



Оценка эксплуатационной эффективности харвестеров с применением энергетической концепции

Сергей А. Голякевич✉, gsa@belstu.by, 0000-0001-5095-8725

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова 13 а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

В статье изложены результаты комплексных исследований по оценке эксплуатационной эффективности харвестеров. Аналитической основой исследований является предложенная автором энергетическая концепция создания и применения комплексов многооперационных лесозаготовительных машин. Исходные данные для анализа представляют собой результаты экспериментальных исследований и математического моделирования работы харвестеров. Оценка адекватности и точности использованной авторской математической модели выполнена по t-критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05. Критерием оценки эффективности выступает разработанный интегральный показатель удельного потенциала производительности. Исследования проведены для типовых лесозаготовительных условий Республики Беларусь и технологических процессов разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин. Изложены результаты оценки скорости работы приводов отдельных звеньев манипуляторов и его влияние на эффективность технологического процесса харвестера. Показано, что вклад скорости работы отдельных звеньев существенно зависит от характера совмещаемых оператором движений. Установлено, что рост подачи гидравлической жидкости в гидроцилиндр телескопического звена свыше 117 л/мин практически не приводит к росту средних скоростей выполнения операции перемещения дерева, а лишь увеличивает динамическую нагруженность и энергозатраты на преодоление сил инерции. По результатам исследований установлены закономерности нелинейного изменения затрат энергии, времени и динамических нагрузок в конструкциях харвестеров при различных вариантах совмещения операций валки деревьев их перемещения и обрезки сучьев при соответствующих мощностях приводов в стохастически распределенных лесозаготовительных условиях. Предложен технологический процесс последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов, который на 14,4–16,9% эффективнее в сравнении с технологией отдельного применения харвестера большего размерно-энергетического класса для условий лесосек, имеющих значительную стохастичность объемов стволов.

Ключевые слова: харвестер, операция, методика, эффективность, технология, эксплуатация, условия, манипулятор, харвестерная головка, концентрация, валка, обрезка сучьев, раскряжевка

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Автор благодарит сотрудников кафедры лесных машин, дорог и технологий лесозаготовительного производства Белорусского государственного технологического университета и Научно-технического центра холдинга «Амкодор» за техническую помощь и важные практические замечания в процессе проведения исследований, а также рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голякевич, С. А. Оценка эксплуатационной эффективности харвестеров с применением энергетической концепции / С. А. Голякевич // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 183–203. – Библиогр.: с. 200–203 (30 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/12>.

Поступила 20.02.2026. Пересмотрена 20.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Evaluating the operational efficiency of harvesters using an energy-based approach

Sergey A. Golyakevich ✉, gsa@belstu.by,  0000-0001-5095-8725

Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13 a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

Abstract

The article presents the results of comprehensive research evaluating the operational efficiency of harvesters. The analytical basis of the research is the author's proposed energy concept for the development and application of multi-operation timber-harvesting machine complexes. The initial data for the analysis comprise the results of experimental studies and mathematical modeling of harvester operation. The assessment of the adequacy and accuracy of the author's mathematical model used was performed using the Student's t-test at an innovation level of 0.05. The evaluation criterion is a developed integral indicator of specific productivity potential. The research was conducted for typical logging conditions in the Republic of Belarus and technological processes for timber harvesting using complexes of multi-operation forestry machines. Based on the research results, regularities of nonlinear changes in energy consumption, time, and dynamic loads in harvester structures were established. These changes occur under various modes of combining tree felling, moving, and delimbing operations with corresponding drive powers in stochastically distributed logging conditions. The results of assessing the speed of the drives of individual manipulator links and its impact on the efficiency of the harvester's technological process are presented. It is shown that the contribution of the operating speed of individual links significantly depends on the nature of the movements combined by the operator. It has been established that increasing the hydraulic fluid flow rate to the telescopic link cylinder above 117 L/min practically does not lead to an increase in the average speeds of the tree moving operation, but only increases dynamic loading and energy consumption for overcoming inertia forces. A technological process involving the sequential application of harvesters of different size-energy classes on the same cutting area is proposed. This process is 14.4–16.9% more efficient compared to the technology of using only a larger size-energy class harvester in conditions where cutting areas have significant stochastic variability in trunk volumes.

Keywords: *harvester, forwarder, operation, methodology, efficiency, technology, operation, conditions, manipulator, harvester head, concentration, felling, delimbing, bucking*

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The author thanks the staff of the Department of Forest Machines, Roads and Logging Technologies of the Belarusian State Technological University and the Scientific and Technical Center of the Amkodor Holding for their technical assistance and important practical comments during the research process, as well as the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Golyakevich S. A. (2026). Evaluating the operational efficiency of harvesters using an energy-based approach. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 183-203 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/12>.

Received 20.02.2026.

Revised 20.03.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Конкурентоспособность многооперационных лесозаготовительных машин (МЛМ) во многом определяется совокупностью эксплуатационных потребительских качеств: производительности Т.В. Сергеева (2024) [1], J. Routa (2020) [2], G.Szewczyk, (2020) [3], S. A. Borz (2021) [4], П. В. Будник (2021) [5], P. Budnik (2020) [6], Е. Е. Клубничкин (2025) [7]; Ф. В. Свойкин и др. (2021) [8], экономичности Н. Soman (2020) [9]; A. Simon (2022) [10]; А.П. Соколов и др. (2023) [11], К. П. Рукомойников и др. (2020) [12], К. П. Рукомойников и др. (2020) [13], эксплуатационной надежности А. П. Мохирев (2022) [14], которые характеризуют их соответствие целевым лесозаготовительным условиям и технологиям применения. Существующие научные теории направлены на обоснование параметров лесозаготовительных машин, формирование из них лесозаготовительных комплексов, построение новых и адаптацию существующих технологических процессов. В них обособленно исследуются вопросы динамики и прочности конструкций машин, производительности и энергоёмкости К. Polowy (2023) [15]; С. Б. Якимович (2020) [16]; Т.И. Савиных (2021) [17], реализации эксплуатационных свойств харвестерных головок В. Hutton (2021) [18], V. Mergl (2021) [19], проходимости J. B. Heppelmann (2022) [20], [21], А.А. Егорин (2023) [22], Е. Е. Клубничкин (2023) [23], устойчивости С. П. Карпачев (2021) [24], тяговых С. А. Коростелев (2022) [25], А.В. Лавров (2022) [26] и других эксплуатационных свойств. При этом вопросы взаимосвязи МЛМ, работающих в едином комплексе, и системный анализ взаимного влияния их технических характеристик на совокупность эксплуатационных потребительских качеств в рамках существующих теорий рассмотрены мало F. Holzleitner (2022) [27], Ю.А. Ширнин (2021) [28] В. И. Прядкин (2018) [29]. Во многом это обуславливает ограниченность практического эффекта их использования.

Предлагаемая энергетическая концепция создания и применения комплексов МЛМ основывается на совместной оценке энергопотребления, длительности реализуемых технологических процессов и силового нагружения конструкций МЛМ. Концепция предполагает использование в качестве оценочного критерия эффективности – интегральной величины удельного энергетического потенциала производительности комплекса машин $УЭПП_K$ ($м^6/МДж \cdot с$), отдельно харвестера $УЭПП_Х$, или для отдельных операций – частного удельного энергетического потенциала производительности соответствующей операции ($ЧЭПП_{Оп}$). Она оценивает удельные энергетические затраты, приходящиеся на единицу долговременной производительности (с учетом эксплуатационной надежности). Это позволяет научно-обосновано выбирать параметры машин и технологии при которых достигается требуемый уровень

производительности, но при этом отсутствует несоразмерный рост энергопотребления комплекса МЛМ или снижение его эксплуатационной надежности. При необходимости достижения иных показателей, к примеру наибольшей величины производительности ($м^3/ч$), минимального энергопотребления ($МДж/м^3$), либо наибольшей эксплуатационной надежности (большой коэффициент технической готовности) – данные единичные показатели также могут быть использованы в качестве критериев оптимизации. При этом другие элементы концепции (математическая модель «эксплуатационные условия – технология – комплекс МЛМ», экспериментальные и теоретические данные и подходы к их анализу С. А. Голякевич (2024) [30] и др.) могут быть использованы и для них.

Цель работы – апробация энергетической концепции создания и применения комплексов МЛМ при учете стохастичности условий эксплуатации на примере анализа эффективности работы харвестеров.

В соответствии с целью работы поставлены и решены следующие **задачи**:

- установление закономерностей взаимосвязного изменения затрат времени, энергии и динамической нагруженности харвестеров на отдельных операциях технологических циклов;
- комплексная техническая оценка влияния параметров и технологий работы харвестеров на их эксплуатационные показатели;
- экспериментальное и теоретическое обоснование технологического процесса последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований.

Объектами исследования являлись харвестеры производства Республики Беларусь, а также технологии их применения. В качестве базовых массовых, геометрических и кинематических характеристик для последующего анализа приняты, параметры харвестера Амкодор 2551, как получившего наибольшее распространение в Республике Беларусь на рубках главного пользования, а также Vimek 404 T6 и Belarus-Sampo MLX 046 для рубок ухода.

Условиями эксплуатации харвестеров (если отдельно не указано иное) являлись сплошнолесосечные рубки главного пользования в чистом сосновом древостое I класса бонитета на лесосеке площадью 5 га, размерами 200х250 м, которая располагалась на грунтах I категории. В зависимости от этапа исследования харвестер выполнял отдельные и совмещенные операции, а также разрабатывал лесосеку с одновременным прорубанием прямолинейных технологических коридоров и, если не указано иное, производил укладку лесоматериалов в 4

группы сортировки с двух сторон от него. Параллельно харвестер формировал 2 вала порубочных остатков вдоль технологического коридора.

Предметом исследования являлись взаимосвязано изменяющиеся величины затрат времени, энергии и динамической нагруженности харвестеров, а также эффективность способов, приемов и режимов выполнения ими технологических операций.

Сбор данных для проведения анализа проводился с использованием комплексной авторской математической модели «эксплуатационные условия–технология–комплекс МЛМ», а также экспериментальных исследований, проведенных с использованием обозначенных в объекте исследования харвестеров и форвардеров в условиях филиала Белорусского государственного технологического университета «Негорельский учебно-опытный лесхоз» и ГЛХУ «Пуховичский лесхоз».

Комплексная математическая модель реализована следующим образом. Модель конструкции харвестера с учетом динамики и математическое описание технологии его работы реализованы в программном пакете Matlab 2022b путем непосредственной записи систем дифференциальных и отдельных алгебраических уравнений. Связанные с ними модели гидравлического привода и систем управления, реализованы в Matlab 2022b/Simulink/Simscape. При обработке и анализе данных о энергетических затратах, времени и динамической нагруженности конструкций и систем, полученных из математической модели, использованы программные пакеты MatLab 2022b, MathCad 15, Origin 7.5, а при получении и обработке экспериментальных данных – HBM Catman 4.5, HBM Catman AP, Parker Sensocontrol SensoWin 7.1.9.8.

По результатам сбора получены первичные данные первичные данные о продолжительности выполнения операций харвестерами на операциях

валки деревьев, обрезки сучьев, раскряжевки подсортировки и перемещения для различных вариантов технологических процессов работы. Варьируемыми параметрами являлись: размерно-энергетические характеристики харвестеров, в том числе энергетические параметры их гидросистем, способы, приемы и режимы выполнения операций.

Анализ данных. Данные, полученные экспериментально, подтвердили адекватность и точность разработанной математической модели (таблица 1).

Заметим, что операции работы манипулятора и харвестерной головки характеризуются не стационарностью протекающих процессов (быстротечные на переходных режимах). В таких процессах нельзя использовать наиболее информативные критерии оценки эквивалентности спектральных плотностей. Поэтому точность реализации математической модели подтверждена с помощью оценки расхождения теоретически и экспериментально полученных значений затрат времени и энергии ($E_{\text{теор}}$ и $T_{\text{теор}}$) на выполнение соответствующих операций по критерию по t -критерию Стьюдента. В качестве примера (таблица 1) приведены математические ожидания $M[H]$, дисперсии $D[H]$ и среднеквадратические отклонения σ_H , экспериментально полученных данных, а также теоретические значения $E_{\text{теор}}$ (Дж) и $T_{\text{теор}}$ (с). Полученные величины t - критерия Стьюдента составили от 0,79 до 2,09 для величин затрат энергии и от 1,69 до 2,07 для величин затрат времени, что для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и количестве повторений каждого экспериментального исследования равного 4 ниже процентной точкой распределения Стьюдента $t_{\alpha, n} = 2,132$. Таким образом принята гипотеза о соответствии данных моделирования полученным экспериментальным данным.

Таблица 1

Сравнение данных о энергетических и временных затратах на отдельных операциях работы харвестеров полученных путем моделирования и экспериментально

Table 1

Comparison of data on energy and time costs for individual harvester operations obtained through modeling and experimentally

Операция Operation	Положения и ход гидроцилиндров Positions and stroke of the hydraulic cylinders			Оценка затраченной энергии Estimation of energy expended					Оценка продолжительности Duration estimation				
	стре-ла Boom	руко-ять Stick	телес-коп Telesc. sect.	$E_{теор},$ кДж $E_{теор},$ kJ	$\Delta, \%$	$M[H],$ кДж $M[H],$ kJ	$D[H],$ кДж ² $D[H],$ kJ ²	$\sigma_H,$ кДж $\sigma_H,$ kJ	$T_{теор},$ с $T_{теор},$ s	$\Delta, \%$	$M[H],$ с $M[H],$ s	$D[H],$ с ² $D[H],$ s ²	$\sigma_H,$ с $\sigma_H,$ s
Перемещение деревьев сокращением гидроцилиндра рукояти манипулятора харвестера Moving trees by retracting the hydraulic cylinder of the harvester's manipulator													
объем ствола 0,6–0,7 м ³ trunk volume 0,6–0,7 м ³	0,03	0–0,54	0	43,88	-6,18	46,77	12,59	3,55	4,12	-2,6	4,23	0,0169	0,13
объем ствола 0,2–0,3 м ³ trunk volume 0,2–0,3 м ³	0,03	0–0,54	0	34,43	-3,5	35,68	9,93	3,15	3,26	-6,59	3,49	0,0576	0,24
Обрезка сучьев харвестерной головкой Delimbing with the harvester head													
объем ствола 0,6–0,7 м ³ trunk volume 0,6–0,7 м ³	не определялись were not determined			455,2	-7,53	492,3	1259,5	35,49	8,53	6,57	9,13	0,3364	0,58
объем ствола 0,2–0,3 м ³ trunk volume 0,2–0,3 м ³	не определялись were not determined			314,7	-5,46	332,9	337,46	18,37	3,61	-7,9	3,92	0,1024	0,32

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations.

Результаты

Технологические возможности харвестера, количественное соотношение между длительностью стационарных операций и операций передвижения во многом определяются характеристиками рабочего вылета его манипулятора. Собственные исследования, а также исследования других ученых показывают, что рабочий вылет часто меньше проектного кинематического. Он ограничен грузоподъемностью манипулятора, его тяговыми свойствами, устойчивостью харвестера при заданном относительном положении манипулятора и опорного контура харвестера, возможностью точного наведения головки.

При обработке дерева с объемом ствола до 0,25 м³ (рисунок 1, зона I) манипулятор (вылет 9,5 м и грузовой момент брутто 153 кН·м) обладает достаточной грузоподъемностью для его сталкивания с пня, удержания и валки. Для перемещения деревьев с большими объемами стволов по траекториям, показанным на рисунке 1 б, поз. 4, необходимо предварительно обеспечить устойчивость харвестера, путем увеличения ширины либо массы его шасси (к примеру, за счет использования съемных металлических гусениц или наполнения колес водно-солевым раствором).

При объеме ствола до 0,66 м³ (рисунок 1, зона II) грузоподъемность манипулятора достаточна для волочения дерева, но не достаточна для его

удержания на максимальном вылете без опоры кроны на землю. В зоне III (объемы стволов 0,66 м³ – 1,22 м³) волочение возможно, но только без значительного отрыва комлевой части от поверхности. При этом экспериментально установлено, что максимальный рабочий вылет манипулятора харвестера на рубках главного пользования в типичном сосновом древостое с вероятностью 0,98 не превышает 8,7 м.

Продолжительность подтаскивания дерева к месту раскряжевки зависит не только от энергетических параметров привода и объема ствола перемещаемого дерева, но и от выбранного способа перемещения. На практике реализуются следующие основные варианты последовательных и параллельных действий оператора. В первом случае (рисунок 1 б поз.1) он сталкивает дерево с пня и дожидается его полного приземления, затем последовательно втягивает телескопическое звено, сокращает вылет манипулятора стрелой и рукоятью и лишь после этого поворачивает манипулятор на заданный угол. Эффективность выполнения операции таким способом показана на рисунке 1 а поз. 1. Использование такого варианта ограничено максимальным объемом ствола 0,84 м³. Также при положении манипулятора под углом более 78° к продольной оси харвестера возникает нарушение его устойчивости по условию опрокидывания.

Значительно повысить эффективность переместительных операций позволяют способы с частичным (рисунок 1 а, поз. 2 и 3) и полным (рисунок 1 а, поз. 4) совмещением движений звеньев манипулятора. Траектории движения точки подвеса харвестерной головки для вариантов 2 и 3 различны и показаны на рисунке 1 б поз. 2 и поз. 3 соответственно. В этих вариантах оператор вытягивает

телескопическое звено непосредственно во время падения дерева, а по его окончании либо одновременно начинает сокращать вылет манипулятора и поворачивать его на заданный угол (рисунке 1 б, поз. 3), либо делает это последовательно (рисунке 1 б, поз. 2). В варианте № 4 (рисунке 1 б, поз. 4) все действия совершаются параллельно.

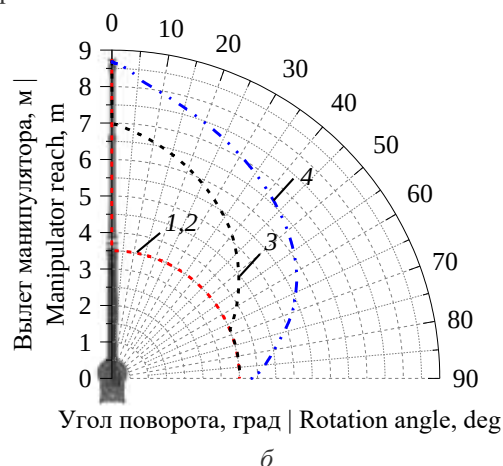
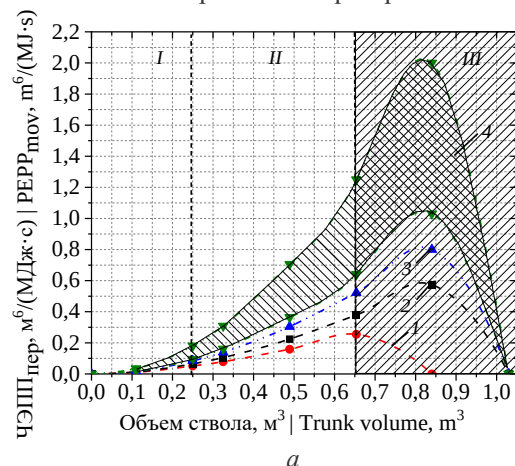


Рисунок 1. Эффективность операции перемещения дерева к месту раскряжевки (а) по различным траекториям движения (б) в зависимости от используемых приемов работы манипулятора:

1 – при последовательном падении дерева, вытягивании телескопического звена, сокращении вылета манипулятора, его повороте; 2 – при падении дерева с одновременным вытягиванием телескопического звена, а затем последовательном сокращении вылета манипулятора и его повороте; 3 – при падении дерева с одновременным вытягиванием телескопического звена, и последующем совместном сокращении вылета манипулятора и его повороте; 4 – все приемы выполняются параллельно

Figure 1. Efficiency of the tree moving operation to the bucking site (a) along different movement trajectories (b) depending on the manipulator work techniques used: 1 – sequential tree falling, retraction of the telescopic section, reduction of the manipulator reach, and its rotation; 2 – tree falling with simultaneous retraction of the telescopic section, followed by sequential reduction of the manipulator reach and its rotation; 3 – tree falling with simultaneous retraction of the telescopic section, followed by combined reduction of the manipulator reach and its rotation; 4 – all techniques performed in parallel

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Эффективность подобных совмещений при объеме перемещаемых стволов до $0,66 \text{ м}^3$ выше в 1,2 – 1,41 раза (вариант 2), в 1,54–2,05 раза (вариант 3) и в 3,22–4,9 раза (вариант 4, рисунке 1 б поз. 4 верхняя граница) в сравнении с вариантом 1. Это достигается за счет сокращения времени выполнения операции, при незначительном изменении энергозатрат. В первом варианте совокупная продолжительность валки дерева и его перемещения в заданную точку составляет 12,1–15,2 с при энергетических затратах 93,2–110,5 кДж. Для реализации варианта №2 требуется от 10,1 с до 10,9 с при энергозатратах 93,0–112,8 кДж. В варианте №3 – 6,9–7,5 с и 104,6–117,3 кДж соответственно. Для варианта с параллельным выполнением всех действий – около 3,4–3,6 с и 98,1–100,7 кДж.

Важно отметить следующую особенность варианта выполнения операции № 4. При его

использовании одновременно задействовано 3 гидравлических потребителя, имеющих разное рабочее давление. Исследования позволили выявить существенные потери энергии при реализации такого варианта совмещения в гидросистемах с общим гидравлическим насосом и управлением по давлению нагрузки. Во время выполнения операции по варианту № 4 КПД привода с таким управлением находится в широком диапазоне 0,3 – 0,86. Усредненно за всю операцию, вне зависимости от объема обрабатываемого дерева он составляет 0,51 – 0,54. Это существенно снижает энергетическую эффективность работы, что отмечено на рисунке 1 отдельной зоной. При аналогичном времени выполнения операции затраты энергии возрастают с отмеченных ранее 98,1 – 100,7 кДж на стороне исполнительных гидроцилиндров и гидромотора, до 188,2 – 191,7 кДж на гидравлическом насосе.

Описанные варианты совмещения приемов выполнения операций помимо квалификации оператора требуют соответствующих энергетических характеристик харвестера и гидравлического привода звеньев манипулятора. Изложенные выше показатели эффективности (при объеме ствола $0,66 \text{ м}^3$) достигаются при задействованных мощностях приводов гидроцилиндров телескопического звена $15,25 \text{ кВт}$ и рукояти $16,86 \text{ кВт}$. Задействованная мощность привода механизма поворота отличается в зависимости от используемого способа выполнения операции и находится в диапазоне – $7,5 - 28,5 \text{ кВт}$. Для реализации рассмотренных режимов (с учетом неравномерности загрузки приводов) общее потребление гидравлической жидкости манипулятором составляет от 94 л/мин (при варианте выполнения операций №1) и до 172 л/мин (при варианте №3). Применение варианта № 4 требует до 237 л/мин . Привод от одного гидравлического насоса и оборудовании его системой управления по нагрузке, подводимая к нему мощность изменяется от $39,2 \text{ кВт}$ до $71,6 \text{ кВт}$ для вариантов №1 – №3 и до $98,75 \text{ кВт}$ для варианта № 4 соответственно.

Изменение энергетических характеристик приводов телескопического звена, рукояти и механизма поворота по-разному влияют на эффективность переместительных операций. В качестве базовых расходов гидравлической жидкости выбраны: для гидроцилиндра телескопического звена – 65 л/мин , рукояти – 92 л/мин , для гидромотора механизма поворота – 81 л/мин (рисунок 2).

Заметно, что наибольший вклад в прирост эффективности при варианте выполнения операции №3 приносит увеличение гидравлического расхода на телескопическом звене. Сокращение времени втягивания телескопического звена напрямую влияет на продолжительность всей операции, которая снижается с $7,3 \text{ с}$ до $5,5 \text{ с}$. Важно, что при расходе свыше 117 л/мин не происходит значимого прироста эффективности. Это связано с возрастанием энергозатрат на преодоление сил инерции и малым приростом средней скорости втягивания.

Характерная особенность наблюдается при изменении гидравлического расхода в механизме поворота. При значениях выше 73 л/мин продолжительность поворота манипулятора становится меньше времени сокращения вылета гидроцилиндром рукояти, т.е. действия оканчиваются не синхронно, а приращение расхода не влияет на общую его продолжительность. При

этом совокупный расход энергии на операции возрастает от $108,6 \text{ кДж}$ (из которых $61,5 \text{ кДж}$ на сокращение вылета и поворот) при гидравлическом расходе гидромотора 73 л/мин до $121,4 \text{ кДж}$ ($74,3 \text{ кДж}$ на сокращение вылета и поворот) – при 104 л/мин . Характерное качественное изменение процесса заметно на рисунке 2 поз. 3 при расходе 81 л/мин , где поворот манипулятора заканчивается раньше сокращения вылета манипулятора рукоятью.

Эффективность рассматриваемой переместительной операции зависит не только от параметров привода, но и от массовых характеристик манипулятора и харвестерной головки. В качестве примера на рисунке 2 б рассмотрено изменение эффективности операции при снижении массы харвестерной головки (поз. 2) и манипулятора (поз. 1) при сохранении положения их центров тяжести. За базовые массовые характеристики для оценки относительного изменения эффективности приняты параметры манипулятора Kesla 1395H (масса 1900 кг) с харвестерной головкой Kesla 25RH (масса 860 кг). Относительный прирост эффективности приведен в рамках рассматриваемой операции. Совокупный прирост эффективности работы харвестера и комплекса зависит от общей структуры технологического цикла и доли времени данной операции в общей его продолжительности.

В момент контакта дерева с опорной поверхностью на подвес харвестерной головки действует ударная нагрузка со стороны комля дерева (рисунок 3, зона I). Заметно, что ударное воздействие не линейно возрастает с увеличением объема ствола дерева от $14,25 \text{ кН}$ при объеме ствола $0,11 \text{ м}^3$ до $45,57 \text{ кН}$ при объеме ствола $1,0 \text{ м}^3$. Коэффициент динамичности находится ($k_{дл.1}$) в диапазоне $1,51 - 2,57$ относительно статического удержания дерева в вертикальном положении, а относительно величины его натяга с избытком запаса усилия по массе ствола $1,25$ ($k_{дл.1,25}$) в диапазоне $1,47 - 2,28$. Это означает возможность отрыва дерева от пня с сохранением минимальной устойчивости харвестера по условию опрокидывания не гарантирует ее сохранения в момент приземления дерева. Поэтому приемы работы с сокращением вылета в процессе падения дерева являются не только способом повышения эксплуатационной эффективности, но и важной составляющей безопасной работы харвестеров. Для исключения ударных нагрузок на подвес харвестерной головки может использоваться прием с отпусканием дерева после сообщения ему требуемого направления валки.

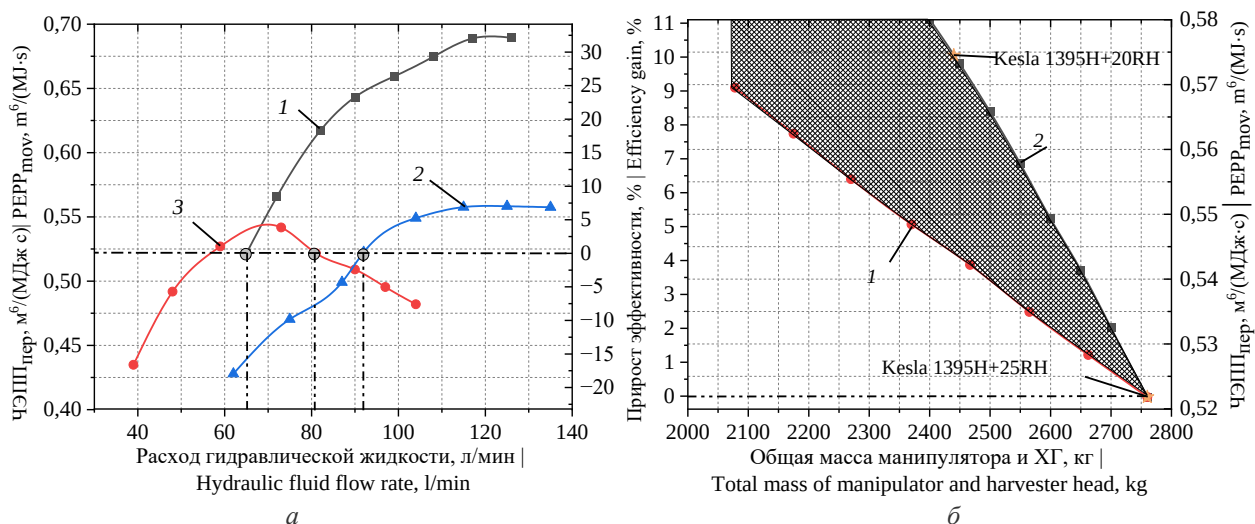


Рисунок 2. Эффективность перемещения дерева сосны (с объемом ствола $0,66 \text{ м}^3$) манипулятором от места валки (вылет манипулятора 8,7 м) к месту раскряжевки (вылет манипулятора 3,5 м)
 а – в зависимости от ограничения максимального расхода гидравлической жидкости гидроцилиндрами телескопического звена (1), рукояти (2) и гидромотором механизма поворота (3); б – при изменении общей массы манипулятора и харвестерной головки за счет массы манипулятора (1) и харвестерной головки (2)
 Figure 2. Efficiency of moving a pine tree (with a stem volume of 0.66 м^3) by the manipulator from the felling site (manipulator reach 8.7 m) to the bucking site (manipulator reach 3.5 m): а – depending on the limitation of the maximum hydraulic fluid flow rate by the hydraulic cylinders of the telescopic section (1), the stick (2), and the hydraulic motor of the rotation mechanism (3); б – when varying the total mass of the manipulator and harvester head due to the mass of the manipulator (1) and the harvester head (2).

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

Продолжительность валки деревьев с отмеченными объемами стволов составляет от 2 с до 3,8 с, с увеличением размеров их крон может возрастать до 6 с и более при зависании на кронах стоящих деревьев. Энергия на привод технологического оборудования при отсутствии движения манипулятора не потребляется. Однако падающее дерево само является источником кинетической энергии, которая имеет существенный потенциал параллельного использования или накопления (рекуперации). Примером параллельного использования энергии может служить перемещение дерева манипулятором к месту раскряжевки. Рекуперация возможна за счет использования

гидроцилиндров или гидронасосов с накоплением гидравлической энергии вытесняемой ими жидкости в гидравлических аккумуляторах или после преобразования в электрическую энергию в суперконденсаторах. Область применения рекуперированной энергии в приводах харвестеров достаточно широка. Среди наиболее перспективных – компенсация запаздывания процесса регулирования гидронасосов во время начала работы нескольких объемных гидравлических потребителей; привод малообъемных потребителей (гидроцилиндры пильных механизмов, реечные поворотные устройства манипуляторов и т. д.).

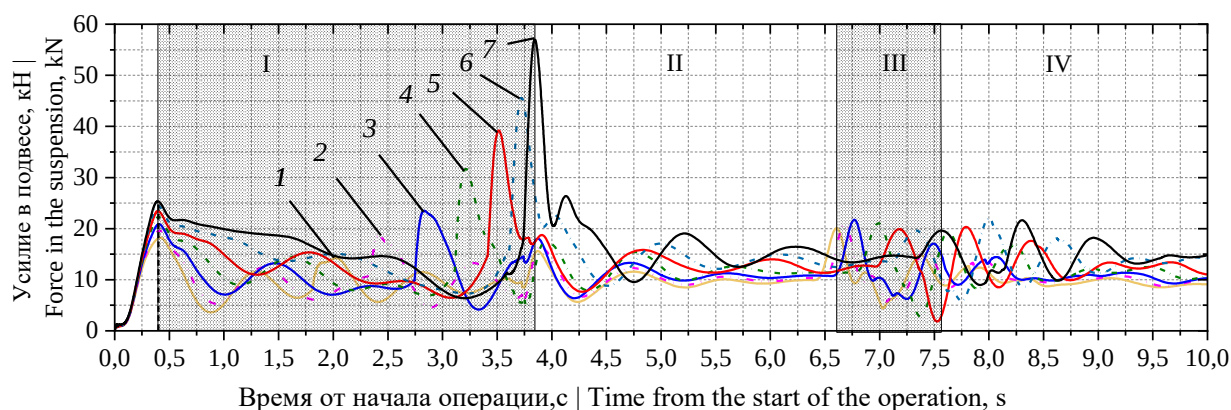


Рисунок 3. Силовое нагружение подвешной скобы харвестерной головки в процессе валки и перемещения деревьев объемом: 1 – 0,11 м³; 2 – 0,21 м³; 3 – 0,33 м³; 4 – 0,49 м³; 5 – 0,66 м³; 6 – 0,84 м³; 7 – 1,0 м³
Figure 3. Force loading on the suspension bracket of the harvester head during felling and movement trees of the following volumes: 1 – 0.11 m³; 2 – 0.21 m³; 3 – 0.33 m³; 4 – 0.49 m³; 5 – 0.66 m³; 6 – 0.84 m³; 7 – 1.0 m³

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Рациональным также следует считать использование кинетической энергии падения дерева для одновременного сокращения вылета манипулятора. Для рассматриваемого базового варианта манипулятора такой подход позволяет уменьшить время проведения совокупности операций «валка+перемещение дерева» на 1,5–3,4 с при объемах ствола 0,035–0,66 м³, при не значительном росте энергозатрат до 24,2 кДж. Прирост ЧЭПП_{ВП} относительно раздельного выполнения этих операций составляет 0,01–0,1 м⁶/МДж·с (27,9–43,5%).

Руководствуясь высокими показателями прироста ЧЭПП_{ВП} следует однозначно рекомендовать данное совмещение операций к использованию операторами. Но, для больших объемов стволов следует дополнительно оценивать величину ударного воздействия на подвес харвестерной головки при контакте кроны дерева как показано на рисунке 3.

Операция обрезки сучьев харвестером характеризуется высоким удельным потреблением гидравлической энергии (рисунок 4 а) и быстротечностью (рисунок 4 б). Обращает на себя внимание значительная разница в эффективности

проведения операции при использовании одной и той же харвестерной головки с различным приводом подающего механизма. При равном диаметре подающих валцов (0,29 м) повышение рабочего объема гидромоторов привода с 470 см³ (Rexroth 470 cc) до 565 см³ (Poclain 565 cc) при прочих равных условиях влечет за собой смещение зоны эффективной работы в сторону больших диаметров обрабатываемых стволов (рисунок 4 а).

Так, более объемные гидромоторы привода эффективнее использовать, начиная с объемов ствола свыше 0,34 м³ (для сосны). Малообъемные – повышают показатели эффективности харвестера при работе с меньшими диаметрами обрабатываемых деревьев, что объясняется способностью быстрее достигать более высоких рабочих скоростей подачи (до 5–6 м/с).

В тонкомерном древостое, при малой длительности цикла подачи (до 3,5 с) это имеет решающее значение. Однако, ввиду более низкого тягового усилия такого подающего механизма (до 18 кН) при увеличении объема ствола обрабатываемого дерева свыше 0,6 м³ время цикла обработки возрастает более чем на 30% (рисунок 4 б) в сравнении с более объемным приводом, создающим тяговое усилие до 21 кН.

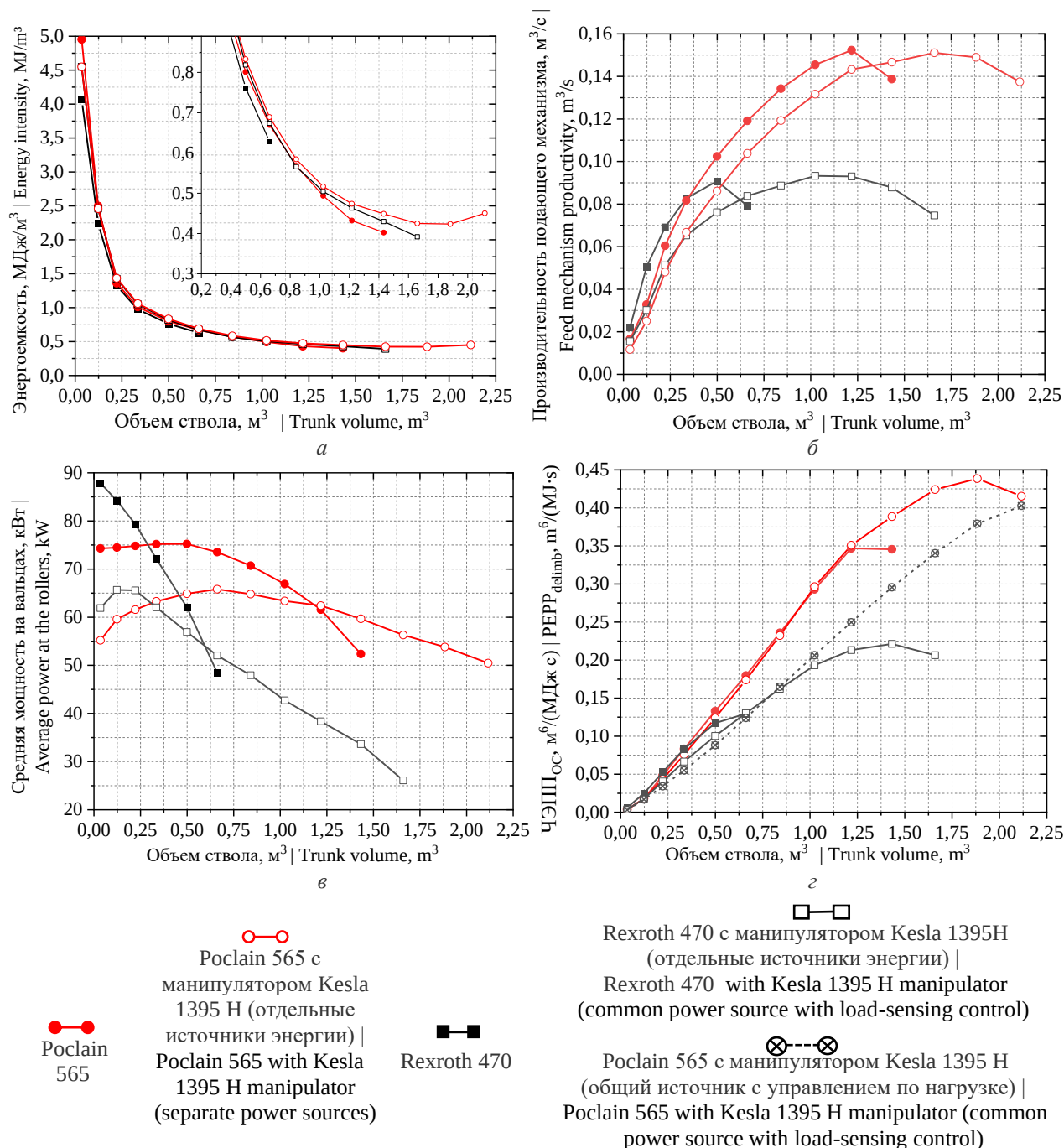


Рисунок 4. Показатели эффективности процесса обрезки сучьев харвестерной головкой, оборудованной различными гидромоторами подающих валцов, с использованием и без использования ее дополнительной подачи манипулятором:

а – энергоемкости; б – производительности; в – средней мощности, реализованной на подающем механизме; г – частного энергетического потенциала производительности (ЧЭПП_{ос})

Figure 4. Efficiency indicators of the delimbing process by a harvester head equipped with various hydraulic motors for the feed rollers, with and without the use of its additional feed by the manipulator: a – energy intensity; b – productivity; c – average power realized on the feed mechanism; d – partial energy potential of productivity (PEPP)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

За счет совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки можно существенно расширить рабочий диапазон

обрабатываемых деревьев. Для привода с рабочим объемом гидромоторов 470 см³ при дополнительной подаче манипулятором Kesla 1395 H возможно

увеличение объема обрабатываемых стволов до 1,65 м³. Во втором случае (570 см³) до 2,1 м³, однако для рассматриваемого харвестера такие возможности избыточны. При рабочем вылете 9,5 м он позволяет без потери устойчивости обрабатывать деревья сосны объемом не более 0,25 м³ или при снижении рабочего вылета до 6,2 м – не более 1,22 м³. При этом сам манипулятор позволяет подтаскивать деревья с объемом ствола до 1,22 м³ (рисунок 1) с максимального вылета 9,5 м.

Это означает, что зона совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки (с гидромоторами 570 см³) при сокращенном до 6,2 м вылете ограничена диапазонами объемов стволов сосны 0,87–1,22 м³, а для гидромоторов 470 см³ – 0,65–1,22 м³. Усилие дополнительной подачи харвестерной головки манипулятором ограничивается силой сопротивления волочению кроны дерева по поверхности и находится в диапазоне от 0,08 кН для ствола объемом 0,01 м³ до 3,39 кН для объема ствола 1,22 м³.

Большие дополнительные усилия манипулятора приводят к сонаправленному перемещению кроны и резкому снижению эффективности такого совмещения. Заметим также, что в исследованиях для подающего механизма с приводом 570 см³ прием совмещения работы манипулятора и харвестерной головки применялся только для первых лесоматериалов в стволе, а для подающего механизма 470 см³ начиная с объема ствола 1,22 м³ для первых двух лесоматериалов.

Рассмотренная возможность совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки должна обязательно учитываться в практике проектирования харвестеров. Отсутствие учета приводит к завышению энергетических характеристик привода харвестерной головки, ее собственной массы и, как следствие, грузового момента и массы манипулятора. Данные изменения конструкции приводят к снижению устойчивости харвестера против опрокидывания, снижению рабочего вылета, либо росту массы и габаритных параметров его шасси. В качестве эффективного показателя работы привода при его проектной оценке следует принимать большую из величин ЧЭПП_{ос}, полученную для вариантов обработки дерева с совмещением и без него. К примеру, для привода с гидромоторами 565 см³ при объеме ствола 1 м³ следует принимать оценку, полученную с учетом совмещения, а при 0,75 м³ – без него (рисунок 4 з).

Данные рисунка 4 справедливы для отдельного привода манипулятора и подающего механизма харвестерной головки от отдельных источников гидравлической энергии. При использовании общего источника собственное энергопотребление привода возрастает. Конечная

величина прироста зависит от способов автоматизированного управления таким приводом. В качестве примера, на рисунке 4 з дополнительно приведен график ЧЭПП_{ос} для варианта с гидромоторами 565 см³ и автоматизированным управлением гидроприводом по нагрузке, регистрируемой на каждом активном потребителе. Подобная автоматизация управления часто применяется на современных лесозаготовительных машинах. Заметно, что разница в эффективности проведения операции для отдельного и совместного привода манипулятора и харвестерной головки может достигать 23%.

Рост энергонасыщенности привода наряду с увеличением производительности операции приводит к соответствующему повышению динамической нагруженности технологического оборудования в фазах разгона и торможения дерева. Поэтому, даже при сохранении массо-размерных характеристик технологического оборудования следует обязательно оценивать соответствующие изменения нагрузок и напряженно-деформированного состояния несущих конструкций, воспринимающих их.

Так, значительные динамические нагрузки возникают в конце операции обрезки сучьев при торможении дерева подающим механизмом. Они распространяются на раму харвестерной головки, механизм ее подвеса, звенья манипулятора, их гидравлический привод, несущую конструкцию машины и т.д. Исследование процесса торможения деревьев позволило выделить 2 характерных максимума на кривых поперечного усилия в подвесе харвестерной головки (рисунок 5).

Первый, обычно также наибольший, возникает для деревьев, имеющих наибольшую кинетическую энергию к моменту торможения, обеспеченную подающим механизмом соответствующей мощности. Второй максимум обусловлен эффектом резонанса ввиду возникновения следующей последовательности событий. В начальный момент времени под действием подающего механизма харвестерная головка отклоняется от вертикального положения в направлении противоположном направлению подачи. Это происходит до тех пор, пока горизонтальное усилие в ее подвесе не станет больше величины силы сопротивления волочению кроны дерева и оно не сдвинется с места. Далее, центр тяжести дерева начинает смещаться ближе к харвестерной головке, происходит соответствующее уменьшение опорной реакции кроны и подвес харвестерной головки начнет перемещаться в исходное вертикальное положение. Торможение дерева в этот момент приводит к совпадению направлений векторов скорости харвестерной головки с деревом и скорости дерева относительно головки до момента начала торможения. Такое сочетание вызывает рост горизонтальной реакции в подвесе (рисунок 5 а).

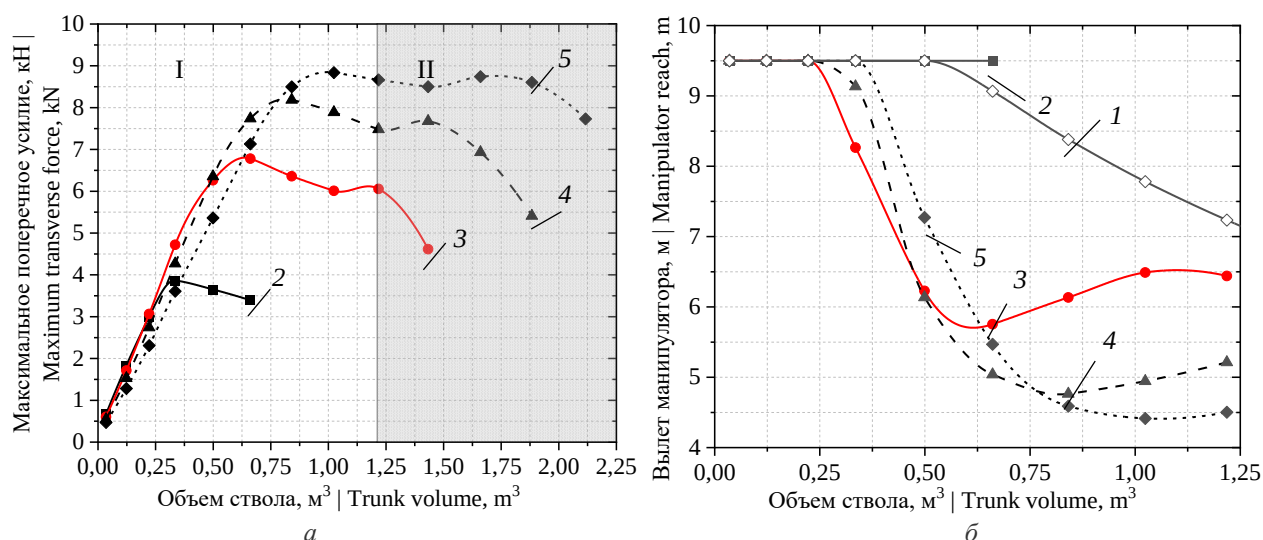


Рисунок 5. Максимальные горизонтальные реакции в подвесе харвестерной головки массой 860 кг при торможении в ней дерева с соответствующим объемом ствола при совокупной гидравлической мощности привода 90 кВт, давлении в гидросистеме до 21 МПа (а) и ограничение рабочего вылета манипулятора (б): 1 – на операции валки дерева, 2–5 – на операции обрезки сучьев при объеме гидромоторов подающих вальцов: 2 – 470 см³; 3 – 565 см³; 4 – 650 см³; 5 – 750 см³

Figure 5. Maximum horizontal reactions in the suspension of a harvester head weighing 860 kg during braking of a tree with a corresponding stem volume inside it, with a total hydraulic drive power of 90 kW and hydraulic system pressure up to 21 MPa (a), and limitation of the manipulator working reach (b): 1 – during the tree felling operation; 2–5 – during the delimbing operation with the following displacement volumes of the feed roller hydraulic motors: 2 – 470 cm³; 3 – 565 cm³; 4 – 650 cm³; 5 – 750 cm³

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Уменьшение рассмотренной нагрузки за счет более плавного торможения сложно реализуемо на практике, ввиду необходимости остановки дерева в строго установленном размере длин выпиливаемых лесоматериалов. Диапазон отклонений по длине, как правило, не превышает 0,05 – 0,07 м. При этом возможно использование ступенчатого снижения скорости подачи. Однако такой подход влияет на общую продолжительность выполнения операции, энергопотребление привода, и, соответственно, на достигаемые величины производительности и ЧЭПП_{ос}, (рисунок 4 з), что требует дополнительного анализа.

Важность учета нагрузок на операции обрезки сучьев при схематизации нагружения манипулятора харвестера обусловлена следующим. Динамические

поперечные усилия действуют на опорную платформу манипулятора лишь на операциях перемещения дерева, холостого перемещения манипулятора и обрезки сучьев. В первых двух случаях оно обусловлено величиной крутящего момента, реализуемого приводом поворотного механизма манипулятора (для рассматриваемой конструкции – до 39 кН·м), что на максимальном вылете соответствует статическому боковому усилию на подвесе харвестерной головки 4,1 кН. Однако отмеченные на рисунке 5 а величины максимальных поперечных усилий превосходят данный показатель в 1,64 раза (для гидромоторов подающих вальцов 565 см³). Поэтому вылет манипулятора, на котором производится обрезка сучьев следует ограничивать (рисунок 5 б).

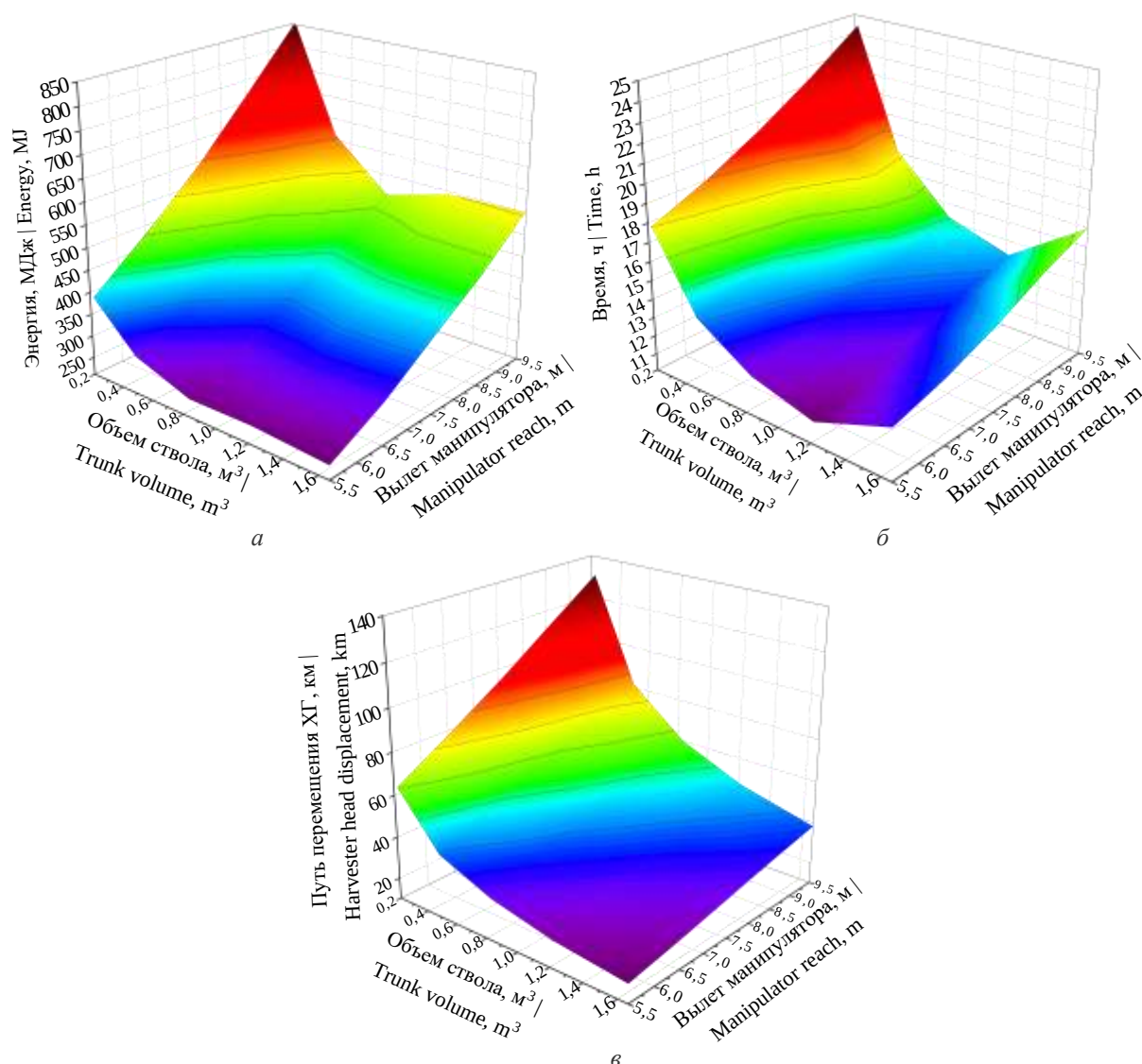


Рисунок 6. Характеристики работы манипулятора харвестера на операции перемещения им харвестерной головки на лесосеке площадью 5 га с полной соснового древостоя равной 1, вариативности его рабочих вылетов и объемов стволов деревьев:

a – энергоёмкость, МДж; *б* – затраты времени, ч; *в* – путь перемещения харвестерной головки, км

Figure 6. Performance characteristics of the harvester manipulator during the operation of moving the harvester head on a felling area of 5 ha with a pine stand fullness equal to 1, variability of its working reaches and tree stem volumes:

a – energy intensity, MJ; *b* – time consumption, h; *c* – travel distance of the harvester head, km

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Исследования показали, что энергетическая и временная структура технологического цикла харвестера существенно зависит от выбранного рабочего вылета манипулятора. С его увеличением от 5,5 м до 9,5 м нелинейно сокращается совокупное расстояние ($I_{\text{двХ}}$), которое харвестер должен преодолеть для разработки заданного участка леса (с 4,5 км до 2,6 км). Также сокращается количество требуемых технологических стоянок $n_{\text{тсХ}}$ (с 1300 до 350). Нелинейно снижаются затраты времени на переезды с 2,25 ч до 1,1 ч с и энергии для их совершения с 225 МДж до 62 МДж (для грунтов II категории). Одновременно затраты на перемещение самого

манипулятора напротив увеличиваются как показано на рисунке 6. Важно, что указанные показатели не имеют экстремумов для величины вылета манипулятора, что не позволяет однозначно выбрать его рациональное значение.

Отдельная оценка ЧЭПП_{пер} (рисунок 7 *a*) указывает на максимальную эффективность переместительных операций при минимальном вылете манипулятора. Поэтому она также не может использоваться обособленно для определения его рациональной величины. Только при совокупной оценке операций перемещения харвестерной головки и движения харвестера в целом, как процессов с

взаимозависимыми параметрами технологического процесса, удастся определить некоторый экстремум для функции ЧЭПП_{пер+движ}. Для объемов стволов объемом свыше 1,25 м он лежит в диапазоне 6,0 – 7,0 м.

Однако снижение вылета манипулятора харвестера может приводить к уменьшению концентрации круглых лесоматериалов на

технологической стоянке. Это приводит к росту количества операций форвардера. Поэтому, для увеличения эффективности работы комплекса МЛМ должно выполняться условие: прирост эффективности форвардера за счет концентрации круглых лесоматериалов должен быть больше, чем падение эффективности харвестера.

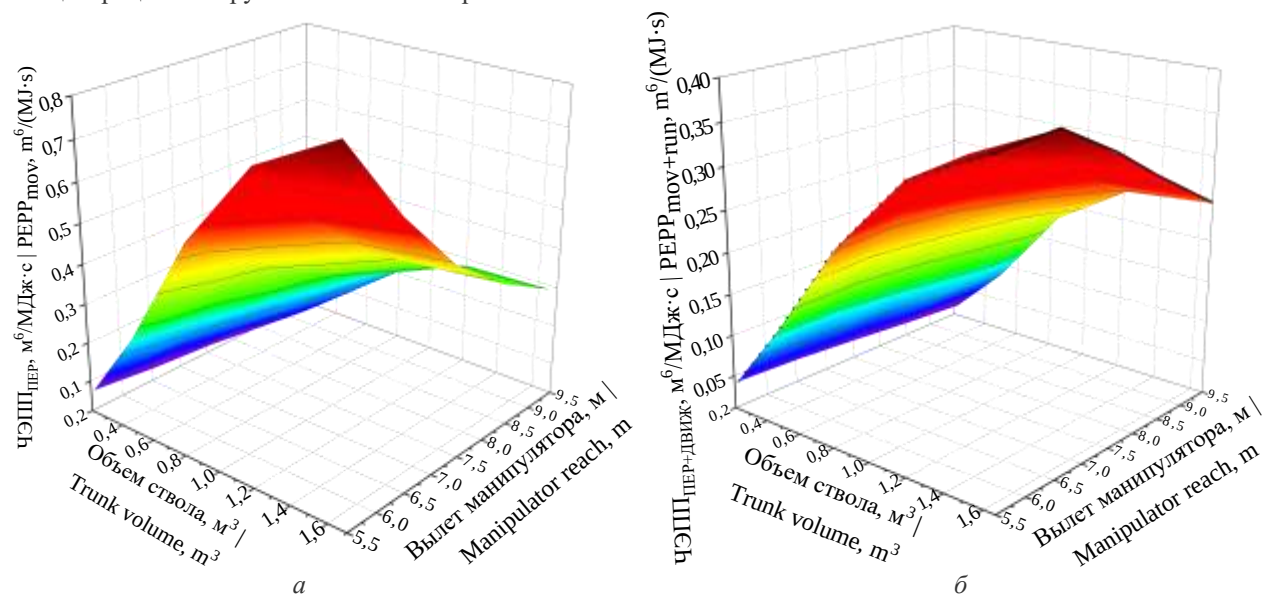


Рисунок 7. ЧЭПП_{пер} (м⁶/МДж·с) операции по перемещению харвестерной головки манипулятором (а) и показатель ЧЭПП_{пер+движ} (м⁶/МДж·с) совокупности операций перемещения харвестерной головки и движения харвестера (б) при заготовке 1 м³ круглых лесоматериалов
Figure 7. PEPP (m⁶/(MJ·s)) of the operation of moving the harvester head by the manipulator (а) and the PEPP+MOVE indicator (m⁶/(MJ·s)) for the set of operations of moving the harvester head and moving the harvester (б) when harvesting 1 m³ of round timber

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Для оценки эффективности с учетом взаимовлияния технологических операций проведено сравнение работы широко используемых в Республике Беларусь харвестеров: Vimek 404 T6 с харвестерной головкой Keto 51, Belarus-Sampo MЛХ 1046 с харвестерной головкой Kesla 18 RH и Амкодор 2551 с харвестерной головкой Kesla 25 RH II (рисунок 8).

Данные приведены для условий работы с сосной Iа класса бонитета, на грунтах II категории, равнинной местности, отсутствии подроста. При определении максимального объема ствола, обрабатываемого каждым харвестером (рисунок 8 а) учитывалась возможность совмещения работы манипулятора с харвестерной головкой на операции обрезки сучьев, а также возможность освобождения харвестерной головки от ствола во время его валки.

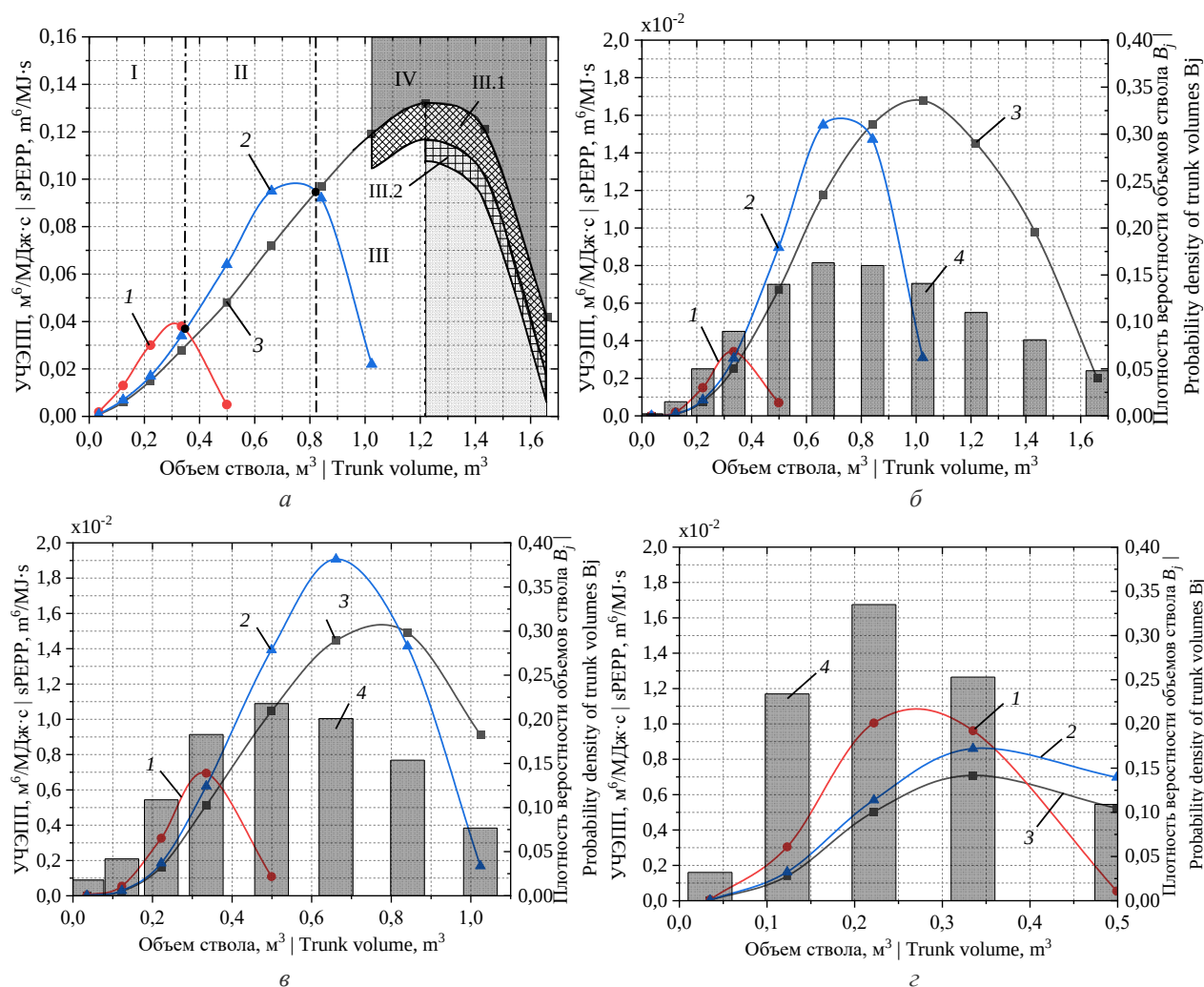


Рисунок 8. Эффективность совокупности операций технологического цикла харвестеров: движение, перемещение харвестерной головки манипулятором, обрезка сучьев и раскряжевка по показателю удельного энергетического потенциала производительности:

а – без учета распределения условий эксплуатации $B(d)$; *б–г* – вклад каждого из условий при соответствующей плотности вероятности $B(d)$ работы в них

1 – Vimek 404 T6 с харвестерной головкой Keto Forst Supreme V4; 2 – Belarus-Sampo МЛХ 046 с харвестерной головкой Kesla 18 RH; 3 – Амкодор 2551 с харвестерной головкой Kesla 25 RH II

Figure 8. Efficiency of the set of operations in the technological cycle of harvesters: movement, movement of the harvester head by the manipulator, delimbing, and bucking, according to the indicator of specific energy potential of productivity: *a* – without considering the distribution of operating conditions $B(d)$ $B(d)$;

(*b–d*) – contribution of each condition with the corresponding probability density $B(d)$ of operation under them
1 – Vimek 404 T6 with Keto Forst Supreme V4 harvester head; 2 – Belarus-Sampo MLH 046 with Kesla 18 RH harvester head; 3 – Amkodor 2551 with Kesla 25 RH II harvester head

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Заметно, что при объемах ствола до $0,82 \text{ м}^3$ харвестер Амкодор 2551 уступает в эффективности харвестеру Belarus-Sampo МЛХ 046, а при объемах ствола до $0,38 \text{ м}^3$ также харвестеру Vimek 404 Т6. К примеру, при объеме ствола $0,5 \text{ м}^3$ эксплуатация харвестера Belarus-Sampo МЛХ 046 до 33% более эффективна в сравнении с Амкодор 2551. Однако отметим, что характеристики (рисунок 8 а) даны для каждого объема ствола в отдельности.

Можно заметить (рисунок 8 б–з), что наибольший вклад в совокупную эффективность работы харвестеров вносят деревья с величинами объемов стволов, часто отличающихся от максимальных, средних, и наиболее распространенных. Так, при работе в древостое с объемами стволов до $1,66 \text{ м}^3$ наибольший вклад в эффективность харвестера Амкодор 2551 вносят деревья с объемом ствола близкими к 1 м^3 . При этом наиболее распространены на лесосеке деревья объемом ствола $0,6–0,8 \text{ м}^3$.

В соответствии с критерием УЭППХ совокупная эффективность работы харвестера в стохастических условиях определяется как сумма величин УЭППХ в каждом из них. Альтернативой обособленного использования харвестера Амкодор 2551, для условий, отмеченных на рисунке 8 б, является применение технологического процесса, в котором предварительно с деревьями объемом до $0,8 \text{ м}^3$, работает харвестер Belarus-Sampo МЛХ 046. Такая совместная работа харвестеров до 8,5% более эффективна в сравнении с обособленным использованием харвестера Амкодор 2551. Заготовка лесоматериалов в условиях, отмеченных на рисунке 8 в возможна харвестерами Belarus-Sampo МЛХ 1046 и Амкодор 2551. Эффективность их применения сопоставима. При этом совместная последовательная работа этих машин эффективнее на 14,4–16,9%.

В древостоях с объемом ствола до $0,5 \text{ м}^3$ (рисунок 8 з) применение харвестера Belarus-Sampo МЛХ 046 для сплошнолесосечных рубок на 1,7% эффективнее в сравнении с Vimek 404Т6 несмотря на то, что до объема ствола $0,35 \text{ м}^3$ выражена большая эффективность харвестера Vimek 404Т6. Совместная работа данных харвестеров до 23% более эффективна. При этом важно дополнительно учесть затраты на перебазировку машин.

Обсуждение

Задачи, поставленные в статье реализованы, а цель исследования достигнута полностью. Важным итогом является подтверждение возможности использования разработанной энергетической концепции создания и применения комплексов МЛМ для анализа эффективности работы харвестеров.

Предложенная концепция позволяет:

- комплексно учитывать технические и технологические факторы одновременно влияющие на изменение производительности, энергетических затрат и нагруженности конструкций харвестеров;
- оценивать их вклад в достигаемый уровень эффективности и выбирать более рациональные из них для достижения целевого показателя, в качестве которого предлагается использовать величину удельного энергетического потенциала производительности, являющегося количественной мерой уровня энергозатрат для обеспечения требуемой величины долговременной производительности.

Подходы, использованные в концепции универсальны, и позволяют анализировать эффективность работы не только харвестеров, но и других одно- и многооперационных лесозаготовительных машин их комплексов. На ее основе возможно построение высокоэффективных «сквозных» технологических процессов в цепи механизированных лесохозяйственных мероприятий от посадки лесных культур до проведения рубок главного пользования.

Важным аспектом реализации концепции является получение взаимосвязанных данных о рассмотренных показателях для такого технологического процесса с параллельным моделированием работы каждой машины. Данные о энергетических и временных затратах в вариативности условий и технологий также могут быть получены экспериментально. Для современных лесозаготовительных машин, приводы которых гидрофицированы, это не представляет значительной сложности. Подобные исследования уже проведены автором для комплекса машин «харвестер+форвардер», а отдельные их результаты хорошо согласуются с исследованиями Рукомойникова К. П., Свойкина Ф.В., Сюнева В.С., Селиверстова А.А., Ширнина Ю.А., Клубничкина В.Е., Попикова П. И., Драпалюка М. В., Бартенева И. М. и других ученых.

Между тем, сложность полной реализации концепции заключается в получении исходных данных о эксплуатационной надежности машин конкретного технического исполнения в различных условиях и технологиях применения. Многооперационные машины являются значительно менее массовыми, чем, к примеру, сельскохозяйственные трактора. Их объем в Республике Беларусь в структуре Министерства лесного хозяйства приближается лишь к 500 единицам разных моделей, что позволяет накопить статистически значимые выборки лишь по отдельным харвестерам (к примеру, Амкодор 2551, Vimek 404 Т6, Belarus-Sampo МЛХ 046).

Отмеченное требует дальнейшей разработки точных теоретических методов такой оценки.

Одним из важных направлений дальнейших исследований также видится исследование когнитивных возможностей операторов многооперационных лесозаготовительных машин, как одного из основных факторов, влияющих на все рассмотренные в статье показатели эксплуатационной эффективности. Представляют научный интерес исследования, направленные на развитие систем частичной автоматизации действий операторов, позволяющих выполнять операции по заранее заданному рациональному алгоритму и исключаяющие ошибки в принятии решений по управлению машинами.

Заключение

Исследованиями установлено, что равное повышение уровня производительности комплексов МЛМ за счет изменения конструкционных и энергетических параметров, технологий работы, способов, приемов и режимов выполнения операций, достигается с разной энергетической эффективностью. Их рациональность оценена с помощью интегрального технического критерия – УЭППх.

Установлены закономерности нелинейного изменения:

- затрат энергии (от 93,2 до 117,3 кДж), времени (от 3,4 с до 15,2 с) и динамической нагруженности подвесной скобы харвестерной головки (коэффициент динамичности 1,22–2,3) для различных вариантов совмещения операций валки и перемещения деревьев к месту раскряжевки;

- удельной энергоемкости и производительности операции обрезки сучьев с деревьев сосны харвестерной головкой от 2,23–2,51 МДж/м³ и 0,025–0,051 м³/с при объеме ствола 0,12 м³ до 0,42–0,47 МДж/м³ и 0,09–0,147 м³/с при объеме ствола 1,43 м³ и реализуемой мощности на подающих вальцах 26–89 кВт.

Предложен технологический процесс последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов, которая на 14,4–16,9% эффективнее в сравнении с технологией их обособленного применения в условиях лесосек, имеющих значительную стохастичность объёмов стволов (технология реализована в техническом кодексе установившейся практики ТКП 680-2024 «Технологии разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин»).

Список литературы

1. Сергеева Т. В. Производственная оценка влияния количественных характеристик состава древостоя на элементы времени цикла работы харвестера. *Инновации и технологии в лесном хозяйстве*. 2024;1: 289–293. DOI: 10.21178/160524.289. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68615716>.
2. Routa J., Nuutinen Y., Asikainen A. Productivity in Mechanizing Early Tending in Spruce Seedling Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2020;1: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.619>.
3. Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N. [et. al.]. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. *Silva Fennica*. 2020;3 (54): 10355. – DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10355>.
4. Borz S.A., Marcu M.V., Cataldo M.F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder Prototype under Conditions of Steep-Terrain Low-Access Forests. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2021;42: 16. – DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183096>.
5. Будник П.В. Синтез технико-технологических решений комплексного освоения ресурсов древесины. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук 05.21.01. 2021;45. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430194>.
6. Budnik P., Shegelman Y., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. *Central European Forestry Journal*. 2020;66: 12–22. DOI: 10.2478/forj-2019-0027.
7. Клубничкин Е. Е. Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки. *Лесной вестник/Forestry Bulletin*. 2025;1(29). 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80474162>.
8. Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А. [и др.]. Повышение производительности неспециализированной техники на лесозаготовках на базе математического анализа показателей лесосеки. *Системы. Методы. Технологии*. 2021;3(51): 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-135-142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46621685>.
9. Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. *Forestry*. 2020; 3 (93): 389–400. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz065>.
10. Simon A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(1): 22–32. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>.
11. Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю. В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин. *Лесной вестник*. 2023;2(1): 139-152. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50188359>.
12. Рукомойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т. В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020; 6: 148-158. DOI:10.37482/0536-1036-2020-6-148-158. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44411168>.
13. Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020;3: 117-127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42916019>.
14. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калига Г.А. и др. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера. *Лесной вестник*. 2022;26(5): 93-101. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49515846>.
15. Polowy K., Molińska-Glura M. Data Mining in the Analysis of Tree Harvester Performance Based on Automatically Collected Data. *Forests*. 2023; 14: 165. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010165>.
16. Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Оценка эффективности систем машин и харвестерных агрегатов для заготовки древесины по фундаментальному критерию технолога — удельной энергоёмкости. *Лесной вестник*. 2020;24(1): 59-68. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-59-68>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42736877>.
17. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47479680>.
18. Hatton B., Gagnol V., Bouzgarrou B.C., Fauroux J.-C. Modelling and simulation of a harvester head mechanism. *Mechanics & Industry*. 2017;18: 309. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2016055>.
19. Mergl V., Zemánek T., Šušnjar M., Klepárník J. Efficiency of Harvester with the Debarking Head at Logging in Spruce Stands Affected by Bark Beetle Outbreak. *Forests*. 2021;12: 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101348>.
20. Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(2): 108-118. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2044724>.

21. Sirén M., Bergkvist I., Skogforsk J., et al. Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry: Ref. Ares(2018)4460965 - 30/082018. Natural Resources Institute Finland, 2019; 23. DOI: <https://doi.org/10.3030/720712>.
22. Егорин А.А. Исследование воздействия движителей харвестеров на лесные почвогрунты с учетом возникающих динамических нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 4.3.4. С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т. 2023; 19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59958698>.
23. Клубничкин Е.Е. Моделирование колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости. Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023;1: 84-96. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84.
24. Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера. Лесной вестник. 2021;25(1): 123-129. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-123-129>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44711896>.
25. Коростелев С.А., Горбачев А.В., Клубничкин В.Е. Исследование тяговых характеристик колесных лесохозяйственных машин. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022;184: 77-88. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-184-009>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50208185>.
26. Лавров А.В., Воронин В.А., Сидоров М.В., Пехальский И.А. Тяговый расчет модульного энерготехнологического средства с учетом кинематического несоответствия привода ведущих осей. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(2):30-36. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48729864>.
27. Holzleitner F. Integrated in-stand debarking with a harvester in cut-to-length operations – processing and extraction performance assessment / Franz Holzleitner, Christian Kanzian // International journal of forest engineering. – 2022. – Vol. 33, № 1. – P. 66–79. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.2013049>.
28. Ширнин Ю.А., Гайсин И.Г., Рыганова С.Г., Гатауллин А.Р. Сравнение и выбор вариантов выполнения элементов технологических операций при работе системы машин «харвестер+форвардер». Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021;2(50):42-51. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.2.42>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46262589>.
29. Прядкин В.И., Бартенев И.М. Эколого-экономическая оценка применения сортиментной технологии заготовки древесины на рубках ухода. Лесотехнический журнал. 2018;8(4): 250-259. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a323ff0ed79.44618896. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36574564>.
30. Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Коробкин В.А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. Труды БГТУ. 2024;1(276): 125-131. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-17>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60046817>.

References

1. Sergeeva T. V. Proizvodstvennaya otsenka vliyaniya kolichestvennykh kharakteristik sostava drevostoya na elementy vremeni tsikla raboty kharvestera. [Production assessment of the influence of stand composition quantitative characteristics on the harvester cycle time elements]. Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve=Innovations and Technologies in Forestry. 2024;1: 289-293. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/160524.289>.
2. Routa J., Nuutinen Y., Asikainen A. Productivity in Mechanizing Early Tending in Spruce Seedling Stands. Croatian Journal of Forest Engineering. 2020;1: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.619>.
3. Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., et al. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. Silva Fennica. 2020;54(3):10355. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10355>.
4. Borz S.A., Marcu M.V., Cataldo M.F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder Prototype under Conditions of Steep-Terrain Low-Access Forests. Croatian Journal of Forest Engineering. 2021; 42:16. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183096>.
5. Budnik P. V. Sintez tekhniko-tehnologicheskikh resheniy kompleksnogo osvoeniya resursov drevesiny. [Synthesis of technical and technological solutions for integrated development of wood resources]. Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. 2021;45. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430194>.
6. Budnik P., Shegelman Y., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. Central European Forestry Journal. 2020;66: 12-22. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0027>.
7. Klubnichkin E. E. Metod povysheniya energoeffektivnosti pogruzochno-transportnykh mashin dlya sortimentnoy zagotovki. [Method for improving energy efficiency of loading and transport machines for cut-to-length harvesting]. Lesnoy vestnik=Forestry Bulletin. 2025;1:112-125. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-112-125>.
8. Svoikin F. V., Svoikin V. F., Sokolova V. A., et al. Povyshenie proizvoditel'nosti nespetsializirovannoy tekhniki na lesozagotovkakh na baze matematicheskogo analiza pokazateley lesoseki. [Increasing productivity of non-specialized equipment

in logging based on mathematical analysis of cutting area indicators]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2021;3: 135-142. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-135-142>.

9. Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. *Forestry*. 2020;93(3):389-400. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz065>

10. Simon A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(1):22-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>.

11. Sokolov A. P., Seliverstov A. A., Sukhanov Yu. V., Sen'kin V. A. O vliyani chastichnoy avtomatizatsii upravleniya manipulyatorami na ergonomicheskie pokazateli lesozagotovitel'nykh mashin. [On the influence of partial automation of manipulator control on ergonomic indicators of logging machines]. *Lesnoy vestnik*= Forest Bulletin. 2023;2:139-152. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>.

12. Rukomoynikov K. P., Kuptsova V. O., Sergeeva T. V. Matematicheskaya model' raskhoda topliva forwardera «Amkodori-2682» pri vypolnenii lesokhozyaystvennykh rabot. [Mathematical model of fuel consumption of forwarder "Amkodori-2682" during forestry works]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*= Forestry Journal. 2020;6:148-158. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-148-158>.

13. Rukomoynikov K. P., Kuptsova V. O. Obosnovanie norm raskhoda topliva mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin na primere kharvestera. [Substantiation of fuel consumption rates for multi-operation logging machines using the example of a harvester]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*= Forestry Journal. 2020;3:117-127. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-117-127>.

14. Mokhiev A. P., Kunitskaya O. A., Kalita G. A., et al. Otsenka nadezhnosti lesozagotovitel'nogo kharvestera. [Reliability assessment of a logging harvester]. *Lesnoy vestnik*= Forest Bulletin. 2022;5:93-101. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>.

15. Polowy K., Molińska-Glura M. Data Mining in the Analysis of Tree Harvester Performance Based on Automatically Collected Data. *Forests*. 2023;14:165. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010165>.

16. Yakimovich S. B., Efimov Yu. V. Otsenka effektivnosti sistem mashin i kharvesternykh agregatov dlya zagotovki drevesiny po fundamental'nomu kriteriyu tekhnologa — udel'noy energoemkosti. [Evaluation of the efficiency of machine systems and harvester units for timber harvesting according to the fundamental criterion of technologist — specific energy intensity]. *Lesnoy vestnik*. 2020;1:59-68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-59-68>.

17. 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 timber harvesting methods by harvester based on productivity and specific energy intensity]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*= Forests of Russia and Their Management. 2021;4(79):69-74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2021.95.37.006>.

18. Hatton B., Gagnol V., Bouzgarrou B.C., Fauroux J.-C. Modelling and simulation of a harvester head mechanism. *Mechanics & Industry*. 2017;18:309. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2016055>.

19. Mergl V., Zemánek T., Šušnjar M., Klepárník J. Efficiency of Harvester with the Debarking Head at Logging in Spruce Stands Affected by Bark Beetle Outbreak. *Forests*. 2021;12:1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101348>.

20. Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(2):108-118. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2044724>.

21. Sirén M., Bergkvist I., Skogforsk J., et al. Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry. *Natural Resources Institute Finland*, 2019; 23. DOI: <https://doi.org/10.3030/720712>.

22. Egorin A. A. Issledovanie vozdeystviya dvizhiteley kharvesterov na lesnye pochvogruntu s uchedom voznikayushchikh dinamicheskikh nagruzok. [Study of the impact of harvester propellers on forest soils taking into account emerging dynamic loads]. *Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk*. 2023; 19. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59958698>.

23. Klubnichkin E. E. Modelirovanie kolesnykh transportnykh sredstv, osnashchennykh sredstvami povysheniya prokhodimosti. [Modeling of wheeled vehicles equipped with means of increasing cross-country ability]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*= Proceedings of NGTU R.E. Alekseev. 2023;1: 84-96. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84.

24. Karpachev S. P., Bykovskiy M. A., Laptev A. V. Metodika vybora manipulyatora kharvestera. [Method for selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik*. 2021;1: 123-129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-123-129>.

25. Korostelev S. A., Gorbachev A. V., Klubnichkin V. E. Issledovanie tyagovykh kharakteristik kolesnykh lesokhozyaystvennykh mashin. [Study of traction characteristics of wheeled forestry machines]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2022;184: 77-88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-184-009>.

26. Lavrov A. V., Voronin V. A., Sidorov M. V., Pekhal'skiy I. A. Tyagovyy raschet modul'nogo energotekhnologicheskogo sredstva s uchetom kinematicheskogo nesootvetstviya privoda vedushchikh osey. [Traction calculation of a modular energy-technological means taking into account kinematic mismatch of the drive of driving axles]. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii= Agricultural Machines and Technologies. 2022;16(2): 30-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36>.

27. Holzleitner F., Kanzian C. Integrated in-stand debarking with a harvester in cut-to-length operations – processing and extraction performance assessment. International Journal of Forest Engineering. 2022;33(1):66-79. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.2013049>.

28. Shirnin Yu. A., Gaysin I. G., Ryganova S. G., Gataullin A. R. Sravnenie i vybor variantov vypolneniya elementov tekhnologicheskikh operatsiy pri rabote sistemy mashin «kharvester+forwarder». [Comparison and selection of options for performing elements of technological operations when operating a machine system "harvester+forwarder"]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta=Bulletin of the Volga State Technological University. 2021;50(2): 42-51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.2.42>.

29. Pryadkin V. I., Bartenev I. M. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka primeneniya sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny na rubkakh ukhoda. [Ecological and economic assessment of the use of cut-to-length technology in thinning]. Lesotekhnicheskii zhurnal= Forestry Engineering Journal. 2018;8(4): 250-259. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a323ff0ed79.44618896.

30. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R., Korobkin V. A. Metodika prognozirovaniya effektivnosti kompleksov lesozagotovitel'nykh mashin. [Method for predicting the efficiency of logging machine complexes]. Trudy BGTU=Proceedings of BSTU. 2024;276(1): 125-131. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-17>.

Сведения об авторах

✉ Голякевич Сергей Александрович – кандидат, техн. наук, доцент, доцент кафедры лесных машин дорог и технологий лесопромышленного производства Белорусского государственного технологического университета, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5095-8725>, e-mail: gsa@belstu.by.

Information about the authors

✉ Sergey A. Golyakevich – PhD. Engineering, senior lecturer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, Republic of Belarus, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5095-8725>, e-mail: gsa@belstu.by.

✉ Для контактов / Corresponding author