

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ХАРВЕСТЕРА ПРИ ВЫБОРОЧНЫХ РУБКАХ ЛЕСА

Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, К.П. Рукомойников✉

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, 424000, Республика Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

rukomojnikovkp@volgatech.net

Существующие на данный момент математические зависимости нацелены лишь на обоснование производительности харвестеров и не дают возможности детального анализа трудоемкости зависящих от природно-производственных условий отдельных элементов времени цикла его работы. В связи с этим, целью данного исследования является обоснование математических закономерностей работы харвестера, позволяющих с достаточным уровнем достоверности осуществлять быстрые технические расчеты производительности и трудозатрат при выполнении различных рубок леса. Для достижения поставленной цели создана имитационная модель работы харвестера на лесосеке и проведены эксперименты на этой модели. Показаны результаты статистической обработки результатов имитационного моделирования. Предложены регрессионные зависимости для расчета средней часовой производительности харвестера, а также расчета отдельных элементов времени цикла его работы, созданные в результате анализа результатов исследования на модели. Определены регрессионные зависимости расчета среднего времени наведения манипулятора на растущее дерево, перемещения поваленного дерева в зону его обработки и среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно спиленное дерево, обладающие научной и практической новизной. Доказано, что нормирование труда невозможно без учета влияния на эти элементы времени таких показателей, как средний объем хлыста на лесосеке, доля вырубаемого компонента, запас древесины на гектаре и количество крупного подлеска на лесосеке. Показаны диаграммы изменения значений элементов времени цикла в условиях разнообразия природно-производственных условий на различных лесных участках. На основе полученных в статье выводов, разработаны практические и научные рекомендации, повышающие эффективность нормирования труда на лесосечных работах. Полученные регрессионные модели рекомендуются для анализа эффективности работы и нормирования труда при использовании харвестера Silvatec 8266TH.

Ключевые слова: имитационное моделирование, лесозаготовка, лесосека, выборочные рубки, статистическая обработка, регрессионная зависимость, сортиментная заготовка древесины

Ссылка для цитирования: Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Рукомойников К.П. Результаты имитационного моделирования работы харвестера при выборочных рубках леса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 136–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-136-149

Системы сортиментной заготовки древесины комплектом машин харвестер + форвардер уже много лет используются в скандинавских странах [1–3]. Почти 100 % сегодняшних заготовок в Швеции и Финляндии осуществляются системами для сортиментной заготовки древесины [4, 5]. В этих и других странах были проведены различные исследования, в том числе анализ производительности [6–8] и оценка харвестера в цепочке поставок древесины потребителям [9–11]. В Северной Америке такие системы используются примерно в 20–30 % случаев [12], на юго-востоке США — еще меньше, т. е. не более 1 % случаев использования [13]. В России доля сортиментной заготовки древесины в общем объеме рубок составляет примерно 30 %, а в северо-западных регионах РФ она достигает 90 %, что связано с небольшими размерами лесосек и наличием в производстве значительного числа

машин, поставлявшихся из граничащей с ними Финляндии [14, 15].

Оценка производственной эффективности машин для сортиментной заготовки древесины приобрела актуальность по причине различных природно-производственных условий на каждой отдельно взятой для анализа лесосеке [16–18]. Оценить влияние всех природно-производственных факторов в реальных производственных условиях затруднительно ввиду необходимости проведения значительного объема экспериментальных исследований в целях достижения достоверных результатов.

Одним из способов анализа работы машин с учетом совокупности влияющих факторов является моделирование технологического процесса лесосечных работ, в частности, имитационное моделирование в области сортиментной заготовки древесины, над которым работали различные отечественные и зарубежные ученые.

Ввиду большого разнообразия условий работы в лесу, изучаемых в процессе моделирования, при анализе производственного процесса и затрат зачастую используется компьютерное моделирование [19–22]. С помощью компьютерного моделирования лесосечных работ с использованием харвестера проведено достаточно много исследований [23–26]. Например, в работе [27] смоделирована система сортиментной заготовки древесины по аналогии с системой бензопила + пакетировочно-трелевочная машина и системой валочно-пакетирующая машина + пакетировочно-трелевочная машина.

В других исследованиях, система харвестер — форвардер оценивалась с использованием метода дискретного моделирования событий [28]. В качестве исходных данных использовалось статистическое распределение, полученное на основе данных полевых исследований. По результатам моделирования было разработано уравнение линейной регрессии для производственного процесса системы.

Имитационная модель, созданная Ю.В. Сухановым и др. [29] моделирует определение следующей технологической стоянки, движения, валки и обработки деревьев и дает возможность многократной имитации технологического процесса разработки лесосек при наличии у исследователя соответствующего программного обеспечения.

В основу работы А.П. Соколова, Е.В. Осипова [30] заложено имитационное моделирование работы харвестера с использованием метода дискретно-событийного имитационного моделирования на сетях Петри. Авторы работы [31] с помощью компьютерного моделирования изучали эффективность сортиментной заготовки древесины на выборочных рубках. Они смоделировали временные элементы работы харвестера и форвардера, и их результаты показали, что производительность системы сбалансирована при работе в древостоях с диаметром ствола в среднем от 15 до 25 см.

В работе [32] смоделированы и симулированы затраты на сортиментную заготовку древесины с использованием пяти систем для заготовки небольших деревьев в естественных насаждениях и доказано, что компьютерное моделирование — это эффективный способ изучения затрат на лесозаготовки при различных сочетаниях древостоя и машин.

Однако вопрос учета природно-производственных факторов при работе харвестеров на выборочных рубках в настоящее время изучен не в полной мере, так как большинство из упомянутых исследований относится либо к конкретным регионам, либо к конкретным условиям древостоя, что обуславливает неполноту информации

о производственном процессе и стоимости систем сортиментной заготовки древесины для РФ. Не все полученные в ходе ранее проведенных имитационных исследований результаты представлены их разработчиками в виде математических зависимостей с возможностью их пересчета для других производственных условий без использования специализированных программных средств. Обоснованные на данный момент математические зависимости нацелены лишь на поиск производительности харвестера и не позволяют провести детальный анализ трудоемкости отдельных элементов технологического цикла его работы, зависящих от природно-производственных условий лесосек.

Цель работы

Цель работы — обоснование математических закономерностей работы харвестера, позволяющих с достаточным уровнем достоверности осуществлять быстрые технические расчеты производительности и трудозатрат при выполнении различных рубок леса.

Материалы и методы

С использованием функциональных возможностей системы имитационного моделирования AnyLogic создана модель работы харвестера на лесосеке. В ней реализован агентный подход при моделировании технологического процесса работы харвестера.

Имитационная модель прошла производственную апробацию и доказала свою адекватность на основе наблюдений за харвестером Silvatec 8266TH. Дальнейшее имитационное моделирование осуществлялось по итогам реальных производственных данных, собранных в ходе производственного эксперимента.

Для имитационного эксперимента был составлен четырехфакторный экспериментальный план с варьированием факторов на четырех уровнях в форме экспериментального плана типа 4^4 и реализован эксперимент с полным перебором вариантов. Анализируемые факторы учитывали возможность выполнения работ в разновозрастных древостоях при выполнении на лесосеках различных видов рубок.

Среди основных факторных признаков были приняты следующие:

Q — общий запас древесины на 1 га, м³/га;

k_i — доля вырубаемого компонента по запасу древесины.

Показатель доли вырубаемого компонента по запасу древесины даст возможность проанализировать различные виды выборочных рубок. В частности, при равномерно постепенных и длительно постепенных рубках его значения



Рис. 1. Пример анализа отдельных элементов времени цикла работы харвестера на основе имитационного моделирования технологического процесса

Fig. 1. Example of analysis of individual elements of harvester cycle time on the basis of simulated service test of technological process

изменяются в пределах от 0,3 до 0,5, при добровольно выборочных рубках — от 0,15 до 0,4, в зависимости от интенсивности изреживания древостоя. При прореживаниях и проходных рубках данный показатель составляет от 0,15 до 0,5, при проходных рубках — от 0,2 до 0,4;

$K_{п}$ — количество крупного подлеска на 1 га, шт./га.

Под подлеском здесь понимаем следующие древесные породы: рябину обыкновенную, черемуху, иву и т. п. При анализе учитывались лишь деревья, ствол которых необходимо спиливать харвестером;

$V_{в}$ — объем хлыста вырубаемого компонента, м³.

В ходе имитационного моделирования весь технологический процесс работы харвестера в течение смены и последовательной обработки деревьев разбивался на ряд элементов времени цикла (рис. 1).

Для дальнейшего анализа использовались лишь показатели, зависящие от природных условий на лесосеке. На основе априорной информации можно предположить, что при обработке одного дерева выделенные для имитационного моделирования факторные признаки могут оказать наиболее значимое влияние на такие элементы времени работы харвестера, как перечисленные ниже:

$t_{н}$ — среднее время анализа оператором доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий в виде крупного подлеска и наведения манипулятора на дерево, с;

$t_{п}$ — среднее время перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе перемещения, с;

$t_{р.п}$ — среднее время перемещения между рабочими позициями, с.

Все остальные элементы времени цикла работы харвестера в течение смены, в частности, время маневров на погрузочном пункте, время перемещений на лесосеку и погрузочный пункт, время перерывов, время захвата дерева ножами харвестерной головки, спиливания и сталкивания его с пня, время обрезки сучьев, раскряжевки и откомлевки, либо вовсе не зависят от природных условий на лесосеке, либо не являются стохастическими величинами и подчиняются точным математическим и физическим зависимостям.

Значения параметров изменялись в диапазонах, представленных в табл. 1.

Рассмотрим пример имитационного эксперимента по анализу одночасовой производительности и трудозатрат на обработку деревьев харвестером в одной из фиксажных точек (рис. 2).

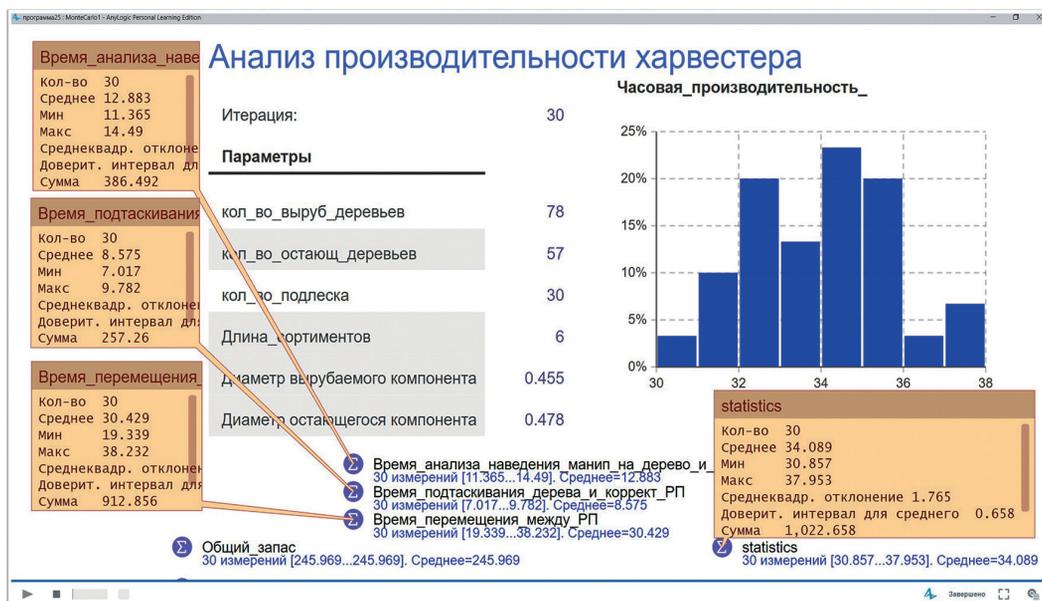


Рис. 2. Пример имитационного эксперимента работы харвестера в системе имитационного моделирования AnyLogic
 Fig. 2. Example of harvester simulated service test in AnyLogic simulation modelling system

Результаты и обсуждение

Полученные в ходе имитационного моделирования результаты прошли статистическую обработку, в результате которой предложена регрессионная зависимость для расчета средней одночасовой производительности харвестера в различных условиях лесосечных работ

$$\Pi_{ч} = \frac{\left(Q(a_1 + a_3 k_i + a_6 K_{п} + a_7 V_{в}) + k_i(a_2 + a_8 \cdot K_{п} + a_9 V_{в}) + K_{п}(a_3 + a_{10} V_{в}) + a_4 V_{в} + a_{11} Q^2 + a_{12} k_i^2 + a_{13} K_{п}^2 + a_{14} V_{в}^2 \right)}{Q k_i V_{в}^{a_{15}}},$$

где $a_1 - a_{15}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

Получены результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов (табл. 2). Табличные значения демонстрируют статистическую значимость всех коэффициентов.

Значения, полученные по регрессионной зависимости, совпали с результатами компьютерного эксперимента с доверительной вероятностью 0,95. Множественный коэффициент детерминации R^2 нелинейной модели составил 0,994.

Адекватность результатов, полученных с помощью регрессионной модели, ограничена использованным при ее построении диапазоном варьирования факторов. Выходящие за пределы этих диапазонов исходные данные не анализировались в рамках решения поставленной задачи, а следовательно, при значительном выходе

Т а б л и ц а 1

Диапазон изменения факторных признаков в ходе реализации имитационного моделирования работы харвестера
 Range of changes in factor attributes during the implementation of harvester simulated service test

Показатель	Условное обозначение	Уровни варьирования			
		1	2	3	4
Общий запас древесины на 1 га, м ³ /га	Q	50	120	190	260
Доля вырубаемого компонента	k_i	0,2	0,4	0,6	1
Количество подлеска на гектаре, шт./га	$K_{п}$	0	150	300	450
Объем хлыста вырубаемого компонента, м ³	$V_{в}$	0,2	0,7	1,2	1,7

за указанные пределы варьирования параметров исследователи могут получить близкие, но не всегда адекватные результаты.

Графическая демонстрация изменения производительности харвестера в различных природных условиях представлена на рис. 3. Объемные диаграммы построены по регрессионной модели путем попарного варьирования факторных признаков в указанных ранее диапазонах.

Анализ рис. 3, а свидетельствует о постепенном увеличении эффективности работы харвестера с ростом среднего объема хлыста на лесосеке. Уменьшение доли вырубаемого компонента приводит к снижению его производительности.

**Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии
расчета одночасовой производительности харвестера**

Checking the statistical significance of the regression equation coefficients
for calculating the one-hour productivity of the harvester

Коэффициент уравнения регрессии	Значение коэффициента	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние границы доверительного интервала 95 %	Верхние границы доверительного интервала 95 %
a_1	-0,7397	0,1950	-3,793	0,000	-1,12436	-0,35504
a_2	-149,422	48,9270	-3,054	0,003	-245,935	-52,909
a_3	0,153392	0,0513	2,992	0,003	0,052268	0,254516
a_4	-122,553	22,0370	-5,561	0,000	-166,023	-79,083
a_5	30,214	0,2266	133,332	0,000	29,7670	30,6610
a_6	-0,0028	0,0002	-12,848	0,000	-0,0032	-0,0024
a_7	-0,79193	0,1326	-5,974	0,000	-1,05343	-0,53043
a_8	-0,9281	0,0599	-15,501	0,000	-1,0463	-0,8100
a_9	-252,608	37,0970	-6,809	0,000	-325,785	-179,431
a_{10}	0,067226	0,0302	2,228	0,027	0,007696	0,126755
a_{11}	0,003926	0,0006	6,665	0,000	0,002764	0,005088
a_{12}	329,7531	35,9838	9,164	0,000	258,7717	400,7346
a_{13}	0,000248	0,0001	2,889	0,004	0,000079	0,000417
a_{14}	44,78558	12,4344	3,602	0,000	20,25753	69,31362
a_{15}	-0,6966	0,0130	-53,759	0,000	-0,7222	-0,6711

Комплексный анализ объемных диаграмм (рис. 3, а–в) показывает, что такая закономерность отчетливее проявляется при снижении ниже 40 % вырубке по запасу и менее очевидна при росте этого показателя. Диаграмма, представленная на рис. 3, б, свидетельствует о незначительном влиянии на производительность харвестера запаса древесины на 1 га при сплошных рубках на лесосеке, однако при переходе от анализа сплошных рубок к выборочным рубкам влияние общего запаса на 1 га на результаты его работы становится все более очевидным. Анализ следующих двух диаграмм (см. рис. 3, в, г) показывает степень влияния количества подлеска на выработку оператора и свидетельствует о вероятности снижения производительности до 5...25 % лишь благодаря этому факторному признаку. При этом, по аналогии с предыдущими выводами, наибольшие значения из этого диапазона характерны для выборочных рубок леса.

Наибольшее влияние на производительность харвестера оказывает средний объем хлыста на лесосеке, так как (см. рис. 3, а, г) снижение объема хлыста в исследуемом диапазоне приводит к сокращению производительности до 70 % относительно максимально зафиксированного показателя, в то время как влияние запаса древесины

на приведенных графиках ограничивается лишь 14 % (см. рис. 3, б), количества подлеска — 25 % (см. рис. 3, в), а доли вырубаемого компонента — 35 % (см. рис. 3, б–г).

Аналогично проведена статистическая обработка результатов наблюдений для отдельных элементов времени цикла, наиболее подверженных изменениям в различных природных условиях лесосек.

Использование исследователем в качестве результативного признака среднего времени анализа оператора харвестера доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий в виде крупного подлеска и наведения манипулятора на дерево позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_{\text{н}} = \frac{\left(b_0 + Q(b_1 + b_4 k_i) + K_{\text{п}}(b_2 + b_5 k_i) + V_{\text{в}}(b_3 + b_6 K_{\text{п}}) + b_7 K_{\text{п}}^2 + b_8 V_{\text{в}}^2 \right)}{Q k_i V_{\text{в}}^{b_9}}$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,892.

Использование в качестве результативного признака среднего времени перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе перемещения

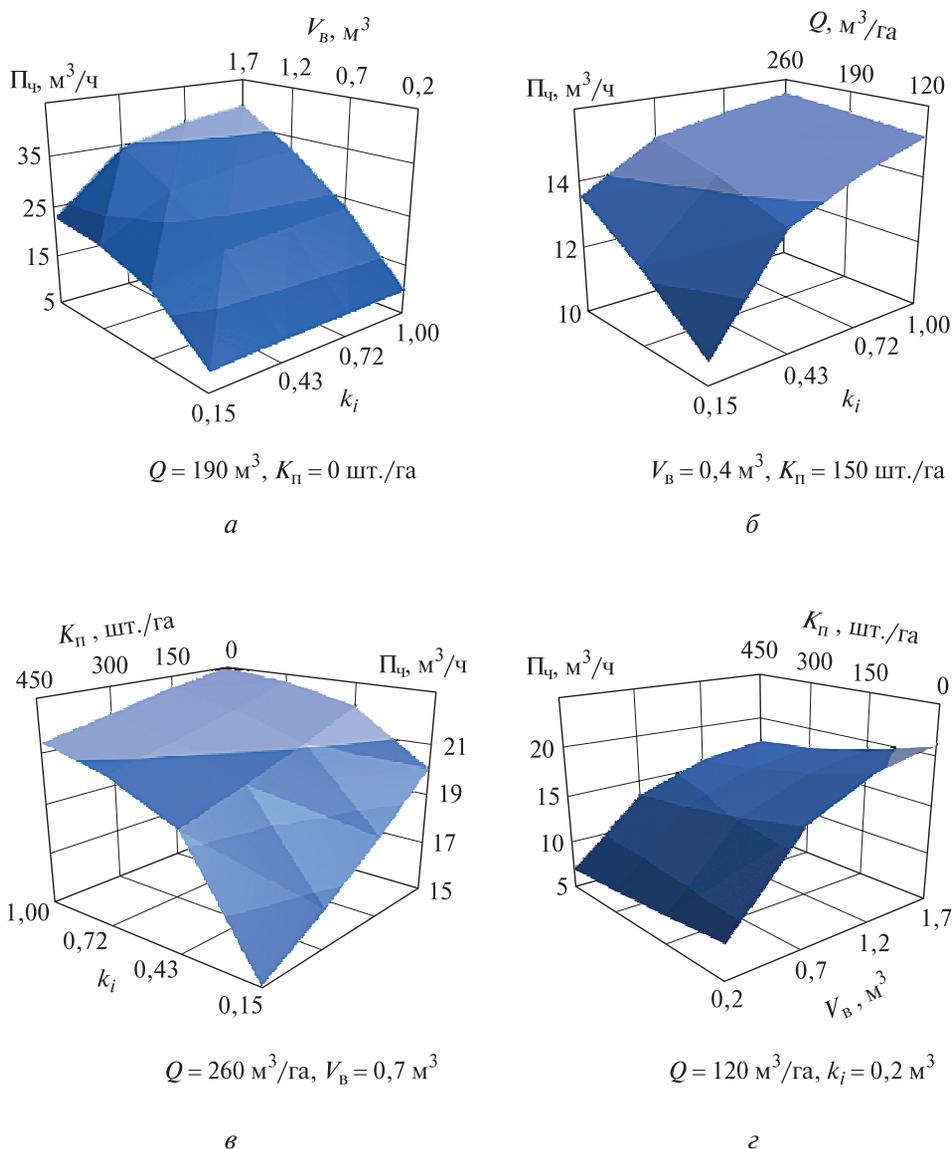


Рис. 3. Зависимость производительности харвестера от различных природных условий лесосеки: *а* — при изменении V_B и k_i с постоянными Q и K_n ; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными V_B и K_n ; *в* — при изменении K_n и k_i с постоянными V_B и Q ; *г* — при изменении K_n и V_B с постоянными k_i и Q

Fig. 3. Dependence of harvester productivity on different natural conditions of the harvesting area: *a* — when V_B and k_i with constant Q and K_n ; *б* — when Q and k_i with constant V_B and K_n are changed; *в* — when K_n and k_i are changed with constant V_B and Q ; *г* — when K_n and V_B with constant k_i and Q are changed

позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_{\text{пн}} = c_0 + Q(c_1 + c_5 k_i + c_6 K_n + c_7 V_B) + k_i(c_2 + c_9 V_B) + K_n(c_8 k_i + c_3) + V_B(c_4 + c_{10} K_n) + c_{11} k_i^2 + c_{12} K_n^2 + c_{13} V_B^2.$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,845.

Использование в качестве результативного признака среднего времени перемещения хар-

вестера между рабочими позициями в расчете на одно дерево позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_{\text{пн}} = \frac{(d_0 + k_i(d_1 + d_3 Q + d_5 K_n) + K_n(d_2 + d_4 Q))}{Q k_i V_B^{d_6}}.$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,896.

Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов приведены в табл. 3.

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии при обосновании среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора

Testing the statistical significance of the regression equation coefficients when justifying the average time for analysing the accessibility of the tree to be cut, removing obstacles and guiding the manipulator

Коэффициент	Значение коэффициента	Стандартная ошибка	<i>t</i> -статистика	<i>P</i> -значение	Нижние границы доверительного интервала 95 %	Верхние границы доверительного интервала 95 %
b_0	-16,8924	6,6250	-2,5498	0,0116	-29,9587	-3,8261
b_1	-0,6323	0,0507	-12,4776	0,0000	-0,7322	-0,5323
b_2	0,150539	0,038083	3,952918	0,0001	0,07543	0,2256
b_3	42,82234	13,03726	3,28461	0,0012	17,1094	68,5353
b_4	13,6398	0,1266	107,7202	0,0000	13,3900	13,8895
b_5	-0,17207	0,04196	-4,10060	0,0001	-0,2548	-0,0893
b_6	1,32378	0,02246	58,93521	0,0000	1,2795	1,3681
b_7	-0,00019	0,00007	-2,71930	0,0071	-0,0003	-0,0001
b_8	-18,4956	7,2183	-2,5623	0,0112	-32,7320	-4,2591
b_9	0,021955	0,009065	2,421960	0,0164	0,0041	0,0398
c_0	7,56201	0,32922	22,96954	0,0000	6,91262	8,21140
c_1	0,015856	0,001895	8,365882	0,0000	0,012118	0,019595
c_2	10,59971	0,73579	14,40581	0,0000	9,14834	12,05109
c_3	0,007483	0,001009	7,418155	0,0000	0,005493	0,009473
c_4	-4,3837	0,3664	-11,9640	0,0000	-5,1065	-3,6610
c_5	-0,00942	0,00180	-5,22596	0,0000	-0,01298	-0,00587
c_6	-0,00001	0,00000	-3,99362	0,0001	-0,00002	-0,00001
c_7	-0,00407	0,00132	-3,09271	0,0023	-0,00667	-0,00148
c_8	0,00794	0,00073	10,81634	0,0000	0,00649	0,00938
c_9	2,572018	0,265061	9,703492	0,0000	2,049177	3,094858
c_{10}	0,002222	0,000465	4,782194	0,0000	0,001306	0,003139
c_{11}	-9,4500	0,5136	-18,3987	0,0000	-10,4631	-8,4369
c_{12}	-0,000004	0,000002	-2,59772	0,0101	-0,000007	-0,000001
c_{13}	1,045626	0,184137	5,678521	0,0000	0,682411	1,408841
d_0	1474,823	13,849	106,495	0,0000	1447,512	1502,134
d_1	-305,263	40,764	-7,489	0,0000	-385,652	-224,873
d_2	-0,28227	0,06518	-4,33041	0,0000	-0,411	-0,154
d_3	0,937587	0,248288	3,776211	0,0002	0,448	1,427
d_4	0,001719	0,000332	5,183645	0,0000	0,001	0,002
d_5	0,864121	0,129283	6,683950	0,0000	0,609	1,119
d_6	-0,893	0,007	-126,354	0,0000	-0,907	-0,879

Зависимость изменения среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора в различных природных условиях лесосек представлена на рис. 4.

Анализ объемный диаграмм (рис. 4, а, в) показал, что при уменьшении процента выборки древесины по запасу увеличивается время анализа доступности вырубаемого дерева и наведения манипулятора, поскольку при сокращении доли вырубаемого компонента увеличивается количество препятствий на пути движения манипулятора в виде остающихся на доращивание деревьев. При этом увеличивается

частота смены рабочих позиций, а следовательно, и времени на анализ ситуации и действия оператора при частых перемещениях машины. Траектория движения манипулятора идет в обход остающихся деревьев, что приводит к увеличению затрат времени при выполнении этой операции.

При меньшем среднем объеме хлыста на одной из двух сравниваемых лесосек и при одинаковом запасе леса на каждой из них количество деревьев будет больше на этой лесосеке, чем на другой. Таким образом, количество деревьев, обрабатываемых харвестером с одной рабочей позиции, тем больше, чем меньше средний объем

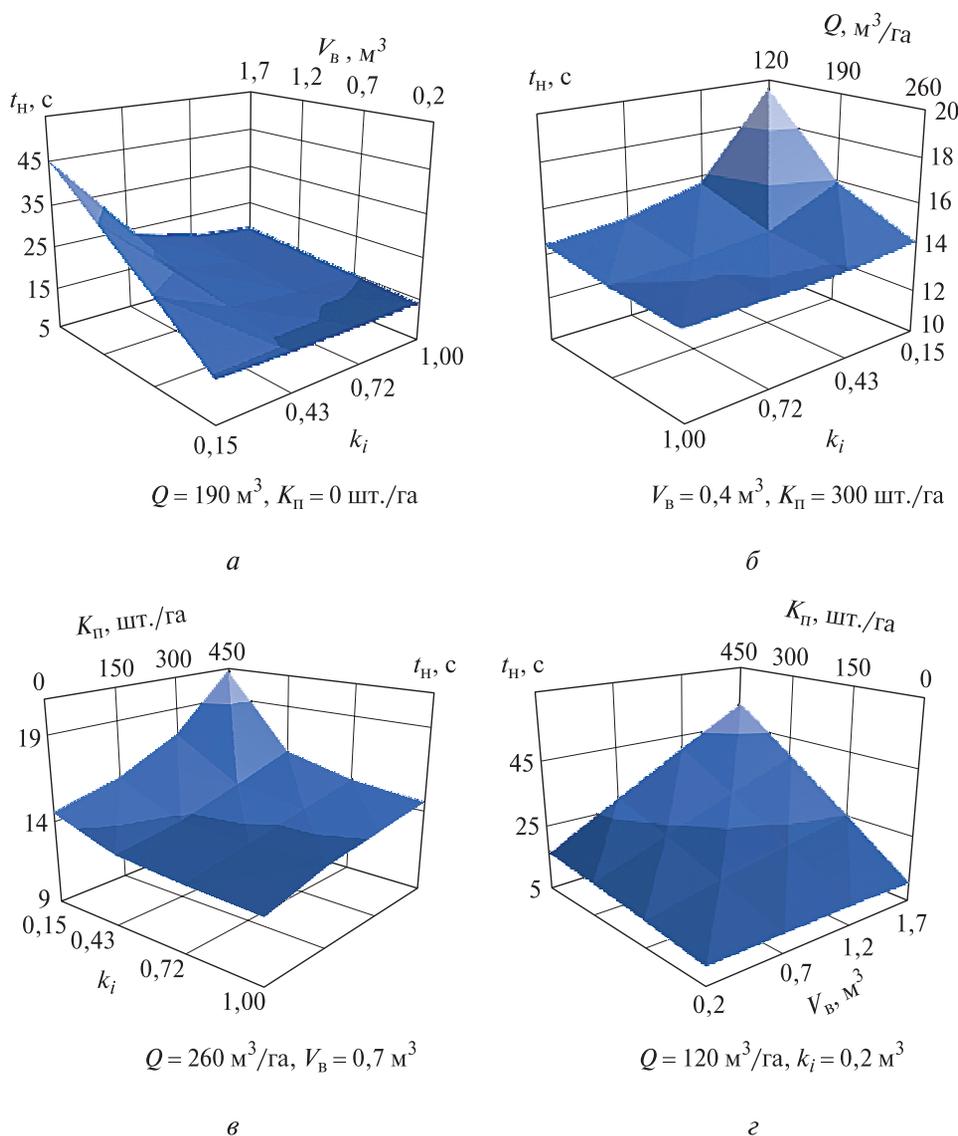


Рис. 4. Зависимость среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора от различных природных условий лесосек: а — при изменении V_b и k_i с постоянными Q и K_n ; б — при изменении Q и k_i с постоянными V_b и K_n ; в — при изменении K_n и k_i с постоянными V_b и Q ; г — при изменении K_n и V_b с постоянными k_i и Q

Fig. 4. Dependence of the average time of analysing the accessibility of the felled tree, removing obstacles and guiding the manipulator on different natural conditions of harvesting areas: а — when V_b and k_i with constant Q and K_n ; б — when Q and k_i with constant V_b and K_n ; в — when K_n and k_i with constant V_b and Q are changed; г — when K_n and V_b with constant k_i and Q are changed

хлыста на лесосеке (при прочих равных условиях). Также известно, что чем больше запас древесины на одной из двух сравниваемых лесосек при одинаковом среднем объеме хлыста на них, тем больше на ней деревьев. С учетом этих закономерностей, а также полученных результатов (см. рис. 4, а–г) можно утверждать, что чем больше деревьев оператор может обработать с одной рабочей позиции, тем меньшее влияние окажет доля вырубаемого компонента на анализируемый элемент времени цикла.

Анализ диаграмм (см. рис. 4, а, б) показал, что наибольший рост затрат времени фиксируется при выборочных рубках и вырубке менее 40 % запаса древесины на лесосеке.

Значительное увеличение искомого показателя фиксируется с повышением среднего объема хлыста на лесосеке (рис. 5, а, г), поскольку при малом объеме хлыста, а следовательно, большом количестве деревьев на участке в 1 га, значительный объем вырубке формируется за счет деревьев, произрастающих на волоках для обеспечения

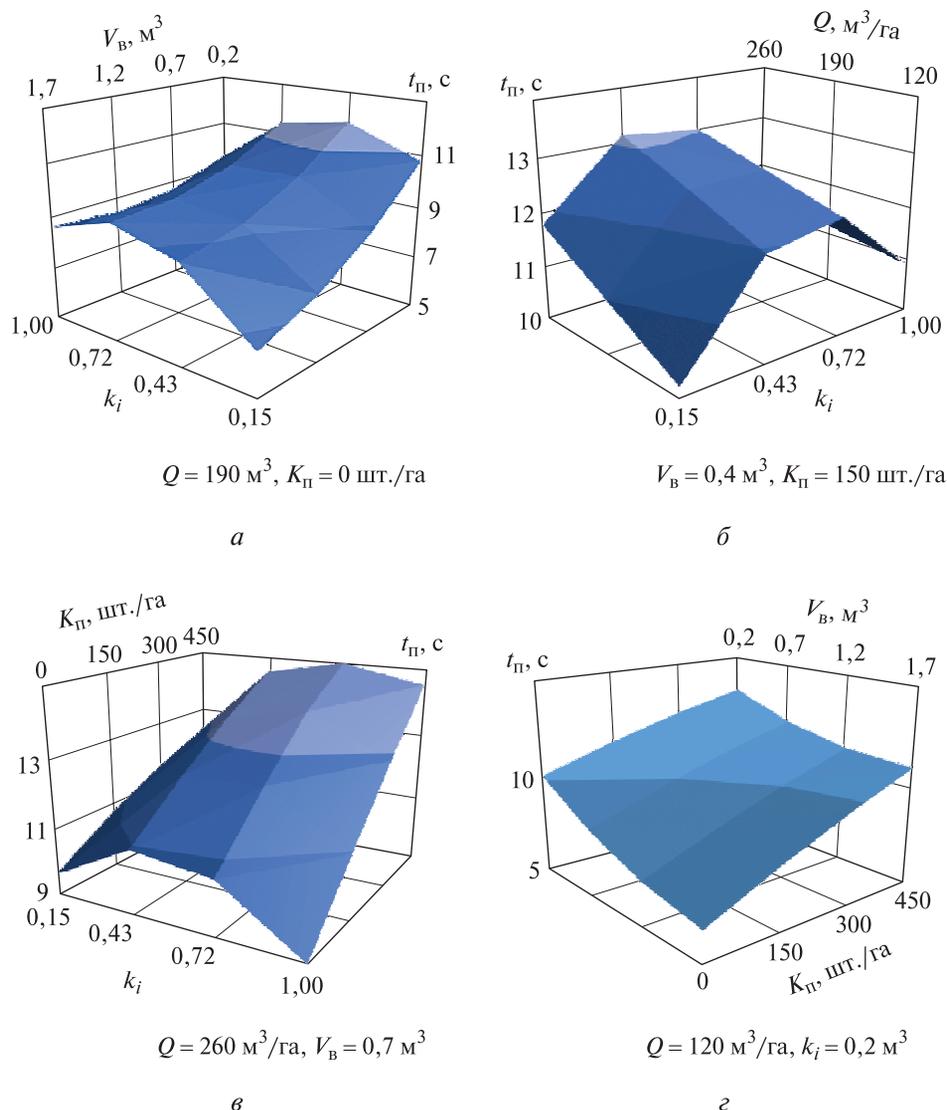


Рис. 5. Зависимость изменения среднего времени перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки от различных природных условий лесосек: *а* — при изменении V_B и k_i с постоянными Q и $K_{п}$; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными V_B и $K_{п}$; *в* — при изменении $K_{п}$ и k_i с постоянными V_B и Q ; *г* — при изменении $K_{п}$ и V_B с постоянными k_i и Q

Fig. 5. Dependence of change in the average time of moving a fallen tree to the zone of its subsequent processing on different natural conditions of harvesting areas: *a* — when changing V_B and k_i with constant Q and $K_{п}$; *б* — when changing Q and k_i with constant V_B and $K_{п}$; *в* — when changing $K_{п}$ and k_i with constant V_B and Q ; *г* — when changing $K_{п}$ and V_B with constant k_i and Q

проезда лесосечных машин. Деревья, расположенные по пути движения харвестера, требуют минимальных затрат на наведение манипулятора, так как при сплошной рубке деревьев перед машиной отсутствуют затраты времени на анализ доступности, поиск выгодной рабочей позиции и отклонение траектории харвестерной головки от прямолинейной траектории в обход препятствий. В результате чем больше процент деревьев, вырубаемых с площади волока, тем меньше среднее значение анализируемого элемента времени цикла. При большом объеме хлыста и, как следствие, малом количестве деревьев на лесосеке, уменьшается количество деревьев, вырубаемых на волоке,

и повышается объем выборки по запасу за счет рубки деревьев с пасек. Деревья, произрастающие на пасеках, требуют больше затрат времени на анализ их доступности, устранение препятствий и наведение манипулятора. В результате этого сокращение количества деревьев на лесосеке приводит к увеличению среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора. Диаграммы на рис. 5, в, г демонстрируют увеличение трудозатрат с ростом количества крупного подлеска на лесосеке, вследствие дополнительных затрат времени на удаление препятствий по пути движения манипулятора в процессе его наведения на дерево.

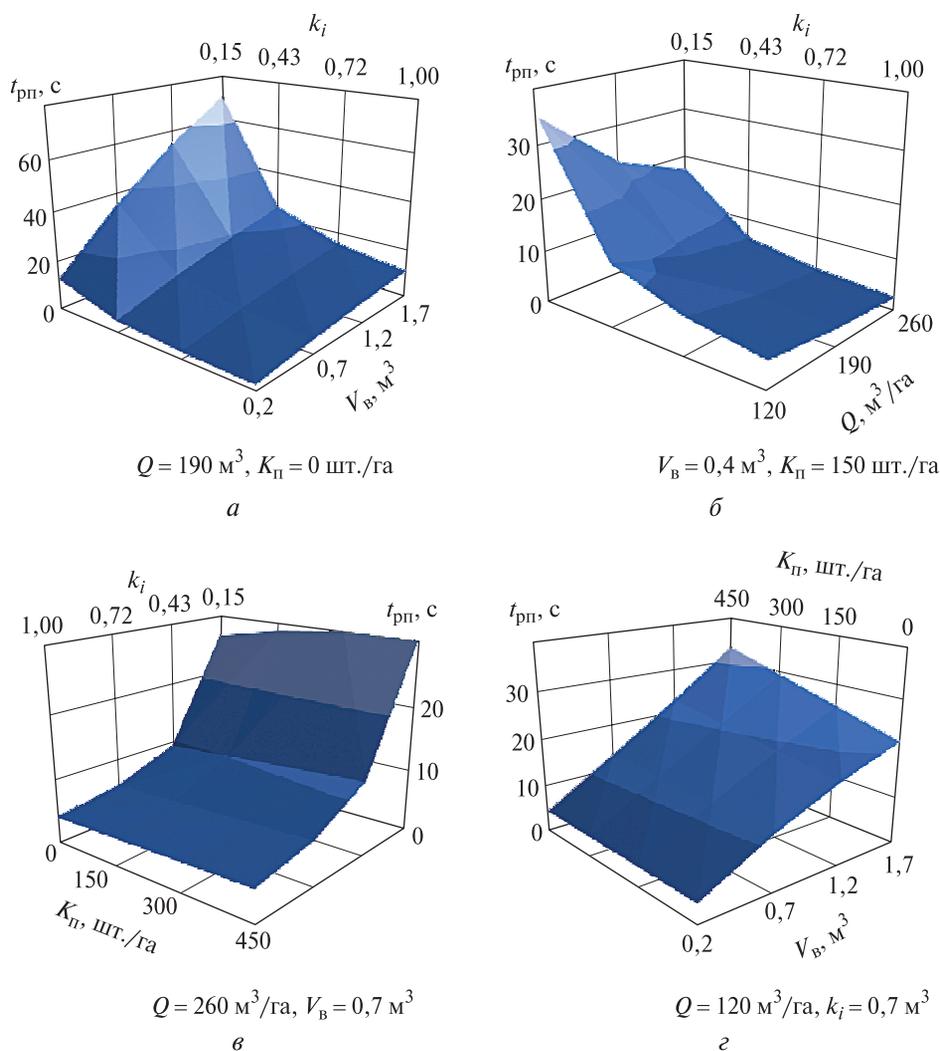


Рис. 6. Зависимость изменения среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно дерево от различных природных условий лесосек: *а* — при изменении $V_в$ и k_i с постоянными Q и $K_п$; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными $V_в$ и $K_п$; *в* — при изменении $K_п$ и k_i с постоянными $V_в$ и Q ; *г* — при изменении $K_п$ и $V_в$ с постоянными k_i и Q

Fig. 6. Dependence of change in the average time of harvester movement between working positions per tree on different natural conditions of the harvesting area: *a* — when $V_в$ and k_i are changed with constant Q and $K_п$; *б* — when Q and k_i are changed with constant $V_в$ and $K_п$; *в* — when $K_п$ and k_i are changed with constant $V_в$ and Q ; *г* — when $K_п$ and $V_в$ are changed with constant k_i and Q

Анализ диаграммы на рис. 6, *а* свидетельствует о постепенном снижении времени перемещения поваленного дерева в зону обработки при увеличении среднего объема хлыста на лесосеке, поскольку при принятой постоянной величине запаса древесины на 1 га, увеличение среднего объема хлыста при построении графика соответствует уменьшению количества деревьев на лесосеке. Сокращение числа деревьев повышает их доступность для беспрепятственного перемещения стволов в зону обработки без повреждений остающихся на доразбивание деревьев.

Выборочные рубки характеризуются повышенными трудозатратами на перемещение пова-

ленных стволов. Однако при этом, как видно из рис. 6, *а-в*, при выборке менее 40 % древесины по запасу, напротив, отмечается снижение времени на перемещение дерева, несмотря на рост числа оставляемых на доразбивание деревьев, поскольку при малой доле выборки древостоя увеличивается доля деревьев, поваленных на волоках, а доля деревьев, заготавливаемых на пасаках, сокращается. Рубка на волоках предусматривает 100%-е изъятие древесины с волока, а значит, деревья, поваленные на нем, подтаскиваются в зону обработки беспрепятственно и времени на их перемещение затрачивается меньше, чем при перемещении деревьев, поваленных на пасаках.

В результате среднее время перемещения поваленных деревьев при выборочных рубках с долей выборки менее 40 % сокращается.

Снижение времени перемещения стволов при 100%-м изъятии древесины в ходе сплошных рубок объясняется отсутствием препятствий на пути перемещения их в зону обработки (см. рис. 6, а–в).

Увеличение запаса древесины на 1 га при построении диаграмм сопровождается увеличением числа остающихся на доразживание деревьев и приводит к усложнению процесса перемещения стволов без их повреждения и увеличению трудозатрат на эту операцию (см. рис. 6, б).

Увеличение количества подлеска на лесосеке не способствует снижению трудозатрат на перемещение поваленных деревьев (см. рис. 6, в, г), создавая препятствия при выполнении работ.

Анализ рис. 6, а показал постепенное увеличение среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно спиленное дерево при увеличении среднего объема хлыста на лесосеке. Однако это увеличение времени оказывает наиболее значимое влияние на время работы машины лишь при выборочных рубках с выборкой менее 40 % по запасу.

Первоочередное влияние на анализируемый элемент времени цикла работы харвестера оказывает доля вырубемого компонента (см. рис. 6, б–г), так как снижение числа вырубемых деревьев приводит к увеличению времени общих перемещений харвестера по лесосеке при его вычислении в расчете на одно дерево.

Количественные показатели подлеска на лесосеке оказывают влияние на среднее время перемещения машины в расчете на одно дерево лишь при снижении доли выборки древесины и увеличении размерных характеристик назначенных в рубку древостоев (см. рис. 6, в, г). В подобных случаях, как показывают диаграммы, за счет увеличения количественных показателей подлеска на лесосеке, при прочих равных условиях, прирост трудозатрат может достигать 50 % от минимально зафиксированных при построении диаграмм результатах анализа.

Выводы

Полученные регрессионные модели позволяют проводить анализ эффективности работы харвестера в широком диапазоне изменения природных факторов.

Влияние на производительность харвестера оказывают преимущественно средний объем хлыста на лесосеке и доля вырубемого компонента. При этом нормирование труда невозможно без учета влияния таких природных факторов, как запас древесины на 1 га и количество крупного

подлеска на лесосеке. В отличие от среднего объема хлыста на лесосеке, влияние которого на производительность очевидно при любой степени изреживания древостоя, влияние запаса древесины на 1 га и количества крупного подлеска на лесосеке в наибольшей степени проявляется при реализации выборочных рубок леса. Это приводит к необходимости более тщательного анализа факторных признаков древостоя при нормировании труда в ходе выборочных рубок по сравнению со сплошными рубками. Наибольшее влияние запаса древесины на 1 га и количества крупного подлеска на лесосеке фиксируется при снижении доли выборки по запасу ниже 40 % и увеличивается по мере снижения этого значения.

Полученные регрессионные модели рекомендуются для анализа эффективности работы и нормирования труда при использовании харвестера Silvatec 8266TH, способствуют приближенному расчету искомых значений и дают исследователю общее представление об эффективности работы техники в конкретных природных условиях лесосек, что во многих случаях является достаточным для практических целей лесохозяйственных и лесозаготовительных предприятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

Список литературы

- [1] Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [2] Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101
- [3] Зырянов М.А., Салтанов А.Г., Давыденко А.Н. Основные тенденции развития конструкции лесозаготовительной техники в условиях совершенствования технологических процессов // Наука и бизнес: пути развития, 2021. № 5(119). С. 48–54.
- [4] Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-length: The next decade // J. of Forest Engineering, 1999, no. 10(2), pp. 17–25.
- [5] Большаков Б.М., Андрушин М.И., Дороничева Е.В. Развитие технологий и машин при рубках ухода за лесом в Финляндии и Швеции // Лесохозяйственная информация, 2019. № 2. С. 111–128. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.11
- [6] Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and cost of CTL harvesting of Eucalyptus globulus stands using excavator-based harvesters // For. Prod. J., 2002, no. 52(1), pp. 67–77.
- [7] Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б. Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной

- энергоёмкости // Леса России и хозяйство в них, 2021. № 4(79). С. 69–74. DOI 10.51318/FRET.2021.95.37.006
- [8] Савенков Д.А., Савенкова Н.В., Дербин М.В., Третьяков А.В. Метод ротационной замены пильных цепей как способ повышения производительности харвестера // Лесотехнический журнал, 2020. Т. 10. № 2(38). С. 196–203. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/20
- [9] Chiorescu S., Gronlund A. Assessing the role of the harvester within the forestry-wood chain // For. Prod. J., 2001, no. 51(2), pp. 77–84.
- [10] Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation // Int. J. For. Eng., 2003, no. 14(2), pp. 31–43.
- [11] Wester F., Eliasson L. Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (Harwarder) // Int. J. For. Eng., 2003, no. 14(2), pp. 45–50.
- [12] Conradie I., Greene W.D., Murphy G.E. Value recovery with harvesters in southeastern USA pine stands // Forest Products J., 2004, no. 54(12), pp. 80–84.
- [13] Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's logging businesses, 1987 to 1997 // For. Prod. J., 2001, no. 51(1), pp. 25–28.
- [14] Пискунов М.А. Компании-участники промышленной кооперации по изготовлению харвестеров и форвардеров: анализ первичной информации // Журнал естественнонаучных исследований, 2022. Т. 7. № 3. С. 48–52.
- [15] Пискунов М.А. Исследование стоимости харвестеров на вторичном рынке как аспекта изменения их технического состояния // Тракторы и сельхозмашины, 2020. № 5. С. 37–44. DOI 10.31992/0321-4443-2020-5-37-44
- [16] Mokhiev A.P. Method of selection of forest machines under the climatic conditions // Forestry Engineering J., 2016, t. 6, no. 4(24), pp. 208–215. DOI 10.12737/23459
- [17] Чайка О.Р., Журавлев В.В. Обоснование параметров технологического оборудования харвестеров для несплошных рубок леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2021. № 2. С. 39–40. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40
- [18] Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин // ИзВУЗ Лесной журнал, 2022. № 5(389). С. 114–130.
- [19] Eliasson L. Simulation of thinning with a single-grip harvester // For. Sci., 1998, no. 45 (1), pp. 26–34.
- [20] Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods // International J. of Forest Engineering, 2005, v. 16, no. 2, pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
- [21] Чайка О.Р., Фокин Н.С. Алгоритм моделирования параметров лесных насаждений // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2018. № 12. С. 41–43. DOI 10.31044/1684-2561-2018-0-12-41-43
- [22] Черник Д.В., Казанцев Р.В. Имитационное физическое моделирование универсальной лесозаготовительной машины // Хвойные бореальной зоны, 2020. Т. 38. № 3–4. С. 183–188.
- [23] Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // ИзВУЗ Лесной журнал, 2003. № 4. С. 66–72.
- [24] Чайка О.Р., Михеев К.П. Алгоритм моделирования захвата и срезания деревьев харвестером на несплошных рубках леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2019. № 12. С. 30–33. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33
- [25] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests // Scandinavian J. of Forest Research, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
- [26] Wang J., LeDoux C.B. Estimating and validating ground-based timber harvesting production through computer simulation // For. Sci., 2003, no. 49(1), pp. 64–76.
- [27] Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, harvest, and equipment interactions in simulated harvesting prescriptions // For. Prod. J., 1998, no. 48(9), pp. 81–86.
- [28] Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: A software evaluation // For. Prod. J., 1997, no. 47(5), pp. 36–41.
- [29] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2012. № 8–2(129), С. 49–51.
- [30] Соколов А.П., Осипов Е.В. Обоснование технологии заготовки древесины с помощью имитационного моделирования на сетях Петри // Лесотехнический журнал, 2018. Т. 8. № 1(29). С. 111–119. DOI 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095
- [31] McNeel J., Rutherford D. Modeling harvester-forwarder system performance in a selection harvest // J. For. Eng., 1994, no. 6(1), pp. 7–14.
- [32] Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting cost model for small trees in natural stands in the interior northwest // For. Prod. J., 2001, no. 51(4), pp. 54–60.

Сведения об авторах

Сергеева Татьяна Владиславовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», sergeeva2010t@mail.ru

Гилязова Татьяна Аркадьевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», tat-gilyazova@yandex.ru

Рукомойников Константин Павлович  — д-р техн. наук, проф. кафедры лесопромышленных и химических технологий института леса и природопользования, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», rukomojnikovkp@volgatch.net

Поступила в редакцию 29.12.2023.

Одобрено после рецензирования 18.01.20243.

Принята к публикации 06.02.2024.

RESULTS OF HARVESTER SIMULATED SERVICE TEST DURING SELECTIVE LOGGING

T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, K.P. Rukomoynikov✉

Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, 424000, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russia

rukomojnikovkp@volgatech.net

The currently existing mathematical dependencies are aimed only at substantiating the productivity of harvesters and do not allow a detailed analysis of the complexity of individual elements of the cycle time depending on natural and industrial conditions. In this regard, the purpose of this study is to substantiate the mathematical patterns of harvester operation, which allow for rapid technical calculations of productivity and labor costs with a sufficient level of reliability when performing various logging operations. To achieve this goal, a simulation model of harvester operation in a logging area was created and experiments were conducted on this model. The results of statistical processing of simulation results are shown. Regression dependencies are proposed for calculating the average hourly productivity of a harvester, as well as for calculating individual elements of its cycle time, created as a result of analyzing the results of a study on a model. The regression dependences of calculating the average time of pointing the manipulator at a growing tree, moving a fallen tree to its processing zone and the average time of moving the harvester between working positions per sawn tree, which have scientific and practical novelty, are determined. It is proved that labor rationing is impossible without taking into account the influence of such indicators on these elements of time as the average volume of whiplash in the cutting area, the proportion of the component being cut down, the forest reserve per hectare and the amount of large undergrowth in the cutting area. Diagrams of changes in the values of cycle time elements in the conditions of a variety of natural and industrial conditions in various forest areas are shown. Based on the conclusions obtained in the article, practical and scientific recommendations have been developed that increase the efficiency of labor rationing in logging operations. The obtained regression models are recommended for analyzing work efficiency and labor rationing when using the Silvatec 8266TH harvester.

Keywords: simulation, logging, felling area, selective logging, statistical processing, regression dependence, cut-to-length harvesting

Suggested citation: Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Rukomoynikov K.P. *Rezultaty imitatsionnogo modelirovaniya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh lesa* [Results of harvester simulated service test during selective logging]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 136–149.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-136-149

References

- [1] Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood according to Scandinavian technology]. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions], 2019, 192 p.
- [2] Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Werner N.N., Shvetsova V.V. *Ocenka nadezhnosti lesozagotovitel'nogo kharvestera* [Logging harvester reliability assessment] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101
- [3] Zyryanov M.A., Saltanov A.G., Davydenko A.N. *Osnovnye tendentsii razvitiya konstruksii lesozagotovitel'noy tekhniki v usloviyakh sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Main trends in the design of forest machinery in conditions of improving technological processes]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: development ways], 2021, no. 5(119), pp. 48–54.
- [4] Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-length: The next decade. *J. of Forest Engineering*, 1999, no. 10(2), pp. 17–25.
- [5] Bol'shakov B.M., Andryushin M.I., Doronicheva E.V. *Razvitie tekhnologii i mashin pri rubkakh ukhoda za lesom v Finlyandii i Shvetsii* [The development of technology and machines when thinning the forest in Finland and Sweden]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 2, pp. 111–128. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.11
- [6] Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and cost of CTL harvesting of Eucalyptus globulus stands using excavator-based harvesters. *For. Prod. J.*, 2002, no. 52(1), pp. 67–77.
- [7] Savinykh T.I., Savinykh M.A., Yakimovich S.B. *Sravnitel'nyy analiz sposobov zagotovki drevesiny kharvesterom po kriteriyu proizvoditel'nosti i udel'noy energoemkosti* [Comparative analysis of methods of harvesting wood by harvester according to the criterion of productivity and specific energy intensity]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and economy in them], 2021, no. 4(79), pp. 69–74. DOI 10.51318/FRET.2021.95.37.006
- [8] Savenkov D.A., Savenkova N.V., Derbin M.V., Tret'yakov A.V. *Metod rotatsionnoy zameny pil'nykh tsepey kak sposob povysheniya proizvoditel'nosti kharvestera* [Rotary replacement of saw chains as a way to increase harvester productivity]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering journal], 2020, v. 10, no. 2(38), pp. 196–203. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/20
- [9] Chiorescu S., Gronlund A. Assessing the role of the harvester within the forestry-wood chain. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(2), pp. 77–84.
- [10] Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation. *Int. J. For. Eng.*, 2003, no. 14(2), pp. 31–43.
- [11] Wester F., Eliasson L. Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (Harwarder). *Int. J. For. Eng.*, 2003, no. 14(2), pp. 45–50.
- [12] Conradie I., Greene W.D., Murphy G.E. Value recovery with harvesters in southeastern USA pine stands. *Forest Products J.*, 2004, no. 54(12), pp. 80–84.
- [13] Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's logging businesses, 1987 to 1997. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(1), pp. 25–28.

- [14] Piskunov M.A. *Kompanii-uchastniki promyshlennoy kooperatsii po izgotovleniyu kharvesterov i forvarderov: analiz pervichnoy informatsii* [Features of the harvesting and logging equipment market in Russia]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2020, no. 6 (378), pp. 132–147. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
- [15] Piskunov M.A. *Issledovanie stoimosti kharvesterov na vtorichnom rynke kak aspekta izmeneniya ikh tekhnicheskogo sostoyaniya* [Research on the price of harvesters in the secondary market as an aspect of changing their technical condition]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2020, no. 5, pp. 37–44. DOI 10.31992/0321-4443-2020-5-37-44
- [16] Mokhiev A.P. Method of selection of forest machines under the climatic conditions. *Forestry Engineering J.*, 2016, t. 6, no. 4(24), pp. 208–215. DOI 10.12737/23459
- [17] Chayka O.R., Zhuravlev V.V. *Obosnovanie parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya kharvesterov dlya nesploshnykh rubok lesa* [Justification of parameters of harvesters' technological equipment for non-final loggings]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2021, no. 2, pp. 39–40. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40
- [18] Zhuk K.D., Ugryumov S.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F. *Razmerno-kachestvennye kharakteristiki kruglykh sortimentov, zagotavlivaemykh s primeneniem mnogooperatsionnykh lesnykh mashin* [Dimension and quality specifications of round logs harvested with the use of multi-operational forest machines]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 5(389), pp. 114–130. DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-114-130
- [19] Eliasson L. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *For. Sci.*, 1998, no. 45 (1), pp. 26–34.
- [20] Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International J. of Forest Engineering*, 2005, v. 16, no. 2, pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
- [21] Chayka O.R., Fokin N.S. *Algoritm modelirovaniya parametrov lesnykh nasazhdeniy* [Simulation algorithm of parameters of forest plantations]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2018, no. 12, pp. 41–43. DOI 10.31044/1684-2561-2018-0-12-41-43
- [22] Chernik D.V., Kazantsev R.V. *Imitatsionnoe fizicheskoe modelirovanie universal'noy lesozagotovitel'noy mashiny* [Imitational physical modeling of a universal forestry machine]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2020, v. 38, no. 3–4, pp. 183–188.
- [23] Shirin Yu.A., Onuchin E.M. *Imitatsionnoe modelirovanie dvizheniya mnogooperatsionnoy lesnoy mashiny* [Simulation modeling of the movement of a multi-operational forest machine]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2003, no. 4, pp. 66–72.
- [24] Chayka O.R., Mikheev K.P. *Algoritm modelirovaniya zakhvata i srezaniya derev'ev kharvesterom na nesploshnykh rubkakh lesa* [Simulation algorithm for gripping and cutting of trees by harvester in case of incompleting forest felling]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2019, no. 12, pp. 30–33. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33
- [25] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
- [26] Wang J., LeDoux C.B. Estimating and validating ground-based timber harvesting production through computer simulation. *For. Sci.*, 2003, no. 49(1), pp. 64–76.
- [27] Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, harvest, and equipment interactions in simulated harvesting prescriptions. *For. Prod. J.*, 1998, no. 48(9), pp. 81–86.
- [28] Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: A software evaluation. *For. Prod. J.*, 1997, no. 47(5), pp. 36–41.
- [29] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation modeling of harvester's work: algorithm and realization]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2012, no. 8–2(129), pp. 49–51.
- [30] Sokolov A.P., Osipov E.V. *Obosnovanie tekhnologii zagotovki drevesiny s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya na setyakh Petri* [Substantiation of the technology of wood harvesting with the help of imitation modeling on petri net]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering journal], 2018, v. 8, no. 1(29), pp. 111–119. DOI 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095
- [31] McNeel J., Rutherford D. Modeling harvester-forwarder system performance in a selection harvest. *J. For. Eng.*, 1994, no. 6(1), pp. 7–14.
- [32] Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting cost model for small trees in natural stands in the interior northwest. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(4), pp. 54–60.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

Authors' information

Sergeeva Tat'yana Vladislavovna — pg. of the Volga State University of Technology, sergeeva2010t@mail.ru

Gilyazova Tat'yana Arkad'evna — pg. of the Volga State University of Technology, tat-gilyazova@yandex.ru

Rukomoynikov Konstantin Pavlovich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, rukomojnikovkp@volgatech.net

Received 29.12.2023.

Approved after review 18.01.2024.

Accepted for publication 06.02.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest