

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ БЕНЗОПИЛАМИ

аспирант **И.Н. Троянов**¹

кандидат технических наук, доцент **В.В. Абрамов**¹

кандидат технических наук, доцент **Л.Д. Бухтояров**¹

доктор технических наук, профессор **Д.Н. Афоничев**²

кандидат технических наук, доцент **А.С. Черных**¹

кандидат технических наук, доцент **А.И. Максименков**¹

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

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

В статье предлагается новый комплексный критерий оценки эффективности выполнения обрабатываемых операций лесосечных работ – удельные приведенные энергозатраты, отличающийся возможностью наряду с суммарными затратами энергии на пиление учитывать производительность труда, а также количество задействованных в работе мотористов со своими индивидуальными особенностями. Для достоверного прогнозирования данного показателя по 12 технологическим вариантам выполнения валки деревьев, обрезки их стволов от сучьев и раскряжевки хлыстов на сортименты были разработаны имитационные модели, отличающиеся чувствительностью к изменению в широком диапазоне природно-производственных условий разрабатываемых лесосек, а также учетом квалификации и утомляемости мотористов бензопил. На основе разработанных имитационных моделей была создана программа для ЭВМ в среде Delphi по обоснованию технологических вариантов выполнения обрабатываемых операций бензиномоторным инструментом и получено авторское свидетельство (№ гос. регистрации 2019611250). При ее использовании на стадии технологического проектирования лесосечных работ можно повысить эффективность выполнения обрабатываемых операций бензопилами по критерию удельных приведенных энергозатрат на 5-39,5 % в зависимости от применяемой технологии на предприятии., что было подтверждено на одной из разрабатываемых лесосек (ООО «ЛК Кедр», Владимирская область, Александровское лесничество, май 2018 г.) Проведенная производственная проверка результатов имитационного эксперимента подтвердила их достоверность с расхождением 3-6 %.

Ключевые слова: бензиномоторный инструмент, обрабатываемые операции, лесосечные работы, имитационное моделирование, удельные приведенные энергозатраты

RESEARCH OF TECHNOLOGY OPTIONS FOR THE PERFORMANCE OF LOGGING PROCESSING OPERATIONS USING CHAINSAWS

Post-graduate student **L.N. Troyanov**¹

PhD (Engineering), Associate Professor **V.V. Abramov**¹

PhD (Engineering), Associate Professor **L.D. Bukhtoyarov**¹

DSc (Engineering), Professor **D.N. Afonichev**²

PhD (Engineering), Associate Professor **A.S. Chernykh**¹

PhD (Engineering), Associate Professor **A.I. Maksimenkov**¹

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 article proposes a new comprehensive criterion to evaluate the efficiency of logging processing operations. These are specific reduced energy costs, characterized by the ability to take into account labor productivity along with the total energy consumption for sawing, as well as the number of motor-men involved in the work with their individual characteristics. Simulation models have been developed for reliable prediction of this indicator for 12 technological options for tree felling, trimming their trunks from knots and cutting logs into assortments. The models are sensitive to changes in a wide range of natural production conditions of the developed cutting areas, as well as qualifications and tiredness of chainsaw motor-men. A computer program in the Delphi environment on the justification of technological options for processing operations with a gasoline-powered tool was created based on the developed simulation models. An author's certificate has been obtained (state registration number 2019611250). When using it at the stage of technological design of logging operations, it is possible to increase the efficiency of processing operations with chainsaws by 5-39.5 % according to the criterion of specific reduced energy costs depending on the technology used at the enterprise. This was confirmed at one of the developed cutting areas (LLC LK Kedr, Vladimir Region, Aleksandrovskoe forest district, May 2018). Production verification of the simulation experiment results has confirmed their reliability with a difference of 3-6 %.

Keywords: gasoline-powered tools, processing operations, logging, simulation modeling, specific reduced energy consumption

Введение

В настоящее время на лесозаготовках при выполнении обрабатывающих операций широко используются бензопилы [5]. Особенно это наблюдается на рубках ухода за насаждением, при малообъемном лесопользовании, а также в горной местности и в крупномерном лесу, там, где другие средства ограничены в работе лесоводственно-экологическими требованиями, экономической целесообразностью или по своим техническим возможностям [2, 4]. В таких условиях результаты выполнения валки деревьев, очистки их от сучьев с последующей раскряжкой хлыстов задают ритмичность работы трелевочного средства на ведущей, наиболее затратной операции, оказывая тем самым влияние на эффективность функционирования всей системы машин на лесосеке [1, 3, 18].

Исследованиям в этой области посвящены труды многих известных ученых. Их анализ свидетельствует о сложности прогнозирования работы мотористов с бензопилами при сравнении большого количества различных вариантов по технологии работ, организации труда и комплектованию бензиномоторного инструмента в меняющихся на каждой разрабатываемой лесосеке условиях производства (вид рубки и ее интенсивность, конфигурация лесосеки, ее размеры и захламленность, доля технологических площадей и их параметры, способ трелевки, сезон года) и природной среды (состав насаждения, его таксационные характеристики, наличие подроста) с учетом квалификации и утомляемости исполнителей [8, 12, 17]. При этом современные требования к оценке эффективности выполнения лесосечных работ определяют необходи-

мость многостороннего подхода по целому ряду позиций (энергетическая, технико-экономическая, лесоводственно-экологическая и т. д.). В этой связи проф. Э.Ф. Герц [6] и доц. А.В. Матросов [13] в своих работах рекомендуют использовать несколько следующих критериев: затраты времени на выполнение обрабатывающих операций, производительность, коэффициент использования бензиномоторного инструмента в течение смены, а также комплексную выработку на одного рабочего. В трудах проф. А.Н. Заикина [10, 11] и проф. Ю.А. Ширнина [19] для оценки эффективности технологических операций одновременно с показателем продолжительности их выполнения используются энергозатраты. Во многих работах проф. П.Б. Рябухина [14, 15] проф. И.В. Григорьева [7, 9] уделяется внимание потерям древесного сырья из-за некачественного выполнения обрабатывающих операций по причине низкой квалификации исполнителей, а также обращается внимание на необходимость изучения физического состояния мотористов бензопил и операторов машин в процессе работы. Такое количество часто зависящих и противоречащих друг другу оценочных показателей, используемых совместно, приводит к значительным трудностям моделирования операционных процессов и сложности их достоверного прогнозирования на стадии проектирования лесосечных работ.

Материалы и методы

В этой связи на кафедре лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации в Воронежском государственном лесотехническом университете для обоснования технологии обрабатывающих операций лесосечных работ было предложено использовать показатель удельных приведенных энергозатрат в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{y.d.n} = \frac{\left(\sum_{k=1}^K N_k t_k \right) N_{p.k}}{\Pi_{sm.k}}, \quad (1)$$

где N_k – мощность, затрачиваемая на выполнение k -го элемента одной или нескольких последовательно выполняемых обрабатывающих операций, Вт;

t_k – время, затрачиваемое на выполнение k -го элемента одной или нескольких последовательно выполняемых обрабатывающих операций, с;

$\Pi_{sm.k}$ – сменная производительность бензопилы на одной или нескольких последовательно выполняемых обрабатывающих операциях, состоящих из K элементов, м³;

$N_{p.k}$ – число рабочих, занятых на выполнении одной или нескольких последовательно выполняемых обрабатывающих операций, чел.

Достоинством предлагаемого показателя является возможность одновременного учета суммарных затрат энергии при пилении, количества человек в работе и производительности труда при выполнении обрабатывающих операций различными комплектами бензиномоторного инструмента в любой технологической последовательности лесосечных работ (рис. 1).

При определении удельных приведенных энергозатрат требуется достоверное прогнозирование производительности труда на валке деревьев, очистке их стволов от сучьев и раскряжевке хлыстов в меняющихся условиях производства и природной среды. Для этого предлагается использовать в расчетах метод имитационного моделирования времени лесозаготовительных процессов, реализация которого представлена ниже на блок-схеме модели выполнения обрабатывающих операций по одному из сравниваемых технологических вариантов (рис. 2). При ее создании использовалась следующая символизация параметров:

$t_{n.o}$ – время движения моториста от одного дерева к другому, с;

$t_{n.p}$ – время на подготовку рабочего места, с;

t_n – время на выполнение подпила, с;

$t_{n.n.c}$ – время перехода от подпила к спиливанию, с;

$t_{c.m}$ – время сталкивания дерева с пня и его падения, с;

$t_{o.p}$ – время выполнения основного реза, с;

t_c – время срезания сучьев, с;

$t_{\sigma o}$ – время движения моториста от комля к вершине дерева и обратно в процессе срезания сучьев и раскряжевки, с;

t_{nn} – время поперечного пиления при раскряжевке хлыста, с;

$t_{ок}$ – время окучивания лесоматериалов, с;

V_{hl} – объем хлыста, м³;

q – запас леса на га, м³/га;

k_i – доля вырубаемого запаса;

V_{md} – скорость движения моториста от одного дерева к другому, с;

d_c – срезаемый диаметр дерева, м;

p_1 – коэффициент увеличения за счет подпила площади пропила;

Π_{cn} – производительность чистого пиления бензиномоторного инструмента, м²/с;

f – общая площадь срезания всех сучьев на дереве, м²;

l_{hl} – длина дерева, м;

l_b – длина вершины дерева, м;

V_c – скорость движения моториста от комля к вершине дерева и обратно в процессе срезания сучьев и раскряжевки, с;

l_c – длина сортимента, м³;

n_c – среднее количество сортиментов из одного хлыста на раскряжевке;

t_{yc} – время окучивания одного сортимента, с;

M – количество часов в смене;

φ_1 – коэффициент использования времени смены;

$\bar{\varphi}_{u.o.}$ – коэффициент индивидуальных особенностей исполнителей обрабатывающих операций.

Время, затрачиваемое в течение смены на выполнение обрабатывающих операций, суммируется и сравнивается в блоке 21 со временем смены ($3600 \cdot M \cdot \varphi_1 \cdot \bar{\varphi}_{u.o.}$). Использование при этом коэффициента индивидуальных особенностей исполнителей открывает широкие возможности для изучения влияния человеческого фактора на эффектив-

ность исследуемых процессов лесосечных работ. Для определения значений этого показателя предлагается следующая формула:

$$\bar{\varphi}_{u.o.} = \frac{\left(\sum_{k=1}^K \bar{t}_k \right) M}{\sum_{m=1}^M \bar{t}_m}, \quad (2)$$

где \bar{t}_k – среднее модельное значение продолжительности k -го элемента одной или нескольких последовательно выполняемых операций при обработке одного дерева, с;

\bar{t}_m – среднее значение фактической продолжительности времени цикла обработки одного дерева в m -й час работы моториста, с.

На основе полученных имитационных моделей выполнения обрабатывающих операций было создано программное обеспечение для ЭВМ в среде Delphi [16]. Разработанная программа позволяет сравнивать 12 вариантов, отличающихся друг от друга составом обрабатывающих операций, местом их выполнения, инструментом, а также количеством мотористов бензопил, задействованных в работе на валке деревьев, обрезке сучьев и раскряжевке хлыстов с учетом их индивидуальных особенностей.

Для реализации разработанного программного обеспечения были проведены хронометражные наблюдения за работой трех мотористов и произведен сбор данных по затратам времени на выполнение всех составляющих элементов обрабатывающих операций в различных технологических последовательностях. Наблюдения проводились отдельно по каждому часу работы в течение смены с 1-го по 4-й и с 6-го по 8-й в ООО «ЛК Кедр» (Александровское лесничество, Владимирская область) при следующих природно-производственных условиях: выборочная рубка; площадь лесосеки $S_i = 20$ га; породный состав – 5СЗЕ1Б1Ос; интенсивность рубки $k_i = 0,35$; запас леса $q = 188$ м³/га; средний объем хлыста $V_{hl} = 0,36$ м³; средняя длина дерева $l_{hl} = 22$ м; на обрезке сучьев по технологиям № 2, 4, 5, 10, 11 – бензопила Stihl S 260 ($N_k = 2,4$ кВт, $\Pi_{cn} = 0,008$ м²/с); на других обрабатывающих операциях по обозначенным техноло-

гиям, а также на валке, обрезке сучьев и раскряжке по технологиям № 1, 3, 6, 7, 8, 9, 12 – бензопила Husqvarna 357 ($N_k = 3,2 \text{ кВт}$, $\Pi_{сн} = 0,01 \text{ м}^2 / \text{с}$). Статистическая обработка результатов наблюдений показана ниже на примере времени подготовки рабочего места – $t_{н.р}$ в 8-й час

работы моториста № 1. Репрезентативность полученных выборок в каждом опыте была подтверждена расчетом необходимого минимума наблюдений, а гипотеза о близости характера распределения опытных данных к нормальному закону распределения независимых случайных величин – критерием Пирсона (табл. 1, 2; рис. 3).

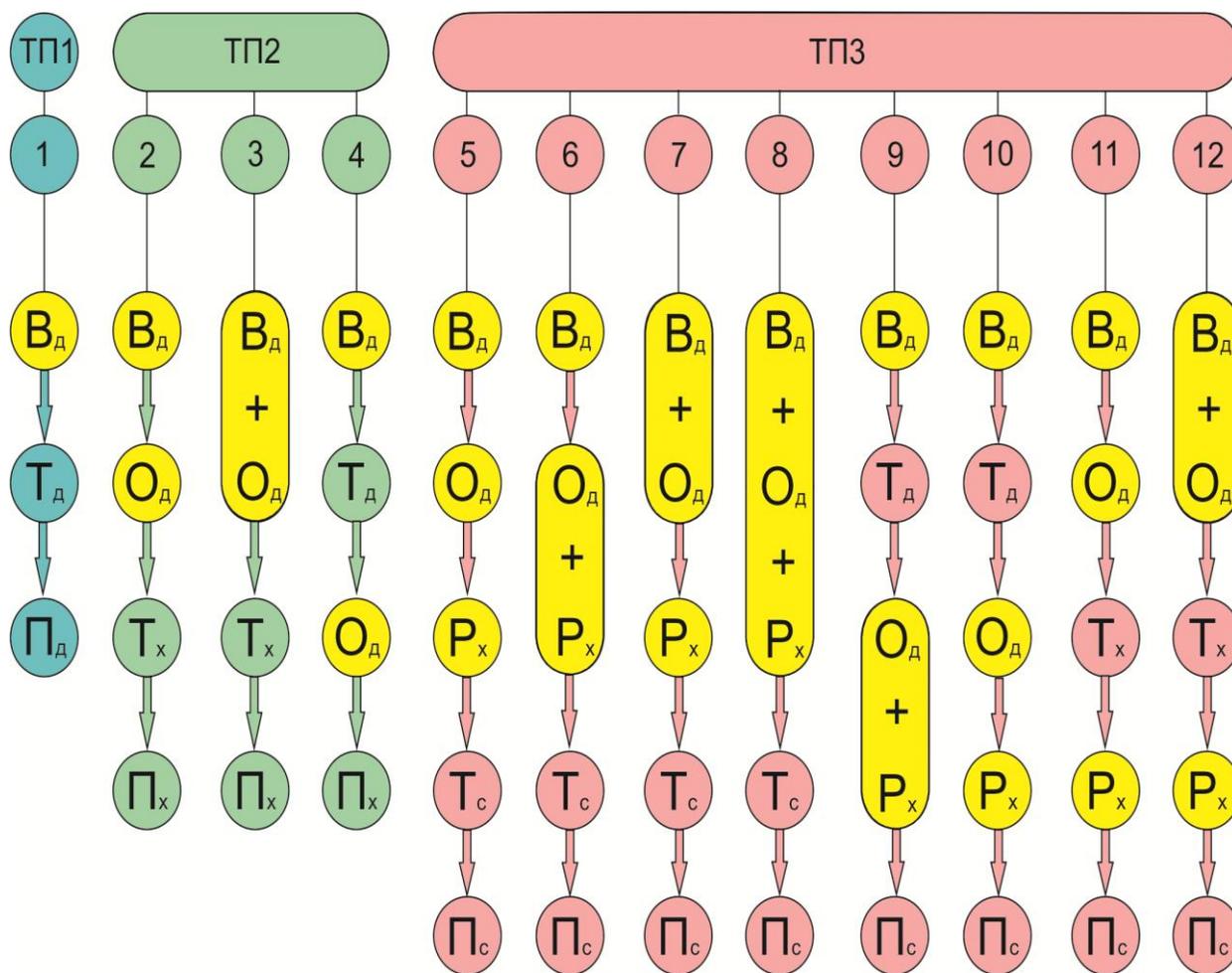


Рис. 1. Варианты выполнения обрабатывающих операций лесосечных работ бензиномоторным инструментом:

B_d – валка деревьев; O_d – очистка стволов деревьев от сучьев; T_d , $T_{хл}$ и T_c – трелевка деревьев, хлыстов и сортиментов соответственно; P_x – раскряжка хлыстов на сортименты

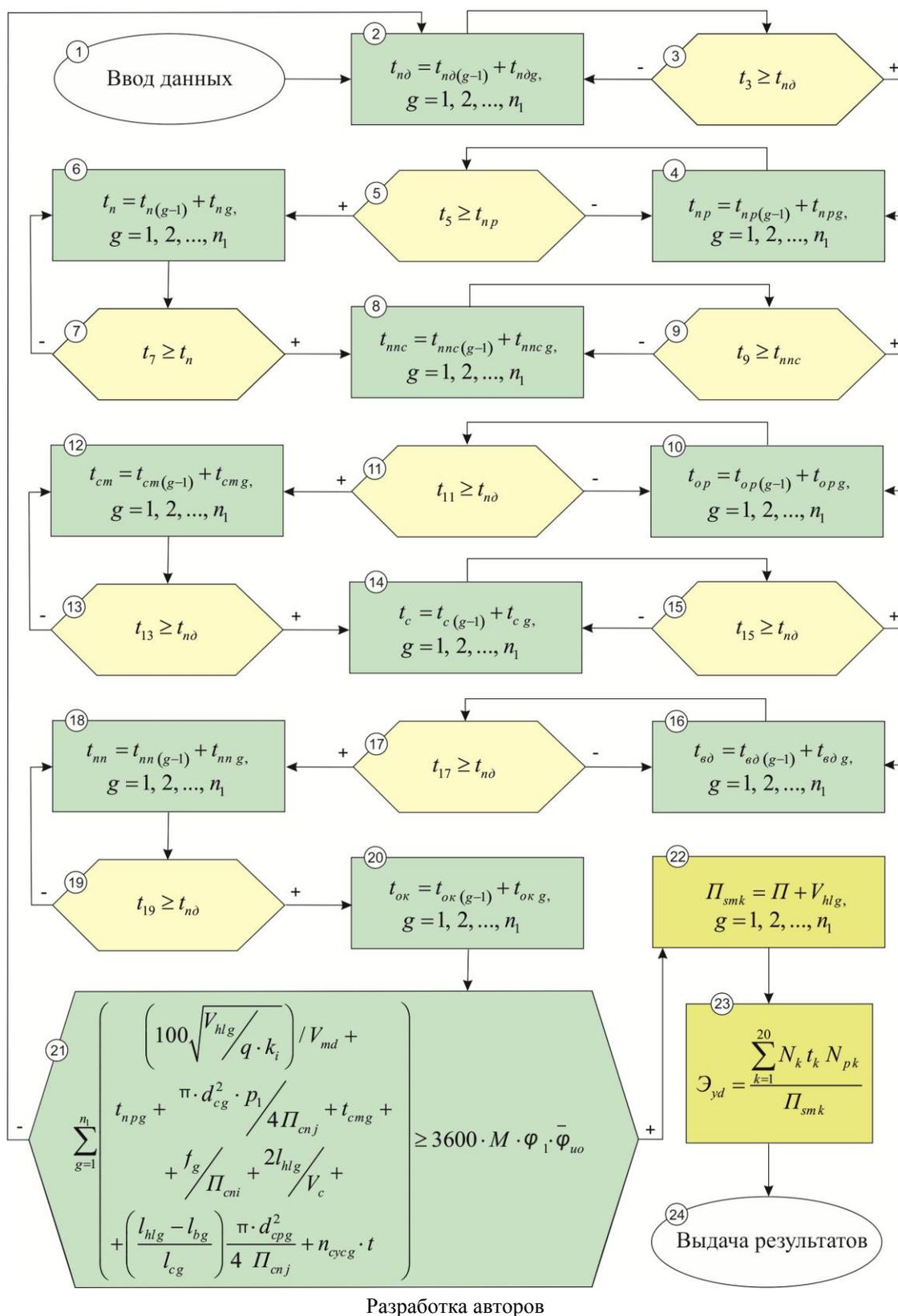


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели выполнения лесосечных обрабатывающих операций бензиномоторным инструментом по 8-му технологическому варианту (В_д+О_д+Р_х)

Результаты измерения $t_{n,p}$ при работе моториста № 1

№ опыта	Результаты наблюдений, с	Число замеров	Необходимый минимум наблюдений			
1	47; 40; 45; 39; 43; 41; 38; 36; 35; 45; 40; 43; 38; 42; 40	15	10,7			
2	53; 51; 54; 57; 49; 51; 52; 51; 50; 51; 48; 47; 46; 52; 45	15	5,935727			
3	44; 55; 53; 48; 50; 49; 48; 47; 45; 51; 40; 50; 46; 51; 49	15	9,071074			
4	49; 53; 47; 51; 49; 46; 48; 47; 49; 47; 46; 45; 43; 41; 51	15	6,612309			
5	42; 49; 45; 42; 44; 43; 45; 43; 42; 41; 40; 47; 36; 42; 38	15	9,048081			
6	47; 52; 50; 41; 48; 45; 46; 45; 44; 43; 42; 40; 37; 46; 42	15	11,82894			
7	47; 40; 31; 41; 44; 41; 35; 41; 43; 37; 36; 42; 38; 41; 39.	15	15,08205			
№ опыта	Среднее арифметическое	Дисперсия	Средне-квадратичное отклонение	Коэффициент вариации	Критерий Пирсона χ^2	
					расчетный	нормативный
1	40,8	11,6	3,405877	0,083477	1,19	9,49
2	50,46667	9,838095	3,136574	0,062151	2,1019839	9,49
3	48,4	13,82857	3,718679	0,076832	1,5923767	11,1
4	47,46667	9,695238	3,113718	0,065598	7,7604627	9,49
5	42,6	10,68571	3,268901	0,076735	3,2356663	9,49
6	44,53333	15,26667	3,907258	0,087738	0,7996444	11,1
7	39,73333	15,49524	3,936399	0,09907	2,8939737	11,1

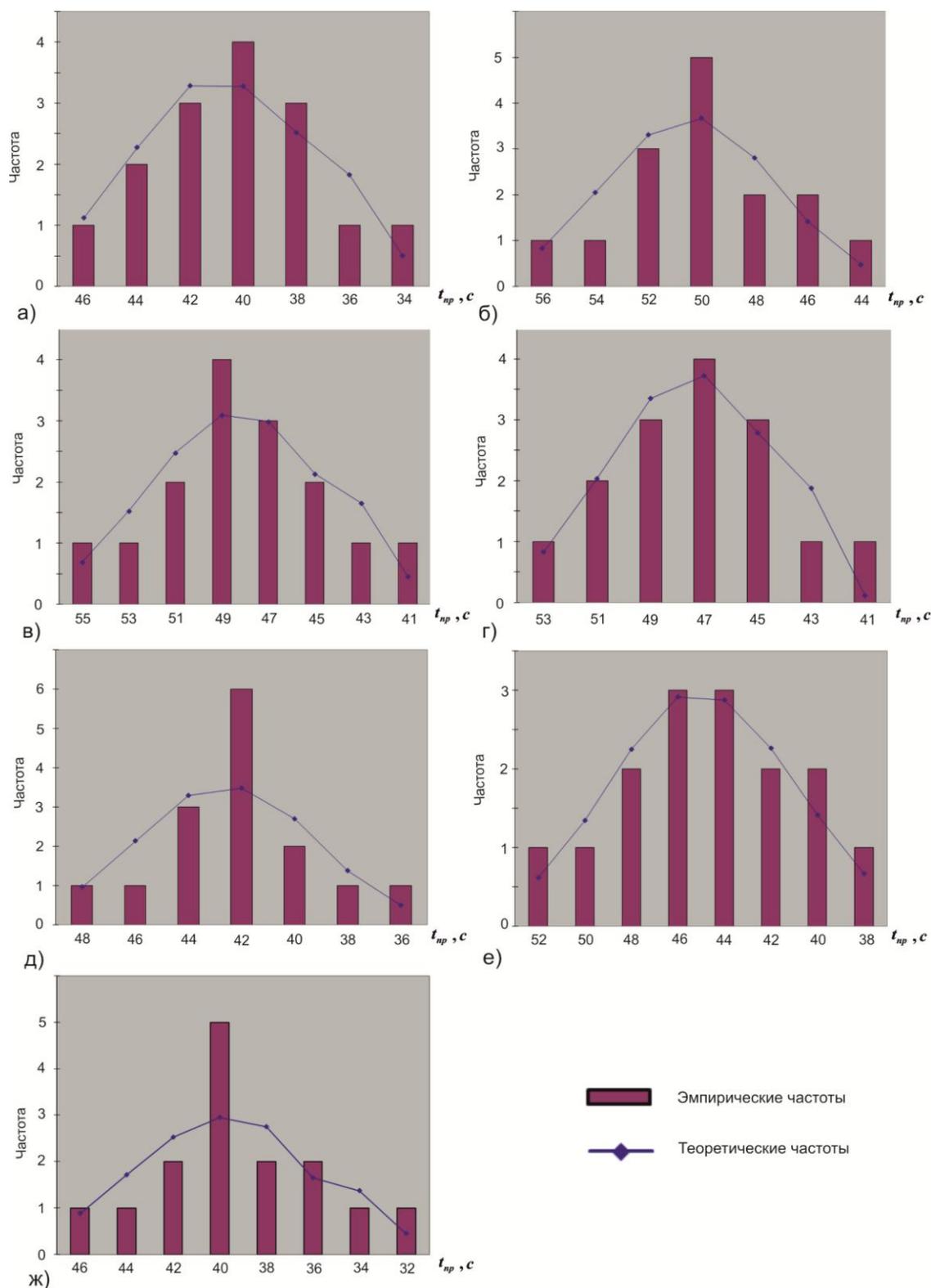
Результаты наблюдений авторов

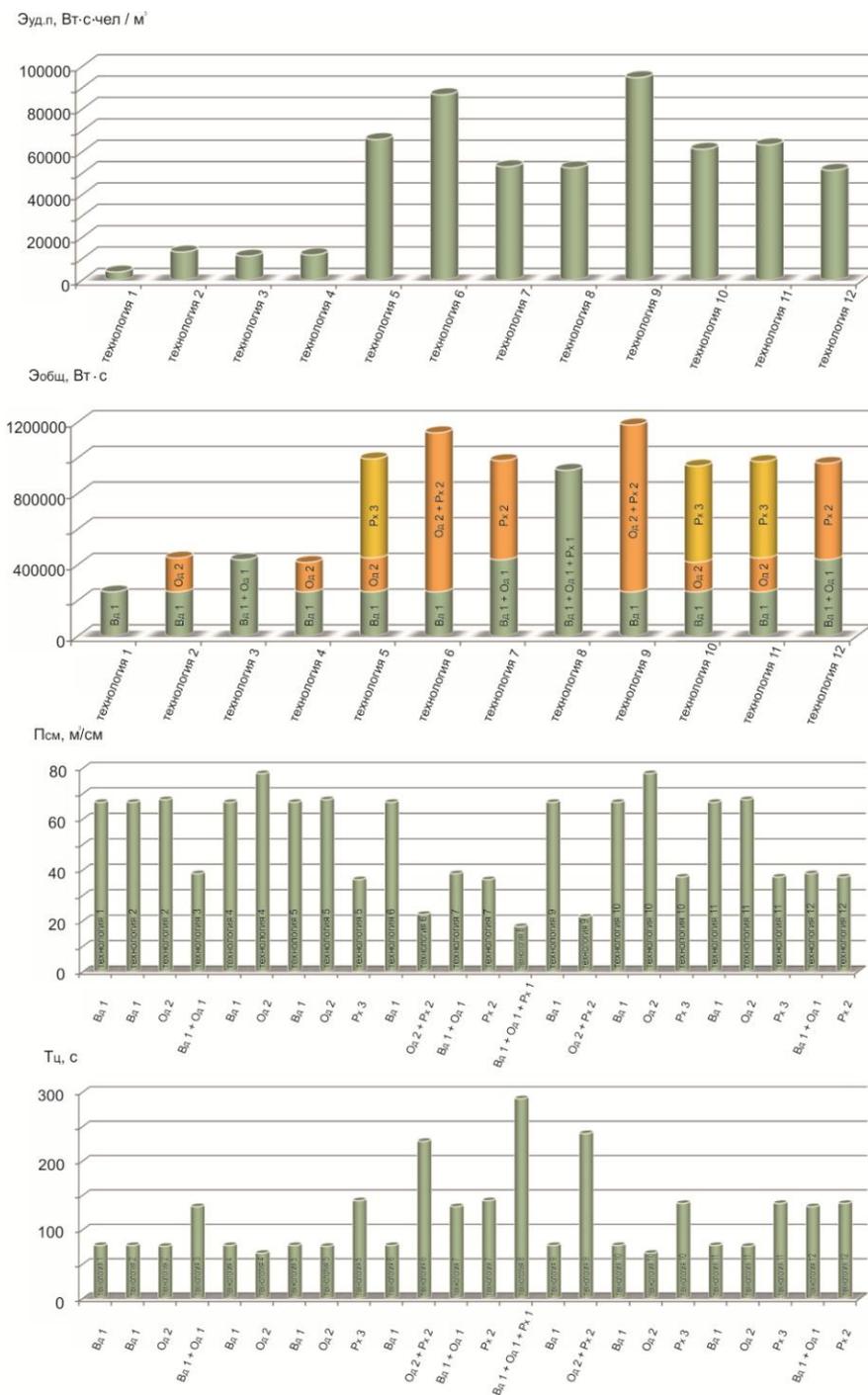
Таблица 2

Результаты вычисления критерия Пирсона χ^2 для опыта № 7 (8-й час работы моториста № 1)

№ интервала	y_i^a	y_i^b	m	z_1	z_2	
1	47	45	1	1,846019	1,33794	
2	45	43	1	1,33794	0,829862	
3	43	41	2	0,829862	0,321783	
4	41	39	5	0,321783	-0,1863	
5	39	37	2	-0,1863	-0,69437	
6	37	35	2	-0,69437	-1,20245	
7	35	33	1	-1,20245	-1,71053	
8	33	31	1	-1,71053	-2,21861	
№ интервала	$\Phi_0(z_1)$	$\Phi_0(z_2)$	P_i	$P_{i,n}$	$(m - P_{i,n})^2$	$\frac{(m - P_{i,n})^2}{P_{i,n}}$
1	0,4671	0,4082	0,0589	0,8835	0,01357	0,0153619
2	0,4082	0,2939	0,1143	1,7145	0,51051	0,2977604
3	0,2939	0,1255	0,1684	2,526	0,27668	0,1095313
4	0,1255	-0,0714	0,1969	2,9535	4,18816	1,4180336
5	-0,0714	-0,2549	0,1835	2,7525	0,56626	0,2057243
6	-0,2549	-0,3649	0,11	1,65	0,1225	0,0742424
7	-0,3649	-0,4564	0,0915	1,3725	0,13876	0,1010974
8	-0,4564	-0,4864	0,03	0,45	0,3025	0,6722222
				$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m - P_{i,n})^2}{P_{i,n}} =$		2,8939737

Результаты вычислений авторов





Результаты вычислений авторов

Рис. 4. Результаты моделирования исследуемых технологий выполнения обрабатывающих операций применительно к условиям Александровского лесничества (Владимирская область)

Результаты и обсуждение

В дальнейшем на основе полученных данных применительно по одной из лесосек, разрабатываемых лесозаготовительной компанией ООО «ЛК Кедр», был проведен имитационный эксперимент для прогнозирования производительности и показателя удельных приведенных энергозатрат на обрабатываемых операциях (рис. 4).

Результаты расчетов позволили определить для второго типа технологического процесса лесосечных работ ТП-2 (вывозка хлыстов) в качестве наиболее предпочтительного варианта выполнения обрабатываемых операций технологию № 3 ($\varepsilon_{y.o.n} = 11130 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$), где относительно технологии № 2 ($\varepsilon_{y.o.n} = 13092 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) и № 4 ($\varepsilon_{y.o.n} = 11706 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) количество задействованных в работе мотористов бензопил оказалось меньше на одного человека, а удельные приведенные энергозатраты снижены на 15 % и 5 % соответственно. Для третьего типа технологического процесса лесосечных работ ТП-3 (вывозка сортиментов) при выполнении всех обрабатываемых операций на лесосеке наиболее предпочтительным вариантом оказалась технология № 8, где количество задействованных в работе мотористов бензопил снижено на два человека относительно технологии № 5 и одного человека относительно технологий № 6 и № 7. При этом удельные приведенные энергозатраты технологии № 8 ($\varepsilon_{y.o.n} = 52465 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) в сравнении с технологиями № 5 ($\varepsilon_{y.o.n} = 65753 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$), № 6 ($\varepsilon_{y.o.n} = 86681 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) и № 7 ($\varepsilon_{y.o.n} = 53004 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) оказались меньше на 21,2 %, 39,5 % и 1,1 % соответственно. При выполнении на верхнем складе обрезки сучьев и раскряжевки наиболее предпочтительным вариантом оказалась технология № 10 ($\varepsilon_{y.o.n} = 61162 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$), где в сравнении с технологией № 9 ($\varepsilon_{y.o.n} = 94700 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) удельные приведенные энергозатраты оказались на 35,5 % меньше. При выполнении на верхнем складе только операции раскряжевки наиболее предпочтительным вариантом оказалась технология № 12 ($\varepsilon_{y.o.n} = 51330 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$), где в сравнении с технологией № 11

($\varepsilon_{y.o.n} = 63242 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) удельные приведенные энергозатраты оказались на 18,9 % меньше.

Достоверность результатов имитационного эксперимента была подтверждена в ходе производственной проверки на лесозаготовительном предприятии ООО «ЛК Кедр» в мае 2018 г. с расхождением 3...6 % (рис. 5). Разработанный математический аппарат и программное обеспечение к нему позволяет изучить характер и степень влияния основных наиболее значимых факторов на эффективность выполнения обрабатываемых операций лесосечных работ (табл. 3). На примере технологического варианта выполнения обрабатываемых операций № 8 можно видеть, как с увеличением производительности чистого пиления бензопилы (P_{cn}), коэффициента индивидуальных особенностей мотористов бензопил ($\bar{\varphi}_{u.o.}$), объема хлыста (V_{hl}), запаса леса на га (q) и доли вырубаемого запаса (k_i) сменная производительность труда (P_{sm}) растет, а удельные приведенные энергозатраты ($\varepsilon_{y.o.n}$) снижаются (рис. 6 и 7). При этом анализ влияния основных факторов на удельные приведенные энергозатраты позволил установить следующие степени их значимости: $\beta / \alpha = 0,8$ для q ; $\beta / \alpha = 0,6$ для k_i ; $\beta / \alpha = 0,4$ для V_{hl} ; $\beta / \alpha = 0,3$ для P_{cn} ; $\beta / \alpha = 0,25$ для $\bar{\varphi}_{u.o.}$.

Таким образом, разработанный математический аппарат и программное обеспечение позволяет осуществлять в автоматизированном режиме научно обоснованный выбор оптимального комплекта бензиномоторного инструмента, технологии и организации валки деревьев, очистки их от сучьев и раскряжевки хлыстов на сортименты с учетом индивидуальных особенностей мотористов, а также изучать влияние на эффективность выполнения обрабатываемых операций основных факторов влияния в заданных природно-производственных условиях разрабатываемых лесосек. В этой связи представляется целесообразным рекомендовать полученные результаты исследования к использованию на производстве при проектировании лесосечных работ.

План выполнения вычислительного эксперимента по установлению значимости и характера влияния основных факторов на показатели эффективности выполнения обрабатывающих операций

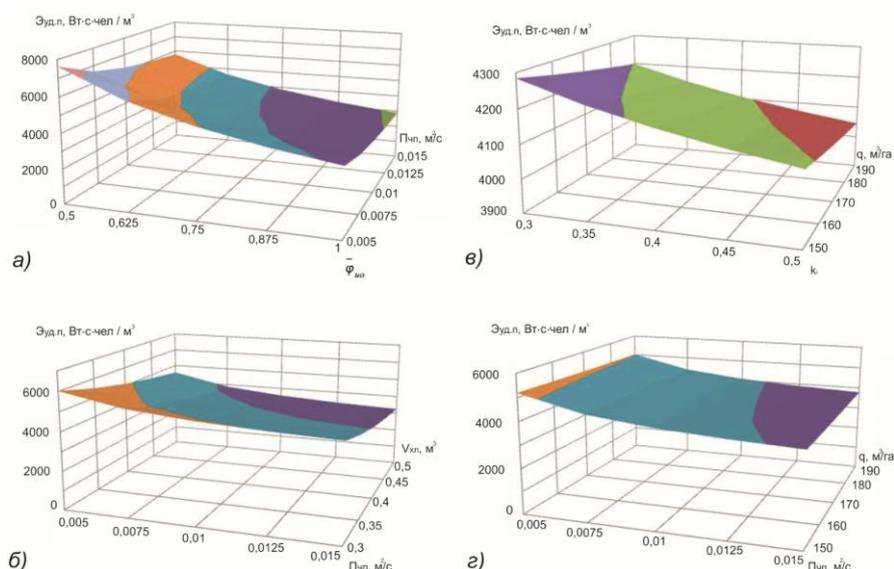
Факторы влияния	Уровни варьирования					Показатели эффективности
	1	2	3	4	5	
$V_{hl}, \text{м}^3$	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	$\mathcal{E}_{y.d.n}; \Pi_{st}$
$q, \text{м}^3/\text{Га}$	150	160	170	180	190	$\mathcal{E}_{y.d.n}; \Pi_{st}$
k_i	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	$\mathcal{E}_{y.d.n}; \Pi_{st}$
$\Pi_{cn}, \text{м}^2/\text{с}$	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	$\mathcal{E}_{y.d.n}; \Pi_{st}$
$\bar{\varphi}_{u.o.}$	0,5	0,625	0,75	0,875	1	$\mathcal{E}_{y.d.n}; \Pi_{st}$

Результаты исследований авторов



Результаты наблюдений авторов

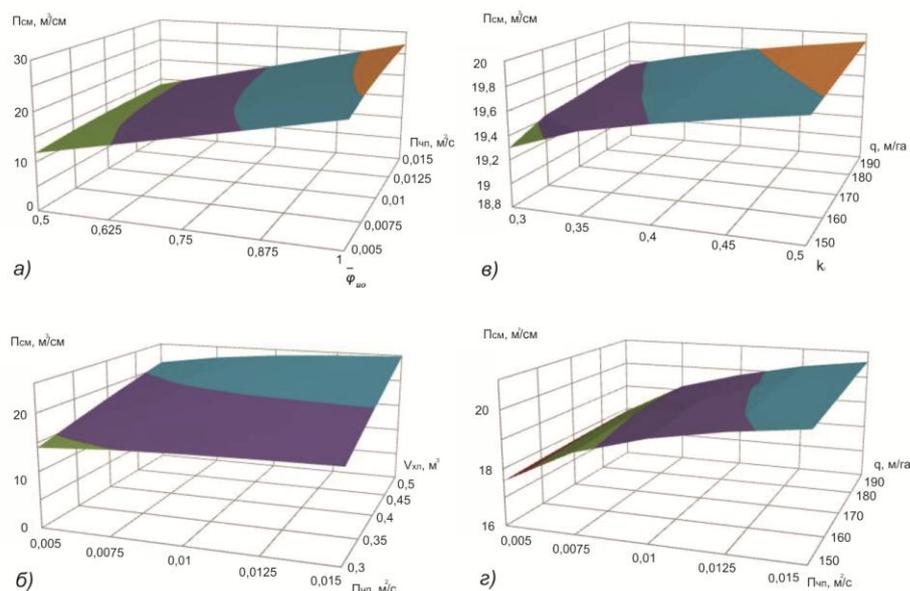
Рис. 5. Производственная проверка результатов имитационного эксперимента на ЭВМ на валке, обрезке сучьев и раскряжке хлыстов в условиях Александровского лесничества (Владимирская область)



Результаты вычислений авторов

Рис.6. Графики зависимости удельных приведенных энергозатрат от основных факторов влияния на примере работы моториста по технологии № 8:

а) $\varepsilon_{y.d.n} = f(\bar{\varphi}_{u.o.}; P_{cn})$; б) $\varepsilon_{y.d.n} = f(P_{cn}; V_{hl})$; в) $\varepsilon_{y.d.n} = f(k_i; q)$; г) $\varepsilon_{y.d.n} = f(P_{cn}; q)$



Результаты вычислений авторов

Рис. 7. Графики зависимости производительности труда от основных факторов влияния на примере работы моториста по технологии № 8:

а) $P_{smk} = f(\bar{\varphi}_{u.o.}; P_{cn})$; б) $P_{smk} = f(P_{cn}; V_{hl})$; в) $P_{smk} = f(k_i; q)$; г) $P_{smk} = f(P_{cn}; q)$

Выводы

1. В условиях малообъемного лесопользования результаты выполнения обрабатывающих операций бензопилами во многом определяют ритмичность работы трелевочного средства и оказывают значительное влияние на выработку всей системы машин. Эффективность ее работы можно повысить путем принятия научно обоснованных решений на стадии проектирования лесосечных работ при выборе оптимального комплекта бензиномоторного инструмента, технологии и организации валки деревьев, очистки их от сучьев и раскряжевки хлыстов. При этом существует проблема достоверного прогнозирования работы мотористов с бензопилами из-за: большого количества сравниваемых вариантов в различных условиях производства и природной среды; необходимости учета квалификации и утомляемости исполнителей; а также целесообразности оценки выполнения обрабатывающих операций одновременно с нескольких позиций. Для решения обозначенной проблемы был предложен к использованию новый комплексный показатель оценки эффективности обрабатывающих операций – удельные приведенные энергозатраты, отличающийся возможностью наряду с суммарными затратами энергии на пиление учитывать производительность труда, а также количество задействованных в работе мотористов со своими индивидуальными особенностями.

2. С целью обоснования оптимальной технологии выполнения обрабатывающих операций были определены для сравнения 12 вариантов и методом последовательного информационно-логического и математического моделирования разработаны имитационные модели для прогнозирования показателя удельных приведенных энергозатрат в широком диапазоне изменения природно-производственных условий разрабатываемых лесосек. На основе разработанных имитационных моделей была создана программа для ЭВМ в среде Delphi по обоснованию технологических вариантов выполнения обрабатывающих операций бензиномоторным инструментом и получено авторское свидетельство (№ гос. регистрации 2019611250).

3. Для реализации разработанного программного обеспечения в условиях Александровского лесничества (Владимирская область) были собраны и обработаны данные по затратам времени на выполнение всех составляющих элементов обрабатывающих операций при работе трех мотористов в различных технологических последовательностях. В дальнейшем применительно к одной из разрабатываемых лесосек был проведен имитационный эксперимент для прогнозирования производительности и показателя удельных приведенных энергозатрат на обрабатывающих операциях с учетом индивидуальной квалификации и утомляемости мотористов. Достоверность результатов прогнозирования была подтверждена в ходе производственной проверки на предприятии ООО «ЛК Кедр» в мае 2018 г. с расхождением 3...6 %. Произведенные расчеты позволили определить для третьего типа технологического процесса лесосечных работ ТП-3 (вывозка сортиментов) в качестве наиболее предпочтительного варианта выполнения обрабатывающих операций технологию № 8, где количество задействованных в работе мотористов бензопил снижено на два человека относительно технологии № 5 и одного человека относительно технологий № 6 и № 7. При этом удельные приведенные энергозатраты технологии № 8 ($\varepsilon_{y.d.n} = 52465 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) в сравнении с технологиями № 5 ($\varepsilon_{y.d.n} = 65753 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$), № 6 ($\varepsilon_{y.d.n} = 86681 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) и № 7 ($\varepsilon_{y.d.n} = 53004 \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{чел}/\text{м}^3$) оказались меньше на 21,2 %, 39,5 % и 1,1 % соответственно.

Разработанный математический аппарат и программное обеспечение рекомендуется к использованию на стадии проектирования лесосечных работ при выборе оптимального комплекта бензиномоторного инструмента, технологии и организации валки деревьев, очистки их от сучьев и раскряжевки хлыстов на сортименты.

Библиографический список

1. Абрамов, В. В. Разработка и обоснование эффективной технологии трелевки в малолесных районах : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 24.04.09 / Абрамов Виталий Викторович. – Воронеж, 2009. – 366 с. – Библиогр.: с. 136–147.
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 / А. В. Бондаренко, В. В. Абрамов, Ф. В. Пошарников // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2 (40). – URL: www.science-education.ru/102-5518.
4. Современные технологии лесосечных работ / В. Д. Валяжонков, Е. А. Васякин, Ю. И. Беленький, А. А. Коваленко, В. А. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 1 (13). – С. 129–134.
5. Галактионов, О. Н. Бензиномоторные пилы. Устройство и эксплуатация : учеб. / О. Н. Галактионов, Г. Д. Гаспарян, И. В. Григорьев [и др.]. – Санкт-Петербург, 2017. – 206 с.
6. 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.
7. 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.
8. Совместное влияние влажности и температуры древесины сосны на энергоемкость процесса поперечного пиления / И. В. Григорьев, Е. Г. Хитров, В. А. Иванов, В. И. Жданович, М. В. Дербин // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 157–162.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Иевлев, А. И. Моделирование и оптимизация лесопромышленных процессов : тексты лекций в 2 частях. Ч. 1 / А. И. Иевлев, И. А. Сидельников. – Воронеж, 1997. – 70 с.
13. Матросов, А. В. Моделирование работы и оценка эффективности системы лесосечных машин / А. В. Матросов, М. А. Быковский // Лесной вестник. – 2013. – № 1. – С. 107–112.
14. Рябухин, П. Б. Как повысить эффективность эксплуатации лесозаготовительных машин / П. Б. Рябухин // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур : матер. VII междунар. науч.-практ. конференции. – Хабаровск, 2018. – С. 11–15.
15. Рябухин, П. Б. Математическое моделирование в решении задач предприятий лесопромышленного комплекса / П. Б. Рябухин, А. П. Козорез, А. В. Абузов // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 5. – С. 76–82.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611250. Программа для обоснования технологических вариантов выполнения обрабатывающих операций бензиномоторным инструментом / Л. Д. Бухтояров, А. С. Черных, Д. Н. Афоничев, В. В. Абрамов, И. Н. Троянов, И. А. Марчуков (РФ). – Правообладатель : ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (RU). – № 2019611250, заявлено 10.01.2019; зарегистрировано 23.01.2019.

17. Improvement of processing operations of cutting work using gasoline-powered tools / A. S. Chernykh, A. I. Maksimenkov, V. V. Abramov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environment Science. – 2019. – № 226. – P. 1–9.
18. 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.
19. Shirnin, A. Y. Comparison of system of cars for extreme conditions logging / A. Y. Shirnin, Y. A. Shirnin // Journal of Applied Engineering Science. – 2016. – № 14 (2). – P. 206–212.

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.
4. Valeozhkov V.D., Vasyakin E.A., Belenky Yu.I., Kovalenko A.A., Ivanov V.A. *Sovremennyye tekhnologii lesosechnykh rabot* [Modern logging technologies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* [Systems. Methods Technology]. 2012, no. 1 (13), pp. 129-134. (In Russian).
5. 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).
6. Hertz E. F., Terinov N. N. *Ratsional'naya organizatsiya vyborochnoy rubki s ispol'zovaniyem benzinomotornoy 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).
7. 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.
8. 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).
9. 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).
10. 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).

11. 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.
12. Ievlev A. I., Sidel'nikov I. A. *Modelirovaniye i optimizatsiya lesopromyshlennykh protsessov* [Modeling and optimization of forestry processes]. Voronezh, 1997, 70 p. (In Russian).
13. Matrosov A. V., Bykovskiy M.A. *Modelirovaniye raboty i otsenka effektivnosti sistemy lesosechnykh mashin* [Modeling of work and evaluation of the effectiveness of the system of logging machines]. *Lesnoy vestnik*. [Forestry Bulletin]. 2013, no. 1, pp. 107-112. (In Russian).
14. Ryabukhin P.B., Kozorez A.P., Abuzov A.V. *Matematicheskoye modelirovaniye v reshenii zadach predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa* [Mathematical modeling in solving problems of enterprises of the timber industry complex]. *Vestnik KrasGAU*. [the Bulletin of KrasGAU]. 2012, no. 5, pp. 76-82. (In Russian).
15. Ryabukhin P.B. *Kak povysit' effektivnost' ekspluatatsii lesozagotovitel'nykh mashin* [How to increase the efficiency of operation of logging machines]. *Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur : materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Philosophy of Modern Nature Management in the Amur River Basin: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. 2018, no. 5, pp. 11-15. (In Russian).
16. 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.
17. Chernykh A. S., Maksimenkov A. I., Abramov V. V., Troyanov I. N., Buhtoyarov L. D., Afonichev D. N. Improvement of processing operations of cutting work using gasoline-powered tools. IOP Conference Series: Earth and Environment Science, 2019, no. 226, pp. 1-9.
18. 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.
19. Shirnin A.Y., Shirnin Y. A. Comparison of system of cars for extreme conditions logging *Journal of Applied Engineering Science*, 2016, no. 14 (2), pp. 206-212.

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: 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: 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: vglta-mlx@yandex.ru.

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

Максименков Алексей Иванович – 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: mai-mlx@yandex.ru.

Information about authors

Troyanov Igor Nikolayevich – Postgraduate Student of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: troyanovi@mail.ru.

Abramov Vitaly Viktorovich – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "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, FSBEI HE "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.

Afonichev Dmitriy Nikolayevich – Professor of the Department of Electrical Engineering and Automatics of FSBEI HE "Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I", DSc (Engineering), Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Chernykh Alexander Sergeevich – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "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.

Maksimov Alexey Ivanovich – Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD (Engineering), Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: mai-mlx@yandex.ru.