flaman problem) can be used. The calculations analysis shows that the additional pressure caused by relative vibrations of the tool and rough workpiece increases indefinitely near the cutting edge and decreases smoothly when removed from it. Shear stresses near the cutting edge also increase indefinitely causing rapid wear and rounding of the cutting edge.

**Keywords:** the teeth of a saw chain; the cutting edge; chip thickness; resistance to cutting; cutting speed; wear of cutting links; work dynamics

---

## 1. Введение

В лесозаготовительной промышленности механическая обработка древесины (валка деревьев, обрезка сучьев, раскряжёвка хлыстов) занимает значительный удельный вес [7], [8].

По мере развития механической обработки древесины развивалась и теория резания, задачей которой является определение усилий, возникающих при её резании, и мощности, расходуемой при этом. Основоположниками теории резания древесины являются профессора И. А. Тиме, П. А. Афанасьев, С. А. Воскресенский, Ф. М. Манжос и многие другие.

Большое применение в лесозаготовительной промышленности нашли пильные цепи, как хорошо известные в качестве режущего инструмента. Несмотря на тот факт, что в СССР выпускалось более 4 миллионов штук цепей в год, в настоящее время этот сектор занят, в основном, продукцией импортного производства, что связано с неудовлетворительным качеством и надёжностью отечественных пильных цепей [3—5].

Исследования в этой области практически полностью свёрнуты, что приводит к застою в разработке и внедрении новых, более совершенных конструкций данного вида режущего инструмента и вытеснению продукции отечественных производителей изделиями западных фирм.

Более того, производители лесозаготовительных машин в последнее время стали оснащать пильные аппараты собственного производства импортными пильными цепями для повышения эксплуатационных показателей и, соответственно, конкурентоспособности своей техники.

## 2. Материалы и методы

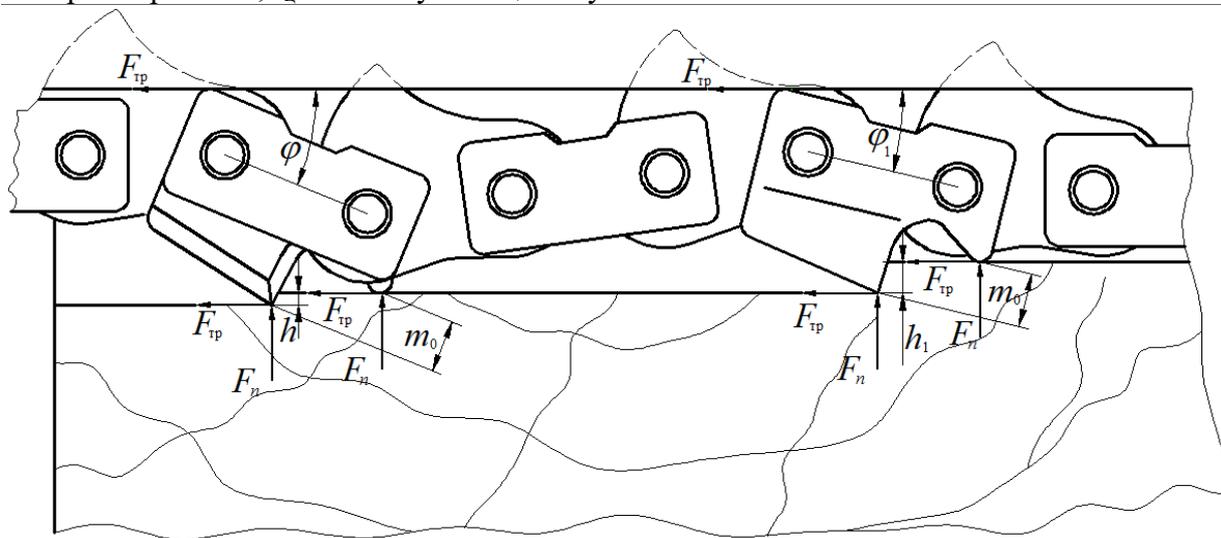
При пилении зубы пильной цепи в пропилах отклоняются от нормального положения, то есть цепь работает с нарушением устойчивости в трёх взаимоперпендикулярных плоскостях.

В продольной плоскости пропила при вхождении зуба в пропил горизонтальная и вертикальная составляющие силы сопротивления резанию на горизонтальной режущей кромке зуба поворачивают зуб на угол  $\zeta$  относительно точки контакта ограничителя подачи с дном пропила. Толщина снимаемой стружки  $h$  меньше высоты превышения ограничителя подачи над режущей кромкой  $t_0$ . По мере прохождения рассматриваемого зуба по высоте пропила, в пропил входит следующий зуб. Сила сопротивления резанию на этом зубе увеличивает усилия на шарнирах первого зуба по ходу движения. Зуб, возвращаясь в исходное положение, заглубляет горизонтальную режущую кромку в древесину, что приводит к увеличению толщины снимаемой стружки:  $h' = h + \Delta$ . Возросшие при этом силы сопротивления резанию уравновешивают момент от тяговых усилий. По ходу движения по длине пропила поворот первого зуба в исходное положение ( $\zeta = 0$ ) будет происходить по мере вступления в пропил последующих зубьев, до тех пор, пока толщина снимаемой этим зубом стружки  $h$  не станет равной высоте превышения ограничителя подачи над режущей кромкой  $t_0$ . При этом момент поворота зуба от тяговых усилий превышает момент от силы сопротивления резанию при толщине снимаемой стружки  $h = t_0$  [1].

Частота изменения тяговой нагрузки за пропилом

$$\omega = \frac{v}{t_{ц}}, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость резания;  $t_{ц}$  — шаг зубьев цепи зуба.



**Рисунок 1.** Положение режущих зубьев универсальной пильной цепи

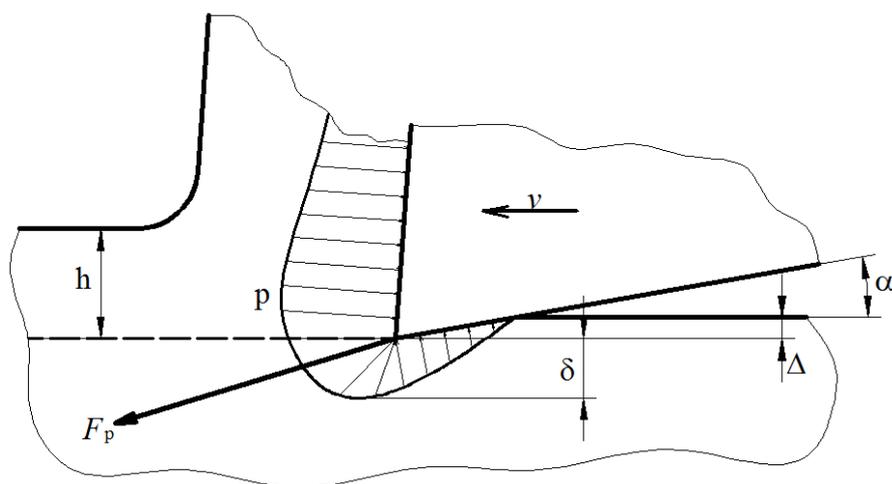
С уменьшением угла поворота зуба  $\xi \rightarrow 0$  толщина снимаемой стружки стремится к высоте ограничителя подачи  $h \rightarrow t_0$ .

Режущий клин (с задним углом  $\alpha$ ) движется относительно обрабатываемого материала со скоростью  $v$  и снимает слой древесины толщиной  $h$  и шириной  $b$ , соответствующей активной длине режущей кромки (рисунок 2).

Возникающая сила стружкообразования  $F_p$ , действующая под углом к поверхности резания, деформирует обрабатываемый материал не только перед передней поверхностью режущего клина, но и на некоторую глубину  $\delta$  ниже поверхности резания.

В процессе резания режущий клин вдавливаются в обрабатываемый материал и вызывает дополнительные сжимающие напряжения на его задней поверхности, изменяющиеся во времени от нуля до максимального по абсолютной величине значения, не превышающего предела упругости обрабатываемого материала. При этом дополнительная сила нормального давления, вызванная противодействием контактной деформации, изменяется за период колебаний асимметрично — от нуля до максимального значения при сближении режущего клина и поверхности резания, а затем уменьшается до нуля при обратном движении. Действие такой асимметричной силы в упругой системе равносильно суммарному действию симметричной гармонической силы той же частоты и постоянной силы, приложенной по нормали к задней поверхности режущего клина:

$$F(t) = F_k \cdot \sin(\omega t) - F_k. \quad (2)$$



**Рисунок 2.** Схема возникновения нормальных давлений на задней поверхности режущего клина

Амплитуда гармонической составляющей и величина постоянной составляющей силы нормального давления равны половине максимального значения силы, противодействующей контактной деформации. Таким образом, каждая гармоническая составляющая относительных колебаний инструмента вызывает появление на задней поверхности режущего клина дополнительной силы трения, пропорциональной дополнительному постоянному давлению, которое зависит от амплитуды колебаний на данной частоте. Равнодействующая всех дополнительных сил трения, величины которых зависят от динамической характеристики технологической системы, совершая дополнительную работу изнашивания задней поверхности инструмента, увеличивает скорость износа.

Кроме того, каждая гармоническая составляющая относительных колебаний инструмента вызывает появление на фаске износа циклического напряжения той же частоты, что также уменьшает стойкость режущего клина.

Нормальные контактные давления, действующие на режущей кромке, неодинаковы в разных точках контактной площадки: закон их распределения описывается формулами теории упругости. Для расчёта нормальных давлений на фаске износа шириной  $h$  в сечениях, перпендикулярных главной режущей кромке, можно воспользоваться одним из решений плоской контактной задачи для случая жёсткого штампа (задача Фламана) [2], учитывая дополнительные условия контакта.

Решение имеет вид для  $0 < x < h$ :

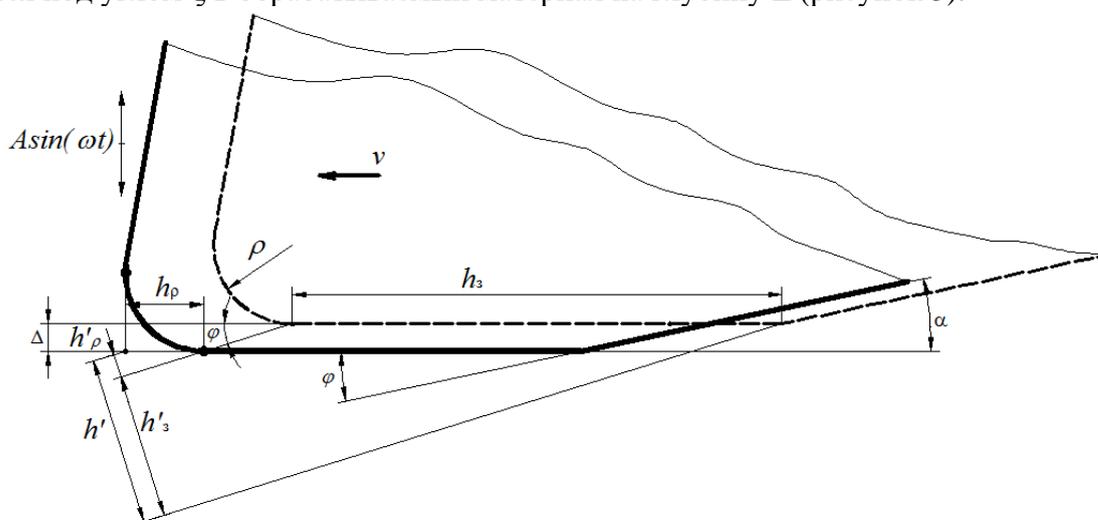
$$p(x) = \frac{P}{\pi \cdot \sqrt{h^2 - (x - h)^2}} \quad (3)$$

Анализ вычислений по формуле (3) показывает, что дополнительное давление, вызванное относительными колебаниями инструмента и заготовки, неограниченно возрастает вблизи режущей кромки и плавно уменьшается при удалении от неё. Очевидно, что касательные напряжения вблизи режущей кромки также неограниченно возрастают, обуславливая быстрый

износ и округление режущей кромки. Величина радиуса скругления  $\rho$  коррелируется с кривизной графика нормальных давлений на соответствующем участке задней поверхности. Этот период работы инструмента (период приработки) характеризуется высокой скоростью износа и быстрым увеличением радиуса скругления режущей кромки.

При появлении переходной поверхности между передней и задней поверхностями режущего клина характер распределения нормальных давлений на задней поверхности, при его вдавливании в обрабатываемый материал, изменяется. Режущий клин, вдавливаясь в поверхность резания, дополнительно смещается относительно неё со скоростью  $v$ , а ширина фаски износа и радиус скругления режущей кромки изменяются во времени.

При движении со скоростью резания  $v$  по синусоидальной траектории, соответствующей колебаниям с амплитудой  $A$  на одной из частот спектра  $\omega$ , за время  $\Delta t$  режущий клин вдавливается под углом  $\xi$  в обрабатываемый материал на глубину  $\Delta$  (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Схема для расчёта мгновенных контактных давлений на фаске износа режущего клина

Траектория вдавливания, отличающаяся от перпендикулярной к поверхности резания, приводит к изменению действующей ширины площадки контакта, которая становится равна  $h'$  и вычисляется по формуле

$$h' = h'_\rho + h'_3 = (h_\rho + h_3) \cdot \sin(\varphi), \quad (4)$$

где  $h'_\rho$  — проекция переходной поверхности фаски износа с радиусом скругления  $\rho$ .

$$h_\rho = \sqrt{\rho^2 - (\rho - \Delta)^2}; \quad (5)$$

где  $\Delta$  — глубина вдавливания за время  $\Delta t$ .

$$\Delta = A \cdot [\sin(\omega t) - \sin(\omega \cdot (t + \Delta t))]; \quad (6)$$

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{A \cdot \omega}{v} \cos(\omega t) \right], \quad (7)$$

где  $\varphi$  — угол наклона касательной в текущей точке траектории движения.

Для расчёта значений мгновенных нормальных давлений в сечениях, перпендикулярных главной режущей кромке, совместим начало координат с граничной точкой фаски износа и подставим в используемую формулу соответствующие пределы интегрирования для текущей точки траектории движения.

$$p(x) = \frac{\vartheta}{\rho \cdot \pi^2} \sqrt{h'^2 - x^2} \cdot \int_{h'_3}^{h'} - \frac{(y - h'_3) dy}{(y - x) \sqrt{h'_3{}^2 - y^2}}, \quad (8)$$

где  $\vartheta$  — удельная контактная жёсткость;

$$\vartheta = \frac{\pi \cdot E}{2 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (9)$$

где  $E$  — модуль упругости обрабатываемого материала;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

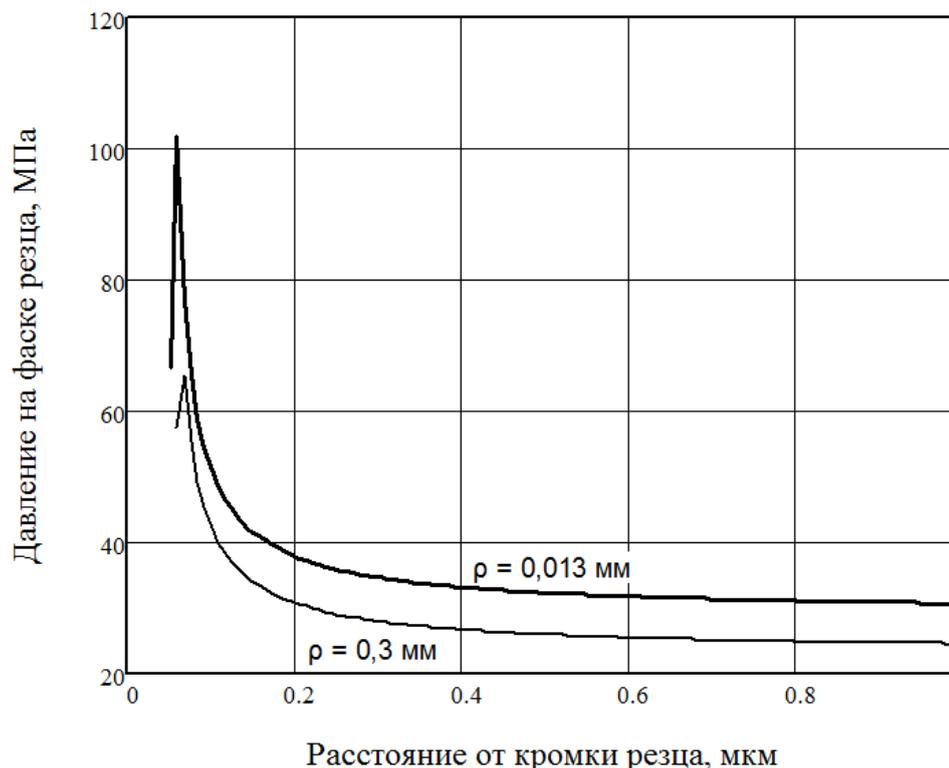
### 3. Результаты и выводы

Дальнейшее внедрение задней поверхности режущего клина вглубь обрабатываемого материала приводит к росту максимального значения нормального давления  $p_{\max}$  до предельной величины при достижении глубины, равной  $2A$ .

Вместе с тем график нормальных давлений на заднюю поверхность режущего клина (рисунок 4), построенный по формуле (8), показывает, что при появлении скругления режущей кромки величина давления вблизи неё становится конечной. С ростом ширины фаски износа максимальное давление уменьшается с одновременным уменьшением кривизны графика на этом участке. Следовательно, увеличение радиуса скругления режущей кромки взаимосвязано с увеличением ширины фаски износа, и этот процесс протекает с уменьшающейся интенсивностью.

Снижение скорости износа во втором периоде работы инструмента объясняется тем, что величина дополнительной силы трения зависит только от величины силы, вдавливающей режущий клин в обрабатываемый материал, т. е. не зависит от изменяющихся условий контакта и остается постоянной. При этом объём равных по толщине слоёв изношенного материала постоянно увеличивается, т. к. зависит от изменяющейся во времени площади фаски износа.

Необходимо отметить ещё одну особенность контактного взаимодействия задней поверхности режущего клина и обрабатываемого материала. На пограничных участках площадки контакта, лежащих между поверхностями, описываемыми разными функциями, контактные напряжения возрастают выше среднего значения. Такие участки можно назвать естественными концентраторами напряжений. Как показали многочисленные эксперименты [3—5], закон изменения во времени и частота колебаний циклического напряжения практически не оказывают влияния на прочность, существенны лишь максимальное и минимальное значения напряжения. Кроме того, эффект усталостного разрушения проявляется только тогда, когда число циклов нагружения превысит предельное значение, соответствующее определённому уровню напряжения.



**Рисунок 4.** Расчётные значения нормальных контактных давлений на фаске износа реза в сечениях, перпендикулярных режущей кромке:  $A = 2,4$  мм,  $v = 14$  м/с

### Список литературы

1. Рекач В. Г. Руководство по решению задачи теории упругости. М.: Высш. шк., 1966. 228 с.
2. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 544 с.
3. Вернер Н. Н., Тепноев А. В., Киселев В. С., Киселев Д. С., Елизаров Ю. М. Влияние высоты пропила на показатели процесса пиления // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса : Межвузовский сборник научных трудов. СПб.: ЛТА, 2009. Вып. 4. С. 61—66.
4. Вернер Н. Н., Елизаров Ю. М., Чуднов Ю. Н. Влияние снижения ограничителей подачи зубьев универсальных пильных цепей на показатели процесса пиления // Материалы второй международной научно-практической интернет-конференции «Леса России в XXI веке». СПб., 2010. С. 176—180.
5. Григорьев И. В., Вернер Н. Н., Киселев Д. С. Пути повышения надёжности пильных цепей // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». Вологда: ВоГТУ, 2009. С. 157—159.
6. Камусин А. А., Борисов В. А., Акинин Д. В., Казначеева Н. И. Некоторые вопросы, связанные с трелёвкой хлыстов // Resources and Technology. 2019. № 16 (1). С. 52—67.
7. Борисов В. А., Акинин Д. В., Илюхин Д. П., Попутчиков Д. П. Повышение эффективности насосных установок лесосечных машин на примере ЛП-19 // International Journal of Advanced Studies. 2018. Т. 8, № 4—2. С. 11—21.
8. Виттенбург Й. Динамика систем твёрдых тел. М.: Мир, 1980. 292 с.

9. *Антонюк Е. Я.* Динамика механизмов переменной структуры / АН УССР, Институт механики. Киев: Наукова думка, 1988. 182 с.
10. *Archibald.* Mechanical Engineering. 1946. Vol. 68.
11. *Petricek.* Príspevek k problematice mazani a opotrebenirezacich casti retezovych pil. «Lesnitvi», Rochik 16. Praga, 1970. P. 137—152.
12. Undersökning utförd vid Statens maskinprovningar på uppdrag av Kungl. Arbetarskyddsstyrelsen. 1974-02-06. 67 p.

## References

1. *Rekach V. G.* Manual solution of exercises of theory of elasticity / V. G. Rekach. Moscow : Vyssh. shk., 1966. 228 p. (In Russ.)
2. *Feodosev, V. I.* Strength of materials / V. I. Feodosev. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana Publishing, 1999. 544 p. (In Russ.)
3. The effect of the height of the cut on the performance of the sawing process / N. N. Verner, A. V. Teppoev, V. S. Kiselev, D. S. Kiselev, Yu. M. Elizarov // Technology and equipment of the timber industry: Intercollegiate collection of scientific works. Sankt-Petersburg : LTA, 2009. Vol. 4. P. 61—66. (In Russ.)
4. *Verner, N. N.* The effect of reducing the tooth feed limiters of universal saw chains on the performance of the sawing process / N. N. Verner, Yu. M. Elizarov, Yu. N. Chudnov // Materials of the second international scientific and practical Internet conference " Forests of Russia in the XXI century». Sankt-Petersburg, 2010. P. 176—180. (In Russ.)
5. *Grigorev, I. V.* Ways to improve the reliability of saw chains / I. V. Grigorev, N. N. Verner, D. S. Kiselev // Materials of the international scientific and technical conference " Actual problems of forest complex development». Vologda : VoGTU, 2009. P. 157—159. (In Russ.)
6. Some problems of tree-length skidding / A. A. Kamusin, V. A. Borisov, D. V. Akinin, N. I. Kaznacheeva // Resources and Technology. 2019. Vol. 16 № 1. P. 52—67. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4422 (In Russ.)
7. Improving the efficiency of pumping units of cutting machines on the example of LP-19 / V. A. Borisov, D. V. Akinin, D. P. Ilyukhin, D. P. Poputchikov // International Journal of Advanced Studies. 2018. Vol. 8, № 4—2. P. 11—21. (In Russ.)
8. *Vittenburg, J.* Dynamics of systems of rigid bodies / J. Vittenburg. — Moskva : Mir, 1980. — 292 p. (In Russ.)
9. *Antonyuk, E. Ya.* Dynamics of mechanisms with variable structure / E. Ya. Antonyuk ; AS USSR, Institute of mechanics. Kiev : Naukova dumka, 1988. — 182 p. (In Russ.)
10. *Archibald.* Mechanical Engineering / Archibald. 1946. Vol. 68.
11. *Petricek.* Príspevek k problematice mazani a opotrebenirezacich casti retezovych pil. «Lesnitvi», Rochik 16 / Petricek. Praga, 1970. P. 137—152.
12. Undersökning utförd vid Statens maskinprovningar på uppdrag av Kungl. Arbetarskyddsstyrelsen. 1974-02-06. 67 p.