

Научная статья

УДК 630\*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-153-165

## Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера

**К.П. Рукомойников**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

**Т.В. Сергеева**, *аспирант*; ResearcherID: [AAY-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

**Т.А. Гилязова**, *аспирант*; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

**Е.М. Царев**, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

**П.Н. Анисимов**, *канд. техн. наук, доц.*; ResearcherID: [S-2129-2016](https://orcid.org/0000-0002-7789-2399),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; RukomojnikovKP@volgatech.net<sup>✉</sup>, Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, AnisimovPN@volgatech.net

Поступила в редакцию 30.12.23 / Одобрена после рецензирования 03.03.24 / Принята к печати 05.03.24

**Аннотация.** Краткий анализ исследований, посвященных лесозаготовительной технике, позволил сделать вывод о необходимости дополнительного изучения степени влияния на производительность харвестера лесоводственно-таксационных показателей древостоя, содержащих количественную информацию о заготавливаемых и остающихся на доразживание деревьях. Степень влияния количественных показателей древостоя на работу харвестера носит случайный характер, что обусловлено бесконечно большим разнообразием вариантов пространственного расположения деревьев на пасаках. В статье представлены результаты производственного эксперимента по оценке воздействия количественных характеристик древостоя на продолжительность отдельных элементов цикла работы харвестера. В число анализируемых факторов были включены общее количество деревьев на 1 га и доля вырубаемого компонента древостоя. Данные факторы играют значительную роль в оценке сменной и часовой производительностей машин, однако при анализе продолжительности ряда элементов цикла работы манипуляторных машин важность этих показателей многими исследователями недооценена и в целях повышения удобства и простоты расчетов названные показатели не используются при обосновании трудозатрат. Оба фактора были рассмотрены на 3 уровнях варьирования. В результате доказано значимое влияние анализируемых факторов на продолжительность 3 независимых элементов цикла работы машины: наведения манипулятора на дерево, подтаскивания хлыста в зону обработки и перемещения харвестера между рабочими позициями. Эксперимент осуществлен с использованием харвестера Silvatec 8266ТН в условиях его работы на пасаках с различными лесоводственными и таксационными характеристиками. Показана последовательность проведения производственного эксперимента и статистической обработки полученных данных. Дисперсионный анализ позволил сделать вывод о необходимости комплексного учета исследованных факторов при оценке каждой технологической операции. Результаты могут быть использованы для совершенствования математических зависимостей в расчетах производительности и трудозатрат при проектировании лесосечных работ.

© Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** производственный эксперимент, харвестер, лесосечные работы, выборочная рубка, статистика, лесосека, латинский квадрат, дисперсионный анализ

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

**Для цитирования:** Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 153–165. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-153-165>

Original article

## The Influence of the Stand Composition on the Cycle Time of the Harvester

**Konstantin P. Rukomojnikov**<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

**Tat'yana V. Sergeeva**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAY-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

**Tat'yana A. Gilyazova**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

**Evgeniy M. Tsarev**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

**Pavel N. Anisimov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [S-2129-2016](https://orcid.org/0000-0002-7789-2399),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation;  
RukomojnikovKP@volgatech.net<sup>✉</sup>, Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru,  
CarevEM@volgatech.net, AnisimovPN@volgatech.net

Received on December 30, 2023 / Approved after reviewing on March 3, 2024 / Accepted on March 5, 2024

**Abstract.** A brief analysis of studies on logging equipment has allowed us to conclude that it is necessary to further study the degree of influence of silvicultural and taxation indicators of the stand, containing quantitative data on the trees harvested and remaining for rearing, on the productivity of the harvester. The degree of influence of quantitative indicators of the stand on the work of the harvester is random, which is due to the infinitely wide variety of options for the spatial arrangement of trees in forest swathes. The article presents the results of a production experiment to assess the impact of the quantitative characteristics of the forest stand on the duration of individual elements of the cycle time of the harvester. The analyzed factors included the total number of trees per 1 hectare and the proportion of the felled component of the stand. These factors play a significant role in assessing the shift and hourly productivity of machines, however, when analyzing the duration of a number of elements of cycle time of manipulator machines, the importance of these indicators is underestimated by many researchers and, in order to increase the convenience and simplicity of calculations, these indicators are not used in justifying labour costs. Both factors have been considered at three levels of variation. As a result, the significant influence of the analyzed factors on the duration of 3 independent elements of cycle time of the machine (pointing the manipulator at the tree, hauling the trunk to the processing zone and moving the harvester between operating positions) has been proven. The experiment has been carried out using the Silvatec 8266TH harvester under conditions of its operation in the swathes characterized



by various silvicultural and taxation indicators. The sequence of conducting the production experiment and statistical processing of the obtained data has been shown. The analysis of variance has allowed us to conclude that it is necessary to comprehensively take into account the analyzed factors when assessing each technological operation. The results can be used to improve mathematical relationships in calculating productivity and labour costs when designing logging operations.

**Keywords:** production experiment, harvester, logging operations, selective logging, statistics, felling area, Latin square, analysis of variance

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

**For citation:** Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. The Influence of the Stand Composition on the Cycle Time of the Harvester. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 153–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-153-165>

### *Введение*

Производительность харвестера зависит от большого числа таксационных и лесоводственных показателей древостоя. Многие существующие исследования по анализу воздействия таксационных и лесоводственных характеристик на эффективность работы лесозаготовительного харвестера подчеркивают важнейшую роль объемных показателей предмета труда (дерева), не акцентируя внимание на количестве деревьев на 1 га и степени изреживания древостоя в процессе рубки [3, 5–7]. В то же время движения харвестера при выборочных рубках должны осуществляться с минимальными повреждениями оставляемых на доращивание деревьев. Работа любой лесозаготовительной машины при увеличении их доли на лесосеке в значительной степени усложняется. Существует ряд теоретических исследований, подтверждающих гипотезу о негативном влиянии на производительность харвестера повышения числа остающихся на лесосеке деревьев [2, 10, 16]. Созданы имитационные модели, позволяющие провести компьютерный анализ влияния пространственного расположения деревьев на траекторию движения как харвестера, так и его манипулятора [8, 9, 18]. Однако в настоящий момент отсутствует экспериментальная производственная оценка значимости воздействия количественных показателей вырубаемых и остающихся на лесосеке деревьев на трудозатраты при выполнении отдельных элементов работы лесозаготовительного харвестера.

Цель исследования – оценка влияния количественных характеристик состава древостоя на продолжительность отдельных элементов в цикле работы харвестера.

### *Объекты и методы исследования*

Приведенный выше краткий анализ существующих исследований позволил сделать вывод о недостаточной изученности и необходимости дополнительного анализа степени влияния на производительность харвестера лесоводственно-таксационных показателей древостоя, отражающих количество заготавливаемых и остающихся на доращивание деревьев и демонстрирующих случайный характер степени влияния на работу харвестера. Случайность здесь обусловлена бесконечно большим разнообразием вариантов пространственно-

го расположения как заготавливаемых деревьев, так и деревьев, оставляемых на доращивание и являющихся препятствиями для движения манипулятора, а также разнообразием вариантов выбора мест для остановок харвестера на каждой новой рабочей позиции по отношению к деревьям. Исходя из этого, для производственного эксперимента было выделено 2 фактора: количество деревьев на гектаре  $k_d$  и доля вырубаемого компонента  $k_i$ .

На основе анализа априорных данных было выдвинуто предположение о статистической незначимости взаимодействий рассматриваемых факторов, показывающее, что общее количество деревьев на 1 га не зависит от доли вырубаемых деревьев в общем составе древостоя и наоборот. Выбран план эксперимента типа латинского квадрата с варьированием факторов на 3 уровнях –  $n = 3$  (табл. 1). Интервалы варьирования для фактора  $k_d$ :  $k_{d1} = 200$ ;  $k_{d2} = 400$ ;  $k_{d3} = 600$ ; для фактора  $k_i$ :  $k_{i1} = 0,2$ ;  $k_{i2} = 0,6$ ;  $k_{i3} = 1$ . Этот план позволяет осуществить равномерное сканирование факторного пространства и выявить значимые факторные признаки.

Таблица 1

**Представление латинского квадрата с учетом уровней варьлируемых факторов производственного эксперимента**  
**The representation of the Latin square taking into account the levels of variable factors of the production experiment**

$k_i$	$k_d$		
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$
$k_{i1}$	$\Pi_{ч1}$	$\Pi_{ч4}$	$\Pi_{ч7}$
$k_{i2}$	$\Pi_{ч2}$	$\Pi_{ч5}$	$\Pi_{ч8}$
$k_{i3}$	$\Pi_{ч3}$	$\Pi_{ч6}$	$\Pi_{ч9}$

Примечание:  $\Pi_{ч1}$ – $\Pi_{ч9}$  – часовые производительности на пасеках 1–9, м<sup>3</sup>.

Тогда план производственного эксперимента можно представить в виде табл. 2.

Таблица 2

**План производственного эксперимента при анализе факторов, влияющих на производительность харвестера**  
**The production experiment plan for the analysis of factors affecting the harvester performance**

Номер пасеки	$k_d$	$k_i$	$\Pi_{ч}$
1	$k_{d1}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч1}$
2	$k_{d1}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч2}$
3	$k_{d1}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч3}$
4	$k_{d2}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч4}$
5	$k_{d2}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч5}$
6	$k_{d2}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч6}$
7	$k_{d3}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч7}$
8	$k_{d3}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч8}$
9	$k_{d3}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч9}$

В ходе эксперимента осваивались отдельные пасеки на лесосеке, отведенной для сплошной рубки леса на территории горельников в весенний период 2023 г. Породный состав древостоя – 10С. Средний запас древесины на 1 га – 240 м<sup>3</sup>. Средний объем деревьев – 0,4 м<sup>3</sup>. Крупный подлесок отсутствовал.

Осуществлялось наблюдение за работой харвестера Silvatec 8266, управляемого оператором со стажем работы более 5 лет. Ширина пасек составляла 15 м. Анализируемые участки пасек имели протяженность 100 м. В ходе экспериментальных исследований проведено 9 опытов. С целью обеспечения требуемого согласно плану эксперимента количества деревьев на участках пасек: 30 (1–3-я пасеки), 60 (4–6-я пасеки) и 90 (7–9-я пасеки) деревьев, – соответствующего среднему запасу 600, 400 и 200 дер./га, осуществлялось предварительное прореживание пасек (см. рисунок). В процессе их подготовки харвестер перемещался по технологическим коридорам по обе стороны пасек и выполнял выборочную рубку для достижения необходимого количества деревьев. После подготовки очередной пасеки харвестер начинал работу на ней, перемещаясь по пасечному волоку, проложенному посередине пасеки. В это время наблюдатель, находящийся в кабине, с помощью секундомера фиксировал трудозатраты на выполнение отдельных элементов работы.

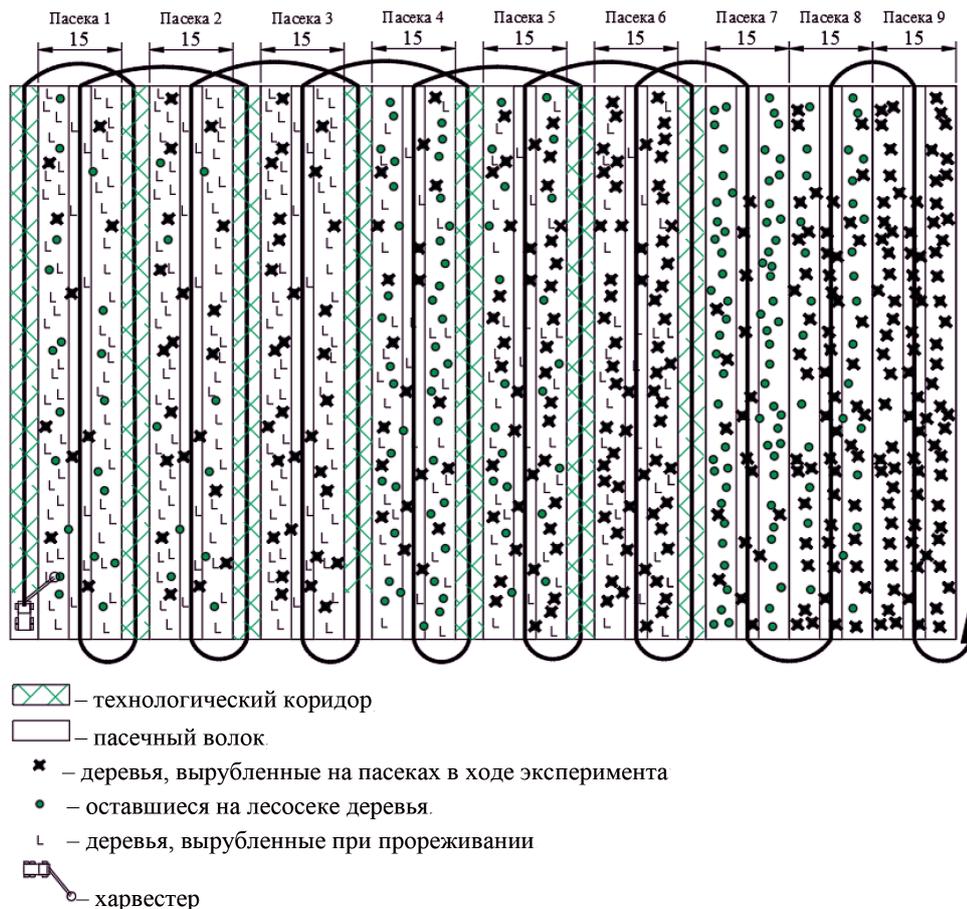


Схема реализации эксперимента (15 – ширина пасеки, м)

The scheme of the experiment implementation (15 – the width of the forest swathe, m)

Производительность определялась путем регистрирования объемных показателей заготовленных лесоматериалов на дисплее машины. При этом на пасаках 1, 4, 7 доля прореживания древостоя составляла 20 %; на пасаках 2, 5, 8 – 60 %; на пасаках 3, 6, 9 – 100 %. После разработки пасаки по всей ее длине харвестер перемещался в технологический коридор вблизи следующей пасаки и начинал ее подготовку к эксперименту.

При изучении влияния природно-производственных факторов на выходной параметр «производительность харвестера» был использован метод дисперсионного анализа, позволивший оценить существенность интересующих нас составляющих на фоне фактора случайности.

Для реализации эксперимента определены следующие фиксажные точки: продолжительность наведения манипулятора регистрировалась с момента изменения направления взгляда оператора харвестера для выбора следующего дерева после завершения предыдущей операции. Момент начала движения захватов харвестерной головки при захвате дерева считался завершением наведения манипулятора;

продолжительность перемещения поваленного дерева фиксировалась с момента отделения дерева от пня и до начала раскряжевки ствола;

начало перемещения харвестера между рабочими позициями отмечалось аналогично времени начала наведения манипулятора – с момента изменения направления взгляда оператора харвестера для выбора следующего дерева после завершения предыдущей операции. Момент остановки харвестера на новой рабочей позиции брался за время завершения операции.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Экспериментальные данные наблюдений за производительностью харвестера и результаты их предварительной обработки представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### **Результаты предварительной обработки наблюдений за производительностью харвестера**

#### **The results of pre-processing the observations of the harvester performance**

Фактор $k_i$	Фактор $k_d$			$K_i$	$K_i^2$
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$		
$k_{i1}$	$\Pi_{ч1} = 10,9$	$\Pi_{ч4} = 13,4$	$\Pi_{ч7} = 15,4$	39,7	1576,09
$k_{i2}$	$\Pi_{ч2} = 14,1$	$\Pi_{ч5} = 15,0$	$\Pi_{ч8} = 16,2$	45,3	2052,09
$k_{i3}$	$\Pi_{ч3} = 15,2$	$\Pi_{ч6} = 15,9$	$\Pi_{ч9} = 16,6$	47,7	2275,29
$K_d$	40,2	44,3	48,2	132,7	
$K_d^2$	1616,04	1962,49	2323,24		

Дисперсионный анализ результатов выполнен по следующим формулам.

1. Подведение общего итога:

$$G = \sum_{j=1}^{n=3} K_{dj} = \sum_{k=1}^{n=3} K_{ik} = 132,7,$$

где  $j, k$  – уровни варьирования факторов  $k_d$  и  $k_i$  соответственно;  $K_{dj}, K_{ik}$  – сумма результирующих значений производительности при каждом уровне варьирования факторов  $k_d$  и  $k_i$  соответственно.

2. Определение общей суммы квадратов всех наблюдений:

$$S_o = \sum_{j=1}^{n=3} \sum_{k=1}^{n=3} \Pi_{чjk}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 24,602.$$

3. Вычисление суммы квадратов для каждого фактора:

$$S_{k_d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n K_{dj}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 10,669;$$

$$S_{k_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n K_{ik}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 11,235.$$

4. Нахождение остаточной суммы квадратов:

$$S_{ост} = S_o - (S_{k_d} + S_{k_i}) = 2,698.$$

Результаты дисперсионного анализа данных представлены в табл. 4.

Таблица 4

#### Дисперсионный анализ влияния факторов на производительность харвестера

#### The analysis of variance of the influence of factors on the harvester performance

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Среднее квадратическое отклонение	Уровень значимости	Критерий Фишера	
					расчетное значение	критическое значение
$k_d$	10,669	2	5,334	0,04	7,91	6,94
$k_i$	11,236	2	5,618	0,03	8,33	6,94
$S_{ост}$	2,698	4	0,674			
<i>Итого</i>	24,602	8				

Можно сделать вывод о значимом влиянии анализируемых факторов  $k_d, k_i$ . Во всех случаях расчетный критерий Фишера превышает табличное критическое значение этого показателя  $F_{кр} = F_{1-P}(v_1, v_2, P)$ , взятого при 5%-м уровне значимости и степенях свободы числителя  $v_1 = n - 1$  и знаменателя  $v_2 = (n - 1)(n - 2)$ .

На основе результатов производственного эксперимента аналогично вышеприведенным расчетам выполнен дисперсионный анализ результатов влияния факторных признаков на продолжительность ряда элементов цикла заготовки сортиментов:

$t_{нав}$  – среднюю продолжительность анализа оператором доступности вырубемого дерева и наведения на него манипулятора, с;

$t_{подт}$  – среднюю продолжительность подтаскивания поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе подтаскивания, с;

$t_{\text{пер}}$  – среднюю продолжительность перемещения между рабочими позициями, с.

Результаты дисперсионного анализа сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Представление латинских квадратов  
с учетом уровней варьируемых факторов  
и полученных значений средней продолжительности  
элементов рабочего цикла харвестера**

**The representation of the Latin squares taking into account  
the levels of variable factors and the obtained values  
of the average duration of elements of the cycle time  
of the harvester**

$k_i$	$k_d$		
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$
$k_{i1}$	$t_{\text{нав}1} = 12,9$	$t_{\text{нав}4} = 13,3$	$t_{\text{нав}7} = 13,8$
$k_{i2}$	$t_{\text{нав}2} = 12,3$	$t_{\text{нав}5} = 12,7$	$t_{\text{нав}8} = 13,2$
$k_{i3}$	$t_{\text{нав}3} = 10,5$	$t_{\text{нав}6} = 10,8$	$t_{\text{нав}9} = 11,1$
$k_{i1}$	$t_{\text{подт}1} = 8,5$	$t_{\text{подт}4} = 9,6$	$t_{\text{подт}7} = 10,9$
$k_{i2}$	$t_{\text{подт}2} = 9,9$	$t_{\text{подт}5} = 11,2$	$t_{\text{подт}8} = 11,9$
$k_{i3}$	$t_{\text{подт}3} = 8,1$	$t_{\text{подт}6} = 9,3$	$t_{\text{подт}9} = 9,7$
$k_{i1}$	$t_{\text{пер}1} = 34,3$	$t_{\text{пер}4} = 20,1$	$t_{\text{пер}7} = 14,1$
$k_{i2}$	$t_{\text{пер}2} = 13,8$	$t_{\text{пер}5} = 6,4$	$t_{\text{пер}8} = 4,1$
$k_{i3}$	$t_{\text{пер}3} = 8,1$	$t_{\text{пер}6} = 3,7$	$t_{\text{пер}9} = 2,5$

Результаты подсчета показателей дисперсионного анализа по всем факторным признакам показаны в табл. 6.

Таблица 6

**Итоговые показатели дисперсионного анализа  
по каждому факторному признаку**

**The final indicators of the analysis  
of variance for each factor characteristic**

Фактор	$G$	$S_o$	$S_{k_d}$	$S_{k_i}$	$S_{\text{ост}}$
$t_{\text{нав}}$	110,6	11,509	10,516	0,962	0,030
$t_{\text{подт}}$	89,1	12,380	6,047	6,080	0,253
$t_{\text{пер}}$	107,1	838,580	554,587	225,167	58,827

Итоговые результаты дисперсионного анализа по каждому из анализируемых элементов цикла представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Дисперсионный анализ результатов наблюдений за продолжительностью  
элементов цикла работы харвестера**

**The analysis of variance of the results of observations of the duration of elements  
of the cycle time of the harvester**

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Среднее квадратическое отклонение	Уровень значимости	Критерий Фишера	
					расчетное значение	критическое значение
<i>Продолжительность наведения манипулятора</i>						
$k_d$	0,962	2	0,481	0,001	61,857	6,944
$k_i$	10,516	2	5,258	0,000	676,000	6,944
$S_{ост}$	0,031	4	0,008			
<i>Итого</i>	11,509	8				
<i>Продолжительность подтаскивания поваленного дерева</i>						
$k_d$	6,080	2	3,040	0,002	48,000	6,944
$k_i$	6,047	2	3,023	0,002	47,737	6,944
$S_{ост}$	0,253	4	0,063			
<i>Итого</i>	12,380	8				
<i>Продолжительность перемещения между рабочими позициями</i>						
$k_d$	225,167	2	112,583	0,043	7,655	6,944
$k_i$	554,587	2	277,293	0,009	18,855	6,944
$S_{ост}$	58,827	4	14,707			
<i>Итого</i>	838,580	8				

Во всех случаях расчетный критерий Фишера превышает табличный критический при 5%-м уровне значимости и степенях свободы числителя  $\nu_1$  и знаменателя  $\nu_2$ .

В научной литературе решение вопросов использования анализируемых в данной работе факторов при оценке трудозатрат имеет достаточно противоречивый характер. Все исследователи в области лесной промышленности соглашаются, что данные факторы играют роль в сменной и часовой производительностях машин, однако при анализе продолжительности ряда элементов цикла работы манипуляторных машин важность этих показателей часто недооценивается, и в целях повышения удобства и простоты расчетов они не применяются при обосновании трудозатрат. В частности, в математических моделях [1, 4, 11, 12] эти показатели использованы при оценке продолжительности перемещений харвестера, но не учитываются при характеристике продолжительности таких элементов цикла, как наведение манипулятора и подтаскивание дерева в зону обработки. Существующие российские нормы (Межотраслевые нормы выработки и времени на лесозаготовительные

работы. Утв. Постановлением Мин-ва труда Рос. Федерации от 19 дек. 1994 г. № 82) не принимают названные факторы во внимание при обосновании часовых норм выработки. Регрессионные зависимости, полученные исследователями в ходе производственных и имитационных экспериментов, также противоречивы: ряд источников [14, 16, 19] выдвигает гипотезу о значимости этих факторов, приводя доказательства для различных природных условий лесосек, а ряд [13, 15, 17], напротив, не рассматривает варианты сочетания этих факторов при выборочных рубках леса, выделяя в качестве основных факторов объемные показатели деревьев.

В то же время, анализируя экспериментальные результаты исследования продолжительности наведения манипулятора, можно отметить рост трудозатрат при снижении доли вырубаемого компонента. Это связано с тем, что остающиеся на доращивание деревья создают препятствия на пути движения манипулятора. Чем больше густота древостоя, тем сложнее оператору при выборе направления падения дерева, а следовательно, увеличивается продолжительность анализа ситуации при наведении на него манипулятора.

С повышением густоты древостоя оператору сложнее обеспечить передвижение поваленного дерева без повреждения растущих.

При увеличении доли вырубаемого компонента в ходе выборочных рубок растет процент деревьев, заготавливаемых на полупасеках, по сравнению с числом деревьев, вырубаемых на волоках. Трудозатраты на перемещение поваленных деревьев с территории полупасек с обеспечением сохранности остающихся на доращивание деревьев значительно больше, чем при перемещении деревьев, поваленных на волоке. Кроме того, при выборочных рубках необходимость обеспечения сохранности оставляемых на доращивание деревьев приводит к дополнительным перемещениям не только манипулятора, но и самой машины при подтаскивании их в зону обработки, что обуславливает рост продолжительности операции. Вследствие большого расстояния между деревьями при сплошных рубках продолжительность операции здесь меньше, чем при выборочных.

Увеличение средней продолжительности перемещения харвестера на каждую новую рабочую позицию при снижении числа вырубаемых деревьев на площади и росте расстояния между ними не вызывает сомнения. Однако в ходе эксперимента отмечено, что при выборочных рубках с целью минимизации повреждений оставляемых на доращивание деревьев при перемещении хлыстов в зону обработки оператору харвестера в ряде случаев приходится одновременно с движением манипулятора осуществлять движение харвестера по волоку в обратном направлении, что в последующем повышает расстояние, проходимое харвестером при перемещении вперед до следующей рабочей позиции, и в целом суммарные расстояния передвижений машины по лесосеке. Это показывает, что влияние на среднюю продолжительность перемещения харвестера между рабочими позициями имеет не только количество вырубаемых деревьев, но и количество деревьев, оставляемых на доращивание.

*Заключение*

В результате проведенного производственного эксперимента доказано, что продолжительность всех анализируемых элементов цикла работы харвестера: наведения манипулятора на дерево, подтаскивания хлыста в зону обработки, перемещения харвестера между рабочими позициями – напрямую зависит от факторов, характеризующих состав древостоя в условиях конкретных лесосек, таких как доля вырубемого компонента и количество деревьев на 1 га.

В анализируемом факторном пространстве значимое влияние на продолжительность перемещения машины между рабочими позициями оказывают значения обоих количественных факторных признаков. Как показало проведенное на практике исследование, необходим комплексный учет анализируемых факторов при оценке каждой технологической операции.

Результаты могут быть использованы для совершенствования математических зависимостей в расчетах производительности и трудозатрат при проектировании лесосечных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В. Сортиментная заготовка леса / науч. ред. Н.А. Луганский, Н.В. Лившиц; Урал. гос. лесотехн. акад. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 134 с.

Azarenok V.A., Hertz E.F., Mekhrentsev A.V. *Cut-to-Length Timber Harvesting: a Textbook for Universities*. Ural State Forest Engineering Academy. Yekaterinburg: USFEA Publ., 2001. 134 p. (In Russ.).

2. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д. Системный анализ технологической эффективности производства сортиментов на базе ВСРМ // Изв. СПбЛТА. 2020. № 233. С. 177–188.

Bazarov S.M., Belenkii Yu.I., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Balde T.M.D. System Analysis of the Wheel Forwarder's Technological Efficiency on the Unloading Operation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnikeskoj akademii*, 2020, no. 233, pp. 177–188 (in Russian with English summary). (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.177-188>

3. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д. Системный анализ динамики работы харвестерной головки валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (ХГ ВСРМ) // Изв. СПбЛТА. 2021. № 235. С. 150–164.

Bazarov S.M., Belenkii Yu.I., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Balde T.M.D. System Analysis of the Dynamics of the Harvester Head of Wheel Harvester. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnikeskoj akademii*, 2021, no. 235, pp. 150–164 (in Russian with English summary). (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.150-164>

4. Григорьев И.В., Редькин А.К., Иванов В.А., Пошарников Ф.В., Шегельман И.Р., Ширнин Ю.А., Кацадзе В.А., Валяжонков В.Д., Бит Ю.А., Матросов А.В., Куницкая О.А. Технологии и машины лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2012. 362 с.

Grigor'yev I.V., Red'kin A.K., Ivanov V.A., Posharnikov F.V., Shegel'man I.R., Shirnin Yu.A., Katsadze V.A., Valyazhonkov V.D., Bit Yu.A., Matrosov A.V., Kunitskaya O.A. *Technology and Machines for Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbSFTU named after S.M. Kirov Publ., 2012. 362 p. (In Russ.).

5. Мохирев А.П. Методика выбора лесозаготовительных машин под природно-климатические условия // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 208–215.
- Mokhirev A.P. The Method of Selection of Forest Machines under the Climatic Conditions. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 208–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/23459>
6. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 93–101.
- Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Verner N.N., Shvetsova V.V. Logging Harvester Reliability Assessment. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>
7. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 154–158.
- Rukomojnikov K.P. Simulation Modeling of Mutually Coordinated Operation of Sets of Adaptive-Modular Forest Machines. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 3, pp. 154–158. (In Russ.).
8. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевых машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113.
- Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. Computer Simulation of the Development of Logging Sites Using a Felling-Delimiting Bucker. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2022, № 2(54), pp. 108–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-2-108-113>
9. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехн. журн. 2017. Т. 7, № 3(27). С. 307–314.
- Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation of the Production Process of Timber Harvesting with the Help of Petri Nets. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, vol. 7, no. 3(27), pp. 307–314. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](https://doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
10. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Пример расчета производительности харвестера с учетом природно-производственных условий // Актуальные вопросы транспорта в лесном комплексе: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 28–29 нояб. 2019 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 76–80.
- Khitrov E.G., Grigoriev G.V., Dmitrieva I.N. An Example of Calculating Harvester Productivity Taking into Account Natural Production Conditions. *Current Issues of Transport in the Forest Complex: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (St. Petersburg, November 28–29, 2019). St. Petersburg, SPbSFTU named after S.M. Kirov Publ., 2020, pp. 76–80. (In Russ.).
11. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профи-информ, 2005. 344 с.
- Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Technical Equipment of Modern Logging*. St. Petersburg, Profi-inform Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).
12. Ширнин Ю.А. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- Shirnin Yu.A. *Technology and Equipment of Timber Industries. Part 1. Logging Operations*. Moscow, MSUF Publ., 2004. 445 p. (In Russ.).

13. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
14. Li Y. Modeling Operational Forestry Problems in Central Appalachian Hardwood Forests. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*, 2005, art. no. 4166. <https://doi.org/10.33915/etd.4166>
15. McNeel J.F., Rutherford D. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661>
16. Mederski P.S., Bembenek M., Karaszewski Z., Łacka A., Szczepańska-Álvarez A., Rosińska M. Estimating and Modelling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 37, no. 1, pp. 27–36.
17. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, art. no. 346. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
18. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Komisar V.P. Computer Modeling to Support Management and Organizational Decisions in the Use of a Forest Harvester. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 2022, vol. 12251, art. no. 122510P. <https://doi.org/10.1117/12.2631137>
19. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of Harvester Productivity in Selective and Boom-Corridor Thinning of Young Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 56–73. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest