

*Куницкая Ольга Анатольевна* - профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

*Григорьев Михаил Федосеевич* – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: grig\_mf@mail.ru.

*Пучнин Александр Николаевич* – старший преподаватель кафедры Землеустройства и ландшафтной архитектуры ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ntobumdrevprom@mail.ru.

### Information about the authors

*Rudov Sergey Evgen'evich* – senior lecturer of the Department No. 3 FGWO IN the "Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny", Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: 89213093250@mail.ru.

*Shapiro Vladimir Yakovlevich*-Professor of the Department of Higher mathematics, St. Petersburg state forest engineering University named after S. M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

*Igor Grigoriev Vladislavovich*-Professor of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: silver73@inbox.ru.

*Kunitskaya Olga Anatolievna* - Professor of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

*Grigoriev Mikhail Fedoseevich*-senior lecturer of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: grig\_mf@mail.ru.

*Putnin Alexander Nikolaevich* – senior lecturer of the Department of Land management and landscape architecture of the "Yakut state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: ntobumdrevprom@mail.ru.

DOI: 10.12737/article\_5c92016fc37239.43354129

УДК 630\*323.12

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ БЕНЗИНОМОТОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

аспирант **И.Н. Троянов**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **В.В. Абрамов**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **Л.Д. Бухтояров**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **А.С. Черных**<sup>1</sup>

доктор технических наук, профессор **Д.Н. Афоничев**<sup>2</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация

Целью исследований представленных в статье является разработка математической модели процесса поперечного пиления древесины при срезании дерева цепным пильным аппаратом для оценки удельных энергозатрат, а также создание на ее основе программного обеспечения для научно-обоснованного выбора оптимального комплекта бензино-моторного инструмента в индивидуальных лесозексплуатационных условиях разрабатываемых лесосек. Предлагаемая методика расчета удельных энергозатрат процесса поперечного пиления древесины является дополнением теории резания для случая веерной подачи цепного режущего органа при выполнении обрабатываемых операций лесосечных ра-

бот. Разработанный на ее основе математический аппарат для исследования процесса поперечного пиления древесины чувствителен к большому количеству воздействующих факторов – диаметр предмета труда, состав насаждения, влажность, межзаточный период, мощность привода бензопилы, шаг цепи, снижение ограничителя подачи, ширина пропила, скорость цепи, масса одного метра цепи, ее длина и монтажное натяжение. Это позволяет: прогнозировать результаты выполнения обрабатываемых операций в конкретных лесозаготовительных условиях разрабатываемых лесосек и подбирать наилучшие сочетания бензопилы, пильной шины и пильной цепи по показателю удельных энергозатрат; производить предварительную оценку конструкций пильной цепи на стадии эскизного проектирования по режущим и эксплуатационным свойствам; а также оптимизировать конструктивные параметры цепей и других элементов срезающего устройства для заданного сочетания размерно-качественных характеристик предмета труда. Предлагаемое программное обеспечение для ЭВМ создает широкие возможности внедрения полученных результатов исследования в реальное производство и позволяет повысить эффективность процесса пиления древесины при срезании дерева бензопилой. Это было подтверждено на примере лесозаготовительной компании ООО «ЛК Кедр» (г. Сергиев Посад, июль 2017 г.), где в результате имитационного эксперимента были определены оптимальные комплекты бензиномоторного инструмента для выполнения валки деревьев: бензопила Husqvarna 357 + шина "15" + цепь 25 RM и Stihl S 260 + шина "15" + 26 RM. Их применение на предприятии по сравнению с ранее используемым вариантом (бензопила Husqvarna 357 + шина "16" + цепь 35 RM) позволяет снизить удельные энергозатраты на 9 % и 7 % соответственно.

**Ключевые слова:** бензиномоторный инструмент, пиление древесины, лесосечные работы, имитационное моделирование, удельные энергозатраты.

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF SAW CUTTING USING GASOLINE ENGINE TOOLS

Post-graduate student **I N Troyanov**<sup>1</sup>

PhD (Engineering), Associate Professor **V.V. Abramov**<sup>1</sup>

PhD (Engineering), Associate Professor **L.D. Bukhtoyarove**<sup>1</sup>

PhD (Engineering), Associate Professor **A.S. Chernykh**<sup>1</sup>

DSc (Engineering), Professor **D.N. Afonichev**<sup>2</sup>

1 – FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I", Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

The purpose of the research presented in the article is to develop a mathematical model of the process of timber cross-cutting when cutting a tree with a chain saw apparatus for estimating specific energy consumption, and creating software for a scientifically-based choice of the optimal set of gasoline-powered tools in individual logging sites based on it. The proposed method of calculating specific energy consumption of the process of transverse wood sawing is an addition to the theory of cutting for the case of the fan-shaped supply of a chain cutting body when performing cutting for logging operations. A mathematical apparatus for studying the process of wood cross-cutting developed on its basis is sensitive to a large number of influencing factors - the diameter of the object of labor, the composition of the plantation, humidity, the sharpening period, the power of the chainsaw, the pitch of the chain, the reduction of the feed limiter, the width of the cut, the speed of the chain, the mass of one chain meter, its length and mounting tension. This enables: to predict the results of processing operations in specific forest operating conditions of the developed cutting areas and select the best combination of chainsaw, saw bar and saw chain in terms of specific energy consumption; make a preliminary assessment of the saw chain designs at the stage of preliminary design for cutting and operational properties; and also to optimize the design parameters of chains and other elements of cutting device for a given combination of dimensional and quality characteristics of the subject of labor. The proposed computer software creates wide possibilities for implementing the obtained research results into actual production and improves the efficiency of wood

sawing process when cutting timber with a chainsaw. This has been confirmed by the example of LK Kedr logging company (Sergiev Posad, July 2017), where, as a result of a simulation experiment, the optimal sets of gasoline-powered tools for making trees have been identified: Husqvarna 357 chainsaw + tire "15" + chain 25 RM and Stihl S 260 + tire "15" + 26 RM. Their use in the enterprise reduces the specific energy consumption by 9% and 7%, respectively, compared to the previously used option (Husqvarna 357 chainsaw + tire "16" + chain 35 RM).

**Keywords:** gasoline engine tool, wood sawing, logging, imitation modeling, specific energy consumption.

Основные направления развития лесозаготовок находятся в области снижения энергоемкости производственных процессов, роста производительности труда и уменьшения негативных экологических последствий окружающей среде [1, 5, 13]. Совершенствование лесосечных работ по обозначенным позициям традиционно реализуется путем разработки новых технологий, конструкций инструмента или технических средств для их реализации, а также за счет выявления так называемых «узких мест» или внутренних резервов повышения эффективности в производстве, в том числе, на основе создания автоматизированных систем управления технологическими процессами [2, 9, 10, 14].

В настоящее время на валке деревьев, обрезке сучьев и раскряжевке хлыстов широко используются бензопилы, особенно когда другие средства ограничены в работе: по своим техническим возможностям (из-за рельефа местности, несущей способности грунтов, крупности деревьев); лесоводно-экологическими требованиями (повреждаемость оставляемых деревьев, сохраняемость подроста, доля технологических площадей); экономической целесообразностью (освоение разрозненных лесосек с небольшими объемами лесопользования). Эффективность выполнения обрабатываемых операций на лесосеке во многом определяет выбор технологии и комплекта бензиномоторного инструмента, метода, параметров и последовательности разработки пазеки и ленты, а также учет индивидуальных особенностей мотористов [4, 6, 8]. Большое количество сравниваемых вариантов, широкий диапазон изменения природно-производственных условий разрабатываемых лесосек и параметров рубок, различная квалификация и утомляемость исполнителей, а также необходимость многосторонней оценки процесса затрудняет принятие, на основе известных исследований, оптимальных научно-обоснованных решений в данном

вопросе. В этой связи, целесообразна разработка автоматизированной системы проектирования лесосечных работ с 3-уровневой структурой совершенствования выполнения обрабатываемых операций, где осуществляется последовательное обоснование оптимального комплекта бензиномоторного инструмента, технологии и организации труда и параметров проводимой рубки с позиции энергоемкости, производительности, трудозатрат, лесоводственного и экологического ущерба лесной среде. На первом уровне системы при решении вопроса научно-обоснованного выбора лучшего сочетания бензопилы, пильной шины и пильной цепи в заданных условиях производства и природной среды предполагается оценка большого количество сравниваемых альтернатив при широком диапазоне изменения размерно-качественных характеристик обрабатываемых предметов труда. В такой ситуации необходимо использовать современные методы и средства моделирования и оптимизации производственных процессов [15]. Опираясь на многолетний успешный опыт их применения на кафедре ЛПМСиС ВГЛТУ проф. Иевлевым И.А. и проф. Пошарниковым Ф.В. [3] была получена математическая модель процесса срезания дерева цепным пильным аппаратом для прогнозирования удельных энергозатрат, учитывающая количество веерообразных приемов при выполнении основного реза в зависимости от диаметра дерева и длины пильной шины (рис. 1).

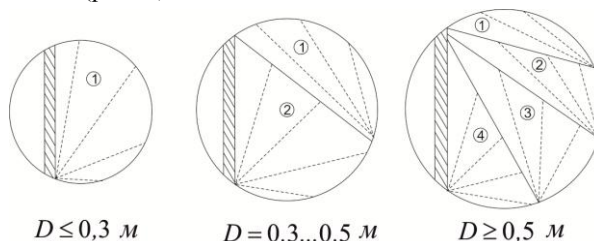


Рис. 1. Приемы выполнения основного реза на валке деревьев бензиномоторным инструментом

Методика расчета удельных энергозатрат на процесс поперечного пиления древесины с веерным надвиганием цепного пильного аппарата предполагает последовательное определение: скорости подачи с учетом ограничения по мощности привода и прочности пильной цепи; толщины стружки, снимаемой при пиление каждым зубом пильной цепи; удельной работы резания; усилия резания; тягового усилия цепи для преодоления суммарного сопротивления пилению; мощности затрачиваемой на пиление; производительности чистого пиления; продолжительности чистого пиления; общих энергозатрат.

Удельные энергозатраты на 1 м<sup>3</sup> заготовленной древесины

$$\mathcal{E}_{yo} = \frac{\mathcal{E}_{общ}}{V_{хл}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{общ}$  – общие энергозатраты на процесс пиления, кВт·с;

$V_{хл}$  – средний объем хлыста на лесосеке, м<sup>3</sup>.

Удельные энергозатраты на 1 м<sup>2</sup> площади пропила с учетом расчетной схемы представленной на рис.2

$$\mathcal{E}_{yo} = \frac{\mathcal{E}_{общ}}{\pi R^2 \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) + \frac{(x_0 - x_1)(y_2 - y_0)}{2}}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус поперечного сечения дерева в плоскости срезания, м;

$\alpha$  – угол сектора CMD, град.;

$x_{0i}$  – абсцисса центра поперечного сечения дерева в плоскости срезания, м;

$x_1$  – абсцисса центра вращения цепного пильного аппарата в принятой системе прямоугольных координат, м;

$y_2$  – ордината точки M, м;

$y_{0i}$  – ордината центра поперечного сечения дерева в плоскости срезания, м.

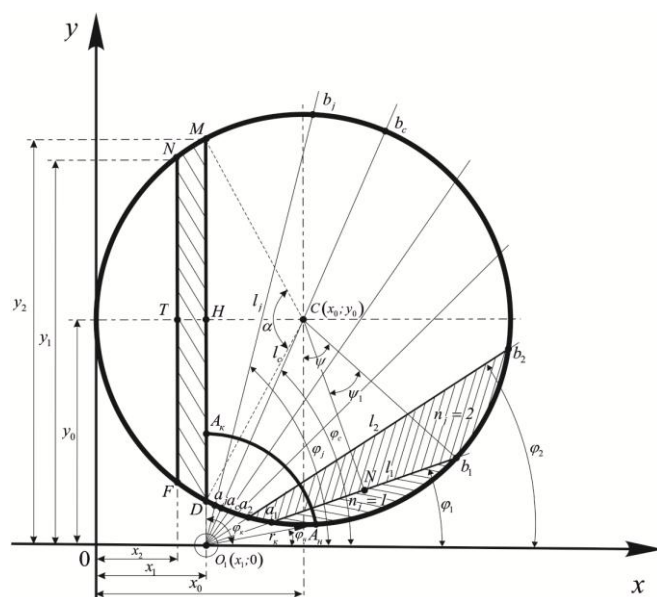


Рис. 2. Расчетная схема к определению геометрических параметров взаимодействия цепного пильного аппарата с предметом труда в процессе поперечного пиления

Общие энергозатраты на выполнение основного реза на валке дерева

$$\mathcal{E}_{общ} = N_p t_{ч.п.}, \quad (3)$$

где  $N_p$  – фактическое значение мощности затрачиваемой на пиление, Вт;

$t_{ч.п.}$  – продолжительность чистого пиления, с.

Мощность затрачиваемая на пиление

$$N_p = \frac{z_m v_u}{\eta_0}, \quad (4)$$

где  $z_m$  – тяговое усилие, создаваемое пильной цепью для преодоления суммарного сопротивления пилению, Н;

$v_u$  – скорость движения пильной цепи, м/с;

$\eta_0$  – к.п.д. кинематических пар, передающих вращающий момент от двигателя к ведущей звездочки пильного аппарата.

Тяговое усилие, создаваемое пильной цепью для преодоления суммарного сопротивления пилению

$$z_m = P_p (1 + a \mu) + 2,08 m_u l_u q \mu + 0,08 z_0, \quad (5)$$

где  $P_p$  – фактическое значение усилия резания, Н;

$a$  – коэффициент пропорциональности между усилием резания и усилием подачи;

$\mu$  – коэффициент трения пильной цепи по направляющей шине;

$m_u$  – масса 1 погонного метра, кг;

$l_u$  – общая длина пильной цепи, м;

$q$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$z_0$  – монтажное натяжение цепи, Н.

Среднее значение усилия резания

$$P_p = \frac{\sum_{j=1}^j P_{pj} S_j}{\pi R^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{360} \right) + \frac{(x_0 - x_1)(y_2 - y_0)}{2}}, \quad (6)$$

где  $P_{pj}$  – среднее усилие резания за период  $j$ -го фрагмента пиления, Н;

$S_j$  – площадь  $j$ -го фрагмента пиления, м<sup>2</sup>.

Среднее усилие резания за период  $j$ -го фрагмента пиления с учетом расчетной схемы на рис. 3

$$P_{pj} = k_j \cdot b \cdot H_j \frac{U^*}{v_u}, \quad (7)$$

где  $k_j$  – среднее значение удельной работы резания, Дж/м<sup>3</sup>;

$b$  – ширина пропила, м;

$H_j$  – средняя высота пропила за период  $j$ -го фрагмента пиления, м;

$U^*$  – наименьшее значение скорости подачи из двух ограничений (по мощности привода и прочности пильной цепи), м/с.

$$S_j = R_i^2 \left( \arcsin \frac{2n_{j+1}t_u}{R_i} - \arcsin \frac{2n_j t_u}{R_i} \right) - 2t_u \left( n_{j+1} \sqrt{R_i^2 - n_{j+1}^2 t_u^2} - n_j \sqrt{R_i^2 - n_j^2 t_u^2} \right), \quad (8)$$

где  $n_j$  – количество разноименных зубьев одновременно участвующих в начале пиления  $j$ -го фрагмента;

$n_{j+1}$  – количество разноименных зубьев одновременно участвующих в конце пиления  $j$ -го фрагмента;

$t_u$  – шаг цепи по осям заклепок, м.

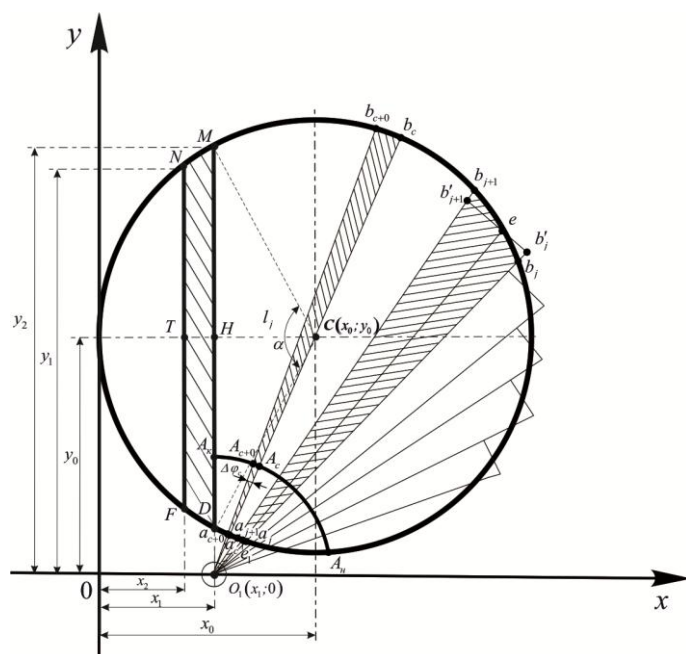


Рис. 3. Расчетная схема к определению режимных характеристик процесса поперечного пиления древесины с верным надвиганием цепного пильного аппарата на предмет труда

Площадь  $j$ -го фрагмента пиления

$$S_j = R_i^2 \left( \arcsin \frac{2n_{j+1}t_u}{R_i} - \arcsin \frac{2n_j t_u}{R_i} \right) - 2t_u \left( n_{j+1} \sqrt{R_i^2 - n_{j+1}^2 t_u^2} - n_j \sqrt{R_i^2 - n_j^2 t_u^2} \right), \quad (8)$$

где  $n_j$  – количество разноименных зубьев одновременно участвующих в начале пиления  $j$ -го фрагмента;  $n_{j+1}$  – количество разноименных зубьев

одновременно участвующих в конце пиления  $j$ -го фрагмента;  $t_u$  – шаг цепи по осям заклепкам, м.

В общем случае за период времени  $\tau_j$  в пропиле одновременно находится  $n_j$  разноименных

зубьев, причем  $n_j \in \left\{ 0, 1, 2, \dots, \frac{2R}{t_s} \right\}$ ,

где  $t_s$  – шаг между одноименными режущими зубьями цепи, м.

Среднее значение удельной работы резания

$$k = \frac{2,65 \cdot 10^5}{(h_{zij} b)^{0,33}} a_n a_w a_p a_t, \quad (9)$$

где  $h_{zij}$  – среднее значение суммарной толщины стружки, которая снимается каждым зубом за время  $j$ -го фрагмента пиления, м;

$a_n$  – коэффициент, учитывающий породу древесины;

$a_w$  – коэффициент, учитывающий влажность древесины;

$a_t$  – коэффициент, учитывающий температуру древесины;

$a_p$  – коэффициент, учитывающий степень затупления режущих кромок зуба.

Среднее значение суммарной толщины стружки, снимаемое каждым зубом за время  $j$ -го фрагмента пиления

$$h_{zij} = \frac{S_j}{H_j N_{zj}}, \quad (10)$$

где  $N_{zj}$  – общее число зубьев цепи, которые взаимодействовали с древесиной за время  $j$ -го фрагмента пиления.

Средняя высота пропила за период  $j$ -го фрагмента пиления

$$H_j = 4(n_j + n_{j+1})t_u. \quad (11)$$

Общее число зубьев цепи, которые взаимодействовали с древесиной за время  $j$ -го фрагмента пиления

$$N_{zj} = \frac{7|\varphi_{j+1} - \varphi_j|}{4m_0} \left( \sqrt{(R_i - x_1)^2 + y_{0i}^2} + R_i \right), \quad (12)$$

где  $m_0$  – снижение ограничителя подачи, м.

$\varphi_j$  – угол поворота направляющей пильной шины, соответствующий началу  $j$ -го фрагмента пиления, рад.;

$\varphi_{j+1}$  – угол поворота направляющей пильной шины, соответствующий концу  $j$ -го фрагмента пиления, рад.

Угол поворота направляющей пильной шины соответствующий началу  $j$ -го фрагмента пиления

$$\varphi_{j(j+1)} = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{(x_1 - R_i) y_{0i} + A_{j(j+1)} \sqrt{(x_1 - R_i)^2 + y_{0i}^2 - A_{j(j+1)}^2}}{A_{j(j+1)}^2 - y_{0i}^2}, \quad (13)$$

$$\text{где } A_{j(j+1)} = \sqrt{R_i^2 - n_{j(j+1)}^2 t_u^2}.$$

Продолжительность чистого пиления определится следующим образом:

$$t_{ч.п.} = \frac{4t_u}{m_0 v_u} \left( \sqrt{(R - x_1)^2 + y_0^2} + R \right). \quad (14)$$

Производительность чистого пиления

$$\Pi_{ч.п.} = \frac{m_0 v_u \left( \pi R^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{360} \right) + \frac{(x_0 - x_1)(y_2 - y_0)}{2} \right)}{4t_u \left( \sqrt{(R - x_1)^2 + y_0^2} + R \right)}. \quad (15)$$

Скорость подачи ограниченная мощностью привода пильной цепи

$$U_m \leq \left[ \frac{[N_H \eta_0 - (2,08 m_u l_u q \mu + 0,08 z_0) v_u] (4t_u)^{0,33}}{2,65 \cdot 10^5 a_n a_w a_p a_t^{0,33} b^{0,67} H (1 + a \mu)} \right]^{1,5}, \quad (16)$$

где  $N_H$  – мощность двигателя привода цепи,

Вт;

$\eta_0$  – КПД кинематических пар, передающих вращающий момент от двигателя к ведущей звездочке пильного аппарата;

$q$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Скорость подачи ограниченная прочностью пильной цепи

$$U_{np} \leq \left[ \frac{[z_{раз} - (2,08 m_u l_u q \mu + 0,08 z_0) - (z_0 + z_u + z_{дун}) v_u]^{0,67} (4t_u)^{0,33}}{2,65 \cdot 10^5 a_n a_w a_p a_t^{0,67} H (1 + a \mu)} \right]^{1,5}, \quad (17)$$

где  $z_{раз}$  – допустимое разрывное усилие, Н;

$z_{\eta}$  – натяжение пильной цепи под действием центробежных сил, Н;

$z_{дин}$  – динамические усилия, возникающие вследствие неравномерности движения звеньев пильной цепи при зацеплении с ведущей звездочкой и направляющим устройством, Н.

Таким образом, нами были формализованы все необходимые зависимости, отражающие закономерности связей, характеризующих процесс среза деревьев при веерной подаче цепного пильного механизма бензопилы. В своей совокупности они представляют обобщенную детерминированную математическую модель выполнения основного реза на валке деревьев, имеющую многоцелевое назначение.

На основе представленной математической модели процесса поперечного пиления древесины цепным пильным аппаратом создано программное обеспечение для ЭВМ в среде Delphi, позволяющее достоверно прогнозировать показатели работы различных вариантов комплектования бензиномоторного инструмента в заданных размерно-качественных характеристиках древостоя и по минимуму удельных энергозатрат обосновывать оптимальное сочетание бензопилы, пильной шины, пильной цепи. Блок-схема алгоритма программы для ЭВМ по обоснованию оптимального комплекта бензиномоторного инструмента представлена на рис. 4. Первые два блока алгоритма включают процедуры выбора комплекта бензиномоторного инструмента. Блоки 3, 4, 5 предназначены для ввода характеристик природно-производственных условий, а также параметров бензопилы, пильной шины и пильной цепи. Блоки 6, 7, 8 и 9 содержат вычислительные процедуры расчета: показателей кинематики процесса; силовых параметров пиления; производительности чистого пиления и продолжительности чистого пиления; а также энергетических

показателей (для всех отобранных для сравнения альтернативных вариантов). В блоке 10 производится сравнение вариантов и выбор оптимального из них. Если условие оптимальности соблюдается, то управление в алгоритме передается на блок 11 для графического вывода результатов расчета. В противном случае, управление передается блоку 3 или 4, с которого начинается количественная оценка очередного из альтернативных вариантов. База данных для проведения имитационных экспериментов на представленной математической модели создана и расширяется постоянно на основе нормативно-справочной информации действующей в отрасли и предлагаемой производителями бензопил и их комплектующих, а также характеристик природно-производственных условий, для которых рекомендовано применение сравниваемых вариантов. Интерфейсные формы компьютерной программы «Программа для моделирования процесса пиления древесины бензиномоторным инструментом» [12] для ввода исходных данных представлены на рис. 5. Там можно видеть 12 выбранных для сравнения в имитационном эксперименте вариантов комплектования бензопил Husqvarna 357 и Stihl S 260 на примере разрабатываемой лесосеки в лесозаготовительной компании ООО «ЛК Кедр» (Московская область, г. Сергиев Посад, июль 2017 г.). Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 6. В качестве двух предлагаемых вариантов для данного предприятия оказались бензопила Husqvarna 357 + шина "15" + цепь 25 RM и Stihl S 260 + шина "15" + 26 RM. Это позволило по сравнению с используемым на предприятии вариантом (бензопила Husqvarna 357 + шина "16" + цепь 35 RM) уменьшить удельные энергозатраты на 9 % и 7 %.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма программы для ЭВМ по обоснованию оптимального комплекта бензиномоторного инструмента

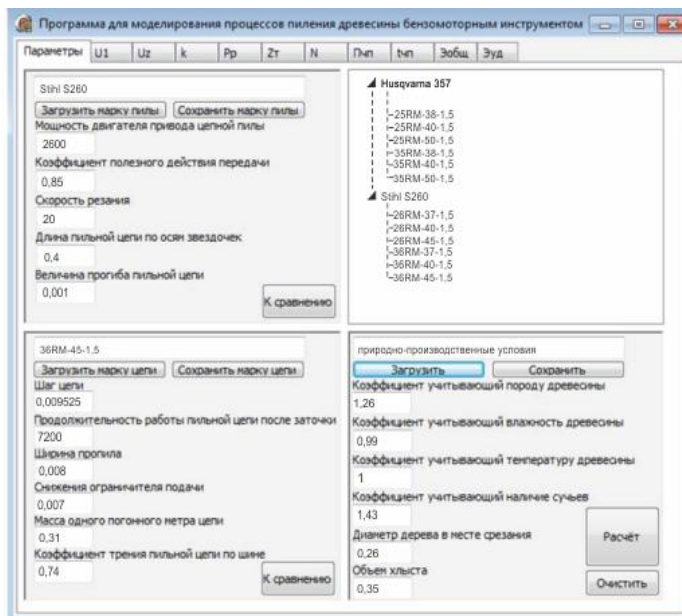


Рис. 5. Интерфейсная форма ввода данных компьютерной программы для имитационного эксперимента



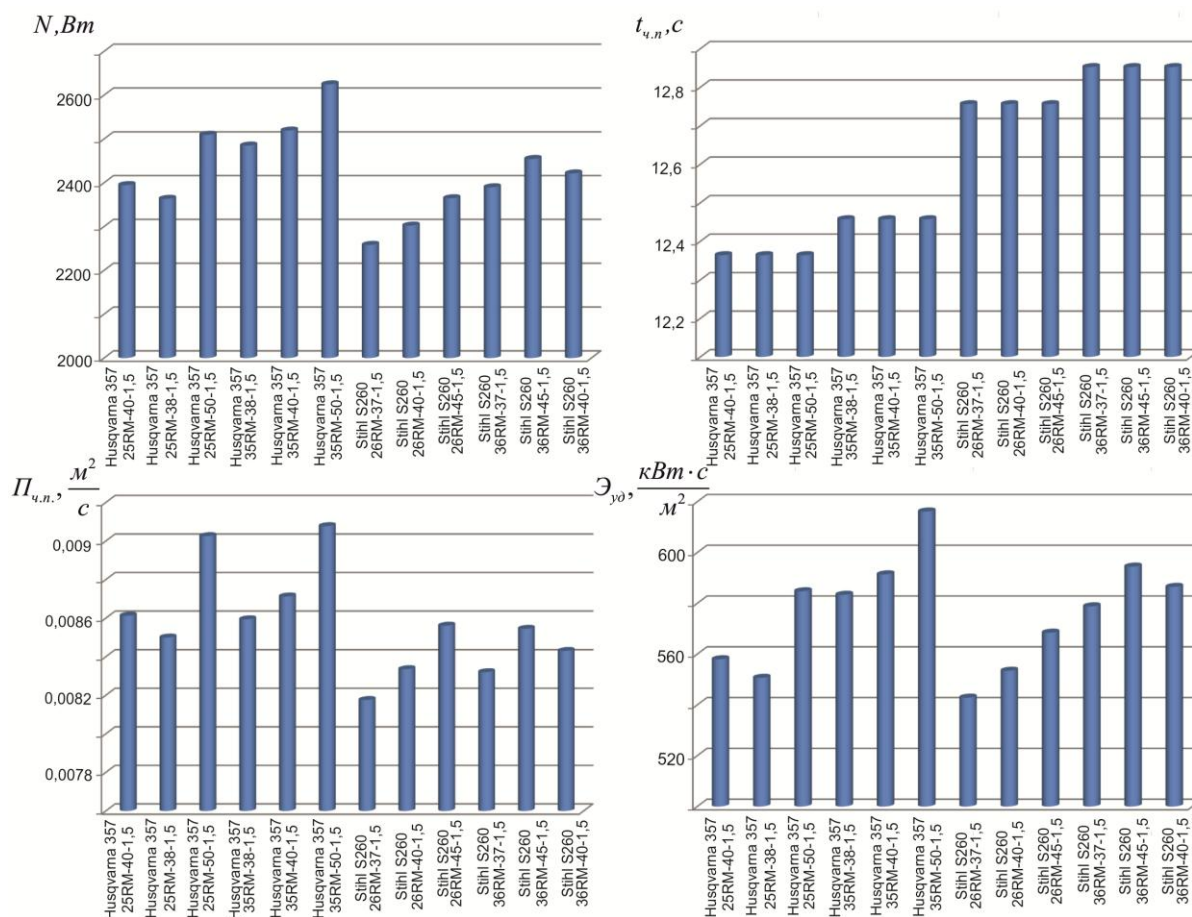


Рис. 6. Результаты имитационного эксперимента по расчету удельных энергозатрат для сравниваемых комплектов бензиномоторного инструмента

Представленный математический аппарат для исследования процесса пиления древесины чувствителен к большому количеству факторов:  $N_H, m_c, l_c, z_0, v_c, t_c, m_0, a_n, a_w, a_p, a_t, R$ . Сравнение результатов имитационных экспериментов на основе разработанной математической модели с данными лабораторных и производственных экспериментов ряда ученых [7, 11] подтверждает достаточно хорошую их сходимость – 3...6 %.

Использование данного математического аппарата с программным обеспечением рекомендуется для: оценки конструкций пильной цепи на стадии эскизного проектирования, как по режущим, так и эксплуатационным свойствам; оптимизации конструктивных параметров цепей и других элементов срезающего устройства с учетом изменения размерно-качественных характеристик предмета труда; прогнозирования удельных энергозатрат на процесс срезания дерева и выбора наилучшего ком-

плекта бензиномоторного инструмента в заданных условиях разрабатываемых лесосек, а также обоснования режима его работы.

Предлагаемая методика расчета удельных энергозатрат процесса поперечного пиления древесины является существенным дополнением теории резания, так как в подавляющем большинстве случаев при использовании цепного режущего органа применяется веерная подача, а созданная на ее основе компьютерная программа для ЭВМ создает широкие возможности внедрения полученных результатов исследования в реальное производство и позволяет повысить эффективность процесса пиления древесины бензиномоторным инструментом. Положительное решение вопроса обоснования оптимального комплекта бензиномоторного инструмента в индивидуальных природно-производственных условиях разрабатываемых лесосек дает возможность приступить к созданию 2-го и 3-го

уровня автоматизированной системы по совершенствованию обрабатываемых операций лесосечных работ, где будут ставиться вопросы научно-обоснованного выбора технологии, организации труда и параметров проводимой рубки с позиции

приведенных удельных энергозатрат, производительности, трудоемкости процесса, а также лесоводственного и экологического ущерба лесной среде.

### Библиографический список

1. Абрамов, В. В. Разработка и обоснование эффективной технологии трелевки в малолесных районах : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01: защищена 24.04.09 / В. В. Абрамов. – Воронеж, 2009. – 366 с.
2. Белкин, М. А. Алгоритмы технического обслуживания и ремонта современных бензиномоторных инструментов / М. А. Белкин // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 5. – С. 42-44.
3. Бондаренко, А. В. Моделирование природно-производственных условий в задачах исследования первичного транспорта леса в горной местности [Электронный ресурс] / А. В. Бондаренко, В. В. Абрамов, Ф. В. Пошарников // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2 (40). – Режим доступа: [www.science-education.ru/102-5518](http://www.science-education.ru/102-5518).
4. Бензиномоторные пилы. Устройство и эксплуатация : учеб. / О. Н. Галактионов [и др.]. – СПб., 2017. – 206 с.
5. Герц, Э. Ф. Рациональная организация выборочной рубки с использованием бензиномоторной пилы и мини-трактора / Э. Ф. Герц, Н. Н. Теринов // Пермский аграрный вестник. – 2017. – № 4 (20). – С. 152-157.
6. Основные ошибки вальщиков, приводящие к выходу из строя бензиномоторных пил / А. В. Гончаров, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 10. – С. 17-21.
7. Совместное влияние влажности и температуры древесины сосны на энергоемкость процесса поперечного пиления / И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 157-162.
8. Анализ общих закономерностей влияния стажа работы оператора на производительность технологического процесса производства сортиментов с использованием харвестера / М. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, М. В. Степанищева, И. Н. Дмитриева // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 1 (25). – С. 157-161.
9. Заикин, А. Н. Методика автоматизированного оперативного планирования лесосечных работ / А. Н. Заикин, И. И. Теремкова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (54). – С. 102-109.
10. Заикин, А. Н. Методика расчета продолжительности и оценки энергозатрат работы лесосечных машин / А. Н. Заикин, Е. Г. Рыжикова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2015. – № 1 (343). – С. 94-102.
11. Иевлев, А. И. Моделирование и оптимизация лесопромышленных процессов : тексты лекций в 2 ч. Ч. 1 / А. И. Иевлев, И. А. Сидельников. – Воронеж, 1997. – 70 с.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617824. Программа для моделирования процесса пиления древесины бензиномоторным инструментом / Л. Д. Бухтояров, А. С. Черных, Д. Н. Афоничев, В. В. Абрамов, И. Н. Троянов, И. В. Бурдуковский (РФ). – Правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (RU). – № 2018614830, заявлено 15.05.2018; зарегистрировано 02.06.2018.
13. Substantiation and valuation of effectiveness softer spective constructions of forest tractor sancillary equipment / V. P. Posmetyev [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11 № 3. – P. 1840-1855.
14. Shegelman I. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia / I. Shegelman, P. Budnik, E. Morozov // Lesnícky časopis – Forestry Journal. – 2015. – № 61(4). – P. 211-220.

15. Zelikov, V. A. Substantiation Based on Simulation Modeling of Hitch for Tillage Tools Parameters / V. A. Zelikov, V. I. Posmetiev, M. A. Latysheva // World Applied Sciences Journal. – 2014. – № 30(4). – P. 486-492.

### References

1. Abramov V. V. *Razrabotka i obosnovaniye effektivnoy tekhnologii trelevki v malolesnykh rayonakh* [Development and justification of efficient technology for skidding in low forest areas Cand. of technical sci. Diss]. Voronezh, 2009, 366 p. (In Russian).
2. Belkin M. A. *Algoritmy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sovremennykh benzinomotornykh instrumentov* [Algorithms of maintenance and repair of modern gasoline-powered tools]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines]. 2017, no. 5, pp. 42-44. (In Russian).
3. Bondarenko A. V., Abramov V. V., Posharnikov F. V. *Modelirovaniye prirodno-proizvodstvennykh usloviy v zadachakh issledovaniya pervichnogo transporta lesa v gornoy mestnosti* [Modeling of natural and industrial conditions in the tasks of research of primary forest transport in mountainous areas]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and education]. 2012, no. 2 (40). Electronic resource – mode of access: [www.science-education.ru/102-5518](http://www.science-education.ru/102-5518).
4. Galaktionov O. N., Gasparyan G. D., Grigoriev I. V. [et al.]. *Benzinomotornyye pily. Ustroystvo i ekspluatatsiya Gasoline saws* [Gasoline saws. Device and operation]. St. Petersburg, 2017, 206 p. (In Russian).
5. Hertz E. F., Terinov N. N. *Ratsional'naya organizatsiya vyborochnoy rubki s ispol'zovaniyem benzinomotor-noy pily i mini-traktora* [Rational organization of selective logging using a gasoline-powered saw and a mini-tractor]. *Permskiy agrarnyy vestnik* [Perm Agrarian Journal]. 2017, no. 4 (20), pp. 152-157. (In Russian).
6. Goncharov A. V., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoriev M. F. *Osnovnyye oshibki val'shchikov, privodyashchiye k vykhodu iz stroya benzinomotornykh pil* [The main errors of fellers, leading to failure of gasoline-powered saws]. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*. [Repair, Reconditioning, Modernization]. 2018, no. 10, pp. 17-21.
7. Grigoriev I. V., Khitrov E. G., Ivanov V. A., Zhdanovich V. I., Derbin M. V. *Sovmestnoye vliyaniye vlazhnosti i temperatury drevesiny sosny na energoyemkost' protsessa poperechnogo pileniya* [The combined effect of temperature and humidity of pine wood on the energy intensity of the transverse sawing process]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods Technology]. 2014, no. 2 (22), pp. 157-162. (In Russian).
8. Dmitrieva M. N., Grigoriev I. V., Dmitrieva I. N., Stepanischeva M. V. *Analiz obshchikh zakonomernostey vliyaniya stazha raboty operatora na proizvoditel'nost' tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva sortimentov s ispol'zovaniyem kharvestera* [Analysis of the general patterns of the influence of operator experience on the productivity of the technological process of production of assortments using a harvester]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods Technology]. 2015, no. 1 (25), pp. 157-161. (In Russian).
9. Zaikin A. N., Teremkova I. I. *Metodika avtomatizirovannogo operativnogo planirovaniya lesosechnykh rabot* [Methods of automated operational planning of logging work]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Agrarian University]. 2017, no. 3 (54), pp. 102-109. (In Russian).
10. Zaikin A. N., Teremkova I. I. *Metodika rascheta prodolzhitel'nosti i otsenki energozatrat raboty lesosechnykh mashin* [The method of calculating the duration and estimation of the energy consumption of logging machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal]. 2015, no. 1 (343), pp. 102-109.
11. Ievlev A. I., Sidelnikov I. A. *Modelirovaniye i optimizatsiya lesopromyshlennykh protsessov* [Modeling and optimization of forestry processes]. Voronezh, 1997, 70 p. (In Russian).
12. Bukhtoyarov L. D., Chernykh A. S., Afonichev D. N. [et al.]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF* [Certificate of state registration of computer program RU]. *Programma dlya modelirovaniya protsessa pileniya drevesiny benzinomotornym instrumentom* [Program for simulating the process of sawing wood with a gasoline-powered tool]. No. 2018614830, 2018.

13. Posmetyev V. P., Zelikov V. A., Drapalyuk M. V., Latysheva M. A., Shatalov E. V. Substantiation and valuation of effectiveness of perspective constructions of forest tractor ancillary equipment. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, Vol. 11, no. 3, pp. 1840-1855.

14. Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia. *Lesnícky časopis - Forestry Journal*, 2015, no. 61(4), pp. 211-220.

15. Zelikov V. A., Posmetiev V. I., Latysheva M. A. Substantiation Based on Simulation Modeling of Hitch for Tillage Tools Parameters. *World Applied Sciences Journal*, 2014, no. 30(4), pp. 486-492.

### Сведения об авторах

*Троянов Игорь Николаевич* – аспирант кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail.ru: troyanovi@mail.ru.

*Абрамов Виталий Викторович* – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail.ru: vitali1980a@mail.ru.

*Бухтояров Леонид Дмитриевич* – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail.ru: vglta-mlx@yandex.ru.

*Черных Александр Сергеевич* – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail.ru: as-umu@mail.ru.

*Афоничев Дмитрий Николаевич* – профессор кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail.ru: dmafonichev@yandex.ru.

### Information about authors

*Troyanov Igor Nikolayevich* – Postgraduate Student of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD student, Voronezh, Russian Federation; e-mail: troyanovi@mail.ru.

*Abramov Vitaly Viktorovich* – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD (Engineering), Voronezh, Russian Federation; e-mail: vitali1980a@mail.ru.

*Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich* – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD (Engineering), Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

*Chernykh Alexander Sergeevich* – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD (Engineering), Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: as-umu@mail.ru.

*Afonichev Dmitriy Nikolayevich* – Professor of the Department of Electrical Engineering and Automatics of Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great", DSc (Engineering), Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: dmafonichev@yandex.ru.