

Краткое сообщение

УДК 630*306

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-201-212

Эффективность автоматизации систем управления харвестеров

А.В. Кузнецов¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-5802-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-8729>

О.Н. Галактионов¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-5888-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

А.А. Селиверстов¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-2022>

А.А. Гайда², мастер лесозаготовок; ResearcherID: [NLO-5970-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2455-3906>

¹Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия;
kuzalex@psu.karelia.ru, ong66@mail.ru[✉], saa.pk@onego.ru

²АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство», г. Кондопога, Россия;
Office@klpkh.com

Поступила в редакцию 16.06.25 / Одобрена после рецензирования 11.09.25 / Принята к печати 14.09.25

Аннотация. В связи с санкционными ограничениями предприятия лесопромышленной отрасли столкнулись с рядом проблем, одной из которых является необходимость обновления и ремонта парка лесозаготовительной техники. Ведущие зарубежные производители лесозаготовительной техники постоянно совершенствуют свою продукцию, внедряя инновационные технологии. Одним из таких решений является использование на лесных машинах системы частичной автоматизации управления гидроманипулятором IBC (Intelligent Boom Control). Исходя из этого, возникла необходимость оценки работы лесозаготовительных машин с учетом новых технических условий (внедрения инновационных систем управления гидроманипулятором), в т. ч. в сравнении с альтернативными лесозаготовительными машинами. Цель исследования – анализ эффективности колесных и гусеничных харвестеров с учетом влияния современных систем управления гидроманипулятором. Задачи: 1. Формирование базы данных и оценка фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой IBC. 2. Построение статистической модели посредством регрессионных зависимостей, описывающей эффективность харвестеров в исследуемых природно-производственных условиях. 3. Обоснование выводов и выработка рекомендаций по применению колесных и гусеничных харвестеров. Проведена сравнительная оценка фактических показателей работы трех исследуемых харвестеров. Анализ показал преимущество по дневной выработке харвестера John Deere 1270G 8WD с системой IBC в сравнении с модификацией John Deere 1270G 6WD (в 1,32 раза) и харвестером на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F (в 1,54 раза). Для прогнозирования изменения дневной выработки в исследуемых природно-производственных условиях разработана регрессионная модель. Результаты оценки коррелируют с другими исследованиями и служат подтверждением постоянного роста эффективности лесозаготовительных машин при внедрении инновационных технологий. Необходимо учитывать, что усложнение системы управления манипулятором вызывает повышение стоимости техники и ее эксплуатации.



Ключевые слова: харвестер, лесозаготовительная техника, лесозаготовительная машина, эффективность харвестера, дневная выработка, производительность харвестера, автоматизация управления, система автоматизации управления, система интеллектуального управления, гидроманипулятор

Благодарности: Авторы выражают благодарность представителям и руководству компании АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство» за поддержку и предоставленную информацию.

Для цитирования: Кузнецов А.В., Галактионов О.Н., Селиверстов А.А., Гайда А.А. Эффективность автоматизации систем управления харвестеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 201–212. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-201-212>

Brief report

The Effectiveness of Automation in Harvester Control Systems

*Aleksei V. Kuznetsov*¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-5802-2016](https://orcid.org/0000-0003-3266-8729), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-8729>

*Oleg N. Galaktionov*¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAE-5888-2020](https://orcid.org/0000-0003-0768-3628), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

*Aleksander A. Seliverstov*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-2022>

*Aleksander A. Gaida*², Forest Engineer; ResearcherID: [NLO-5970-2025](https://orcid.org/0009-0009-2455-3906), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2455-3906>

¹Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia; kuzalex@psu.karelia.ru, ong66@mail.ru, saa.pk@onego.ru

²АО Kondopoga Timber Industry Enterprise, Kondopoga, Russia; Office@klpkh.com

Received on June 16, 2025 / Approved after reviewing on September 11, 2025 / Accepted on September 14, 2025

Abstract. Due to sanctions, forestry enterprises have faced a number of challenges. The need to upgrade and repair logging equipment is among them. Leading international logging equipment manufacturers are constantly improving their equipment by implementing innovative technologies. The use of the Intelligent Boom Control (IBC) system for partially automated hydraulic manipulator control on forestry machines is one of the solutions. Therefore, it became necessary to evaluate the performance of logging machines with regard to new technical specifications (implementation of innovative hydraulic manipulator control systems), particularly in comparison with alternative logging machines. The research aims to analyze the performance of wheeled and tracked harvesters, considering the impact of modern hydraulic manipulator control systems. Objectives: 1. Creating a database and evaluate the actual performance metrics of harvesters based on the Sany SY245F excavator, the John Deere 1270G 6WD harvester, and the John Deere 1270G 8WD harvester equipped with the IBC system. 2. Developing a statistical model using regression analysis to describe the performance of harvesters under the studied natural and operating conditions. 3. Justifying the conclusions and drawing up recommendations on the use of wheeled and tracked harvesters. We have carried out a comparative assessment of the actual performance metrics of the studied harvesters. The analysis showed that the John Deere 1270G 8WD harvester with the IBC system had a higher daily output compared to the John Deere 1270G 6WD

model (1.32 times higher) and the harvester based on the Sany SY245F crawler excavator (1.54 times higher). A regression model has been developed to predict changes in daily power generation under the studied natural and operating conditions. The assessment results are consistent with other studies and confirm the steady improvement in the efficiency of logging machines with the adoption of innovative technologies. However, it should be considered that the increased complexity of the manipulator control system leads to higher equipment costs and operating expenses.

Keywords: harvester, logging equipment, logging vehicle, harvester efficiency, daily output, harvester productivity, control automation, control automation system, intelligent control system, hydraulic manipulator

Acknowledgments: We sincerely appreciate the support and information provided by the representatives and management of AO Kondopoga Timber Industry Enterprise.

For citation: Kuznetsov A.V., Galaktionov O.N., Seliverstov A.A., Gaida A.A. The Effectiveness of Automation in Harvester Control Systems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 201–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-201-212>

Введение

Лесопромышленный комплекс имеет важное значение для развития экономики России. В связи с санкционными ограничениями предприятия отрасли столкнулись со многими проблемами, одной из которых является обновление и ремонт парка лесозаготовительной техники.

В настоящее время на рынке широко представлена продукция белорусской компании «Амкордор» [12, 16], а также китайские харвестеры на базе гусеничных экскаваторов, появляется информация об испытаниях и опытном производстве колесных лесозаготовительных машин китайского производства [11], существует обширный рынок поддержанной техники зарубежного изготовления различных брендов. В ограниченных объемах выпускается гусеничная отечественная лесная техника, при этом стоит отметить попытки разработки и внедрения отечественной колесной лесозаготовительной техники на базе зарубежных комплектующих [6, 14, 15].

В условиях ограниченного выбора лесной техники интерес представляют китайские лесозаготовительные машины: гусеничные харвестеры на базе экскаваторов и колесная лесная техника [11]. Анализ работы гусеничных китайских харвестеров на базе экскаваторов, на примере Sany SY245F с харвестерной головкой Waratah H480C, показал их достаточную эффективность в сравнении с лесозаготовительными машинами альтернативных брендов. В то же время, несмотря на относительно небольшую стоимость и универсальность подобных машин, особенности их эксплуатации ограничивают возможность продвижения этих машин на нашем рынке.

Как отмечалось выше, в настоящее время существует возможность приобретения поддержанной зарубежной лесозаготовительной техники таких брендов, как например John Deere. При этом стоимость таких лесных машин с учетом сопутствующих сборов значительно превышает стоимость новой техники китайского и белорусского производства. Однако крупные лесозаготовительные компании склоняются к приобретению подобной техники, высоко оценивая ее надежность и производительность.

Таким образом, в настоящее время все шире распространяются лесозаготовительные машины нового поколения, оснащенные системами интеллектуального управления, которые позволяют существенно повысить уровень автоматизации выполняемых технологических операций [27]. Происходит уточнение характеристик работы систем автоматизации лесозаготовительных машин и влияния на них навыков оператора машины. В условиях активного внедрения систем помощи оператору становится важной подготовка специалистов, поддерживающих работу средств интеллектуализации лесозаготовительного процесса. Однако у специалистов компаний, эксплуатирующих подобную технику, нет полного понимания уровня воздействия таких систем на эффективность осуществления производственных процессов. Исследование эффективности работы лесосечных машин с системой интеллектуального управления будет способствовать расширению знаний о возможностях техники, оснащенной такими системами.

Объекты и методы исследования

Ведущие зарубежные производители лесозаготовительной техники (John Deere, Ponsse и т. д.) постоянно совершенствуют свою технику, внедряя инновационные технологии [9, 12]. Примером здесь может являться использование на лесных машинах системы частичной автоматизации управления гидроманипулятором IBC (Intelligent Boom Control) [13].

Развитие многофункциональных систем управления и измерения лесозаготовительных машин способствует улучшению управляемости, повышению эффективности работы и предоставляет новые возможности мониторинга функционирования машины и состояния самой системы [26]. К таким системам управления относятся TimberMatic, IBC, Ponsse Opti Control, Ponsse Active Crane, MaxiXT и др.

Система автоматизации управления лесозаготовительными машинами IBC компании John Deere Forestry применяется для автоматизации управления манипуляторами харвестеров и форвардеров. Появление системы IBC связано с необходимостью повышения точности управления и обеспечения плавности движения звеньев манипулятора – стрелы, рукояти и телескопического удлинителя.

Управление гидроманипулятором традиционно реализуется за счет последовательного изменения состояний гидроцилиндров стрелы, рукояти и телескопического удлинителя для наведения рабочего органа на дерево, обеспечивая при этом необходимое быстродействие и оптимальное пространственное расположение элементов манипулятора.

Особенностью системы IBC является одновременная работа приводов элементов манипулятора при однонаправленном воздействии на джойстик. В частности, при перемещении левого джойстика вперед или назад выполняется совместное одномоментное управление приводом стрелы, рукояти и телескопического удлинителя, что влечет к прямолинейному перемещению рабочего органа относительно земли. При этом оператор может настраивать общую скорость работы манипулятора, а включение и выключение системы IBC осуществлять нажатием одной клавиши. Наличие дополнительного электрического демпфирования в конце хода цилиндров гидроманипулятора способствует снижению нагрузки на его конструкцию, за счет чего манипулятор работает плавно и без ударов.

Проанализировав работу параллельных манипуляторов, компания Ponsse предложила телескопические варианты конструкций, отличающиеся высокой кинематической точностью и компактностью (короткой поворотной колонной и выдвижной телескопической стрелой). Система управления Ponsse также реализует совместное действие приводов колонны и телескопической стрелы при активации функции «управление телескопом и движением колонны». При включении этой функции автоматически выполняются выдвижение и складывание телескопического удлинителя стрелы и наклон колонны. За счет этого агрегируемая харвестерная головка надвигается на дерево по кратчайшей траектории. При отключении функции (при ручном управлении) потребуется воздействие на 2 джойстика, которые отвечают за работу колонны и стрелы, а также поднятие рычага вверх на левом джойстике для осуществления подачи телескопической стрелы. Внедрение подобных систем открывает перспективы для дальнейшей автоматизации лесозаготовительных машин.

В исследования по автоматизации лесозаготовительных машин с применением систем интеллектуального управления внесли вклад отечественные и зарубежные научные коллективы и фирмы-производители многооперационных машин, например John Deere Forestry, Ponsse Oyj, Palfinger AG и т. д. Изысканиями в данной области занимались J. Manner, A. Mörk, M. Englund, A. Visala, P. Forsman, A. Shiriaev, P. Forsman и др. [2, 19, 22, 23].

Специалистами и учеными рассматриваются вопросы автоматизации технологических операций, выполняемых с помощью манипулятора, с применением интеллектуальных систем управления и их влияние на производительность лесных машин. В частности, по данным исследования [2], использование системы IBC для автоматизации управления манипуляторами форвардеров John Deere 1510E и John Deere 1910G, работающих под управлением опытных операторов, приводит к снижению затрат времени для операций погрузки и разгрузки на 5,2 и 7,9 % соответственно. Затраты времени на работу манипулятора зависят и от скорости его работы, которую оператор может задавать в пользовательском интерфейсе системы управления машиной. В работе [28] отмечается, что пространственное расположение лесоматериалов оказывает влияние на составляющие затрат времени на выполнение отдельных операций форвардера, при этом, как отмечают исследователи [4, 5, 17], обязательно учитывать природные и производственные условия.

При изучении эффективности систем автоматизации лесозаготовительных машин в первую очередь обращается внимание на влияние таких систем на экономические показатели производства [3]. Однако в реальности системы автоматизации лесозаготовительных машин оказывают действие не только на экономическую эффективность производства, но и на другие аспекты выполнения производственных процессов [4, 28]. В частности, следует обратить внимание на психофизиологические условия работы операторов [24].

В работе [29] установлено, что использование системы IBC на форвардерах дает ощутимый эффект только для неопытных операторов или с минимальным обучением. Отмечен рост производительности более чем на 25 % в начале работы операторов. Рост происходит за счет увеличения совмещенных движений манипулятора и траектории движения концевой части манипулятора. Непосредственный экономический эффект обусловлен снижением количества поврежденных машины более чем на 50 %. При этом опытные операторы показали меньшие

результаты – логика управления работой гидроманипулятора противоречила навыкам данных операторов. Наиболее важным фактором эффективности работы является не способ управления гидроманипулятором, а опыт оператора.

Исследование [22] подтверждает выводы о необходимости обучения операторов. Кроме того, отмечается увеличение скорости перемещения концевой части манипулятора и снижение высоты его перемещения, что говорит об удобстве использования системы IBC на форвардерах, а также ведет к снижению времени на вынос и возврат манипулятора к кузову.

Применение нескольких технологий управления дает дополнительный эффект [21]. Выяснилось, что продолжительность технологического цикла снизилась при одновременном использовании системы IBC и системы выравнивания кабины на 14 %, при этом использование только системы выравнивания кабины почти не дает эффекта.

В работе [23] указывается на уменьшение продолжительности технологического цикла при заготовке сдвоенных и многовершинных деревьев при использовании харвестеров, оснащенных системой IBC.

В отчете [18] описана работа 2 комплексов на базе харвестеров, при этом один из них оснащен системой IBC. Производительность харвестера с системой IBC составила 26,63 м³/га, а без нее – 22,17 м³/га, при этом харвестер с IBC был задействован на рубках прореживания, а харвестер без IBC – на сплошных рубках. Указанные результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности названной системы.

В обзоре [25] применение средств автоматизации, схожих с системой IBC, необходимо рассматривать не только как способ повышения производительности, но и путь к роботизации лесозаготовительных машин и процесса в целом.

В исследовании [20] также показано ускорение работ при сборе и выгрузке сортиментов форвардером при включенной системе IBC, которое составило от 3,5 до 14,4 % в контролируемых условиях и от 17,7 до 21,7 % – в естественных. Разница в производительности обусловлена навыками операторов, при этом выводов аналогичных [29] не отмечено.

Таким образом, цель исследования сформулируем следующим образом: провести анализ эффективности колесных и гусеничных харвестеров с учетом влияния современных систем управления гидроманипулятором. Для этого необходимо решить следующие задачи: 1. Формирование базы данных и оценка фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой IBC. 2. Построение статистической модели посредством регрессионных зависимостей, описывающей эффективность харвестеров в исследуемых природно-производственных условиях. 3. Обоснование выводов и выработка рекомендаций по применению колесных и гусеничных харвестеров.

Проведена сравнительная оценка работы харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера на базе экскаватора Sany SY245F. Год выпуска харвестера John Deere – 2018, двигатель – John Deere Power Tech 6090 мощностью 190 кВт, гидроманипулятор – CN7, максимальный вылет – 9,8 м. Год выпуска второго из рассматриваемых харвестеров – 2022, двигатель – Isuzu-CC-6BG1 мощностью 128,5 кВт при 2100 об./мин, максимальный вылет манипулятора – 8,85 м. Харвестерная головка в обоих случаях – Waratah H480C [10]. Харве-

стер John Deere 1270G 6WD оснащен традиционной системой управления без автоматизации Conventional Boom Control (CBC).

Анализ полученных данных (табл. 1) показал, что средняя дневная выработка ($H_{\text{выр}}$, м³/чел. · день) Sany SY245F меньше в 1,126 раза по сравнению с харвестером John Deere 1270G 6WD (при разнице объемов ствола в 1,037 раза), при этом расход топлива (q , л/день) у него больше в 1,46–2,00 раза.

Таблица 1

Средние показатели работы харвестеров по результатам исследования [8]
Average harvester performance metrics based on the research findings [8]

Харвестер	$H_{\text{выр}}$	T	$V_{\text{хл}}$
John Deere 1270G 6WD	233,17	15,20	0,27
Sany SY245F	207,67	15,48	0,28

Примечание: T – среднее эффективное время работы в день, ч; $V_{\text{хл}}$ – средний объем ствола, м³.

В связи с появлением на лесозаготовках харвестеров, оснащенных системой IBC, возникла необходимость оценки их работы с учетом новых технических условий, в т. ч. в сравнении с альтернативными лесозаготовительными машинами. Проведен анализ фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD (год выпуска – 2023, двигатель и гидроманипулятор – аналогичные John Deere 1270G 6WD, максимальный вылет – 10 м, система управления манипулятором – IBC). Необходимые фактические данные для расчета и анализа производительности машин были предоставлены специалистами АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство» [1, 7].

Природно-производственные условия исследования: Республика Карелия, Кондопожское центральное лесничество, Сандальское участковое лесничество, урочище Сандальское, делянки (лесосеки) № 5 и 27. На территории выполнена сплошная рубка спелых и перестойных насаждений. Средний объем ствола составил: John Deere 1270G 6WD – 0,20 м³; John Deere 1270G 8WD – 0,29 м³; Sany SY245F – 0,24 м³.

Породный состав лесных насаждений на лесосеке № 5 – 6ЕЗБ1Ос+Е+С+Ос, полнота – 0,65, средний запас древесины – 194 м³/га, тип леса – черничник, бонитет – III, класс возраста – VI–VII. Для лесосеки № 27 породный состав лесных насаждений следующий: 5Е4Б1Ос+С+Е+Б+Ос. Полнота – 0,56, средний запас древесины – 180 м³/га, встречающиеся типы леса – черничник, черничники долгомошный и кисличный, бонитет – III–IV, класс возраста – VI–VII.

Средние показатели работы харвестеров представлены в табл. 2.

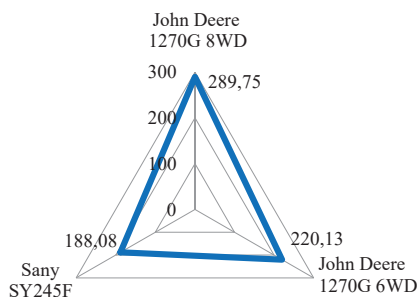
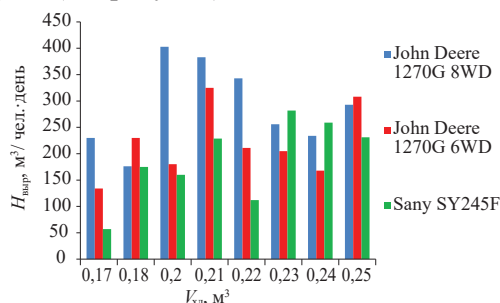
Таблица 2

Средние показатели работы харвестеров
(Кондопожское центральное лесничество)
Average performance metrics for harvesters (Kondopoga central forest district)

Харвестер	$H_{\text{выр}}$	T	$V_{\text{хл}}$
John Deere 1270G 6WD	152,27	8,70	0,20
John Deere 1270G 8WD	319,62	14,57	0,29
Sany SY245F	177,56	12,22	0,24

Результаты исследования и их обсуждение

Сравним дневную выработку при изменении среднего объема ствола дерева (см. рисунок).



Выработка харвестеров при объеме ствола: $a - 0,15-0,25 m^3$; $b - 0,21 m^3$.

Синяя линия на рис. $b - H_{vyr}, m^3/чел. \cdot день$

Harvester output per trunk volume: $a - 0,15-0,25 m^3$; $b - 0,21 m^3$.

Blue line in fig. $b - H_{vyr}, m^3/person \cdot day$

Анализ показал, что выработка John Deere 1270G 8WD выше, чем у John Deere 1270G 6WD, в 2,099 раза, при этом для John Deere 1270G 8WD объем ствола больше в 1,45 раза. С учетом разницы в среднем объеме ствола можно предположить, что производительность John Deere 1270G 8WD будет лучше в 1,32 раза при среднем объеме ствола $0,21 m^3$.

Дневная выработка харвестера на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F меньше, чем у John Deere 1270G 8WD, в 1,8 раза, при этом John Deere 1270G 8WD работал в условиях большего в 1,208 раза объема ствола. Соответственно, с учетом этой разницы производительность John Deere 1270G 8WD выше в 1,54 раза при объеме ствола $0,21 m^3$.

Харвестер на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F имеет большую дневную выработку, чем John Deere 1270G 6WD, в 1,166 раза, при этом John Deere 1270G 6WD работал в условиях меньшего в 1,2 раза объема ствола. С учетом данной разницы выработка John Deere 1270G 6WD выше в 1,17 раза при объеме ствола $0,21 m^3$ (в работе [8] указана разница в 1,126 раза при объеме ствола $0,27-0,28 m^3$).

Средний расход топлива харвестеров John Deere 1270G 6WD и 8WD почти идентичен, у харвестера Sany SY245F – больше в 1,28–1,33 раза (по [8] – в 1,46–2,00 раза).

Для прогнозирования изменения дневной выработки в исследуемых природно-производственных условиях в зависимости от объема ствола, общего рабочего времени ($T_{общ}, ч$), эффективного рабочего времени и расхода топлива разработана статистическая модель на основе регрессионного анализа с использованием полноценных групп. Степень достоверности полученных результатов подтверждается коэффициентом детерминации R^2 . Для харвестера John Deere 1270G 8WD

$$H_{vyr} = 150,56V_{хл} + 8,05287T_{общ} + 4,894T + 0,137917q. \quad (1)$$

Для харвестера John Deere 1270G 6WD

$$H_{vyr} = 140,988V_{хл} - 2,60783T_{общ} + 9,18517T + 0,44601q. \quad (2)$$

Для харвестера на базе экскаватора Sany SY245F

$$H_{\text{выр}} = 71,0066V_{\text{хл}} + 6,67386T_{\text{общ}} + 0,016797T + 0,191254q. \tag{3}$$

Полученные регрессионные уравнения позволяют с высокой достоверностью определить динамику дневной выработки харвестеров в зависимости от основных природно-производственных характеристик лесосеки.

Для подтверждения достоверности полученных данных и оценки тесноты связи дневной выработки харвестеров и среднего объема ствола проведен регрессионный анализ.

Дневная выработка харвестера John Deere 1270G 8WD

$$H_{\text{выр}} = \exp(10,4904\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{4}$$

коэффициент корреляции – 0,993876;

харвестера John Deere 1270G 6WD

$$H_{\text{выр}} = \exp(11,049\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{5}$$

коэффициент корреляции – 0,995634;

харвестера на базе экскаватора Sany SY245F

$$H_{\text{выр}} = \exp(10,5138\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{6}$$

коэффициент корреляции – 0,996438.

В табл. 3 представлены результаты дисперсионного анализа уравнений регрессии (1)–(6).

Таблица 3

Дисперсионный анализ уравнений регрессии
Analysis of variance for regression equations

Источник дисперсии	Сумма квадратов отклонения	Степени свободы	Среднеквадратичное отклонение	Критерий Фишера	R ² , %	Стандартная ошибка	Средняя абсолютная погрешность
Формула (1)							
Модель	5,3187E6	4	1,32967E6	372,71	97,01	59,73	45,47
Остаток	164107,0	46	3567,55				
Всего	5,48281E6	50					
Формула (2)							
Модель	1,07463E6	4	268656,	238,06	96,75	33,59	22,01
Остаток	36113,1	32	1128,53				
Всего	1,11074E6	36					
Формула (3)							
Модель	1,58418E6	4	396044,	169,30	94,82	94,40	48,37
Остаток	86552,4	37	2339,25				
Всего	1,67073E6	41					
Формула (4)							
Модель	1623,21	1	1623,21	3964,10	98,779	0,639904	0,48582
Остаток	20,0644	49	0,409477				
Всего	1643,27	50					
Формула (5)							
Модель	1,07463E6	4	268656,	238,06	99,1288	0,480128	0,316219
Остаток	36113,1	32	1128,53				
Всего	1,11074E6	36					

Окончание табл. 3

Источник дисперсии	Сумма квадратов отклонения	Степени свободы	Среднеквадратичное отклонение	Критерий Фишера	R ² , %	Стандартная ошибка	Средняя абсолютная погрешность
Формула (6)							
Модель	1102,08	1	1102,08	5585,44	99,2889	0,444199	0,352229
Остаток	7,89252	40	0,197313				
Всего	1109,97	41					

Примечание: Р-значение для всех моделей равно 0.

Полученные результаты с высокой степенью достоверности показывают тесную связь между дневной выработкой и средним объемом ствола, позволяя предварительно оценить эффективность исследуемых лесозаготовительных машин при изменении среднего объема ствола в том или ином лесном выделе.

Заключение

Анализ результатов исследования показал преимущество по эффективности (дневной выработке) харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой управления манипулятором IBC, в сравнении с более старой модификацией John Deere 1270G 6WD (в 1,32 раза при среднем объеме ствола 0,21 м³) и харвестером на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F (в 1,54 раза при среднем объеме ствола 0,21 м³). Результаты оценки могут служить доказательством тезиса о повышении эффективности лесозаготовительных машин при внедрении инновационных технологий и совершенствовании системы управления лесозаготовительными машинами. В то же время усложнение системы управления манипулятором повышает стоимость техники и ее эксплуатации, некоторые операторы отмечают трудности при управлении машинами, оснащенными системой IBC, кроме этого, в настоящее время существуют проблемы с приобретением подобных машин в связи с санкционными ограничениями.

Подтверждаются результаты исследования эффективности харвестера на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F. Машины подобного класса могут применяться на лесозаготовках с учетом их известных особенностей (перегрев масла в гидравлической системе, повышенный расход топлива, трудности с поставками запасных частей и т. д.), имея преимущество в виде универсальности, простоты конструкций базовой машины и сравнительно невысокой стоимости, что особенно актуально для небольших лесозаготовительных компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акционерное общество «Кондопожское лесопромышленное хозяйство». Режим доступа: <https://klpkh.com/> (дата обращения: 12.08.23).
AO Kondopoga Timber Industry Enterprise: Official Website. (In Russ.).

2. Васенёв М.Ю. Перспективные направления автоматизации современных лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 125–129.
Vasenev M.Yu. Perspective Trends of Modern Logging Machines Automation. Systems. Methods. Technologies, 2018, no. 3(39), pp. 125–129. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-125-129>

3. Герасимов Ю.Ю., Сибиряков К.Н., Мошков С.Л., Вьяльккю Э., Карвинен С. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин. Йёнссу: НИИ леса Финляндии, 2009. 46 с.

Gerasimov Yu.Yu., Sibiryakov K.N., Moshkov S.L., Väliky E., Karvinen S. *Calculation of Operating Costs of Forest Machines*. Joensuu, Finnish Forest Research Institute Publ., 2009. 46 p. (In Russ.).

4. Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу. 1998. 178 с.

Gerasimov Yu.Yu., Syunев V.S. *Ecological Optimization of Technological Processes and Machinery for Logging*. Joensuu, Joensuu University Publ., 1998. 178 p. (In Russ.).

5. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55–63.

Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. Ways to Improve the Efficiency of Forest Machines. *Energia: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2020, no. 1, pp. 55–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>

6. Гусеничный трактор ТСН-4 // Алтайский тракторный завод «Гранд». Режим доступа: <https://tt-4.ru/traktor/> (дата обращения: 25.02.25).

Catterpillar Tractor TSN-4. *Altai Tractor Plant "Grand"*. (In Russ.).

7. Карелия Палп. Режим доступа: <http://karjalapulp.com/> (дата обращения: 12.08.23). *Karelia Pulp*: Official Website. (In Russ.).

8. Кузнецов А.В., Гайда А.А. Сравнительный анализ эффективности харвестеров зарубежного производства // Resources and Technology. Петрозаводск, 2024. Т. 21, № 1. С. 100–112.

Kuznetsov A.V., Gayda A.A. Comparative Analysis of Foreign-Made Harvesters Efficiency. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 100–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2024.7543>

9. Кузнецов А.В., Галактионов О.Н. Анализ производства лесозаготовительных машин в России // Инженерн. вестн. Дона. 2023. № 4. С. 712–722.

Kuznetsov A.V., Galaktionov O.N. Analysis of Forest Machines Production in Russia. *Engineering journal of Don*, 2023, no. 4, pp. 712–722. (In Russ.).

10. Лесной экскаватор // Спецмашинери. Режим доступа: <https://sanysibir.ru/catalog/spetsialnyie-ekskavatoryi/lesnoy-ekskavator/sany-sy245f-gb-ii/> (дата обращения: 03.04.25).

Forest Excavator. *Spetsmashinery*. (In Russ.).

11. Продукция // XUVOL – качество создает будущее: офиц. сайт. Режим доступа: https://ru.xuvol.com/Products_index.html (дата обращения: 25.02.25).

Products. *XUVOL – Quality Shapes the Future*: Official Website. (In Russ.).

12. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Васильев А.С., Сапожков Д.В., Зайцев В.Г. Обоснование направлений совершенствования лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Verso, 2016. 93 с.

Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Vasilyev A.S., Sapozhkov D.V., Zaitsev V.G. *Justification of Directions for Improving Logging Machines*. Petrozavodsk, Verso Publ., 2016. 93 p. (In Russ.).

13. Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 1. С. 139–152.

Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A. Ergonomic Evaluation of Forestry Crane Partial Automation System. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>

14. Форвардер МТБ-18 // Производство России: интернет-выставка. Режим доступа: <https://productcenter.ru/products/76868/forwardier-mtb-18> (дата обращения: 25.02.25).

Forwarder MTB-18. *Made in Russia*: Online Exhibition. (In Russ.).

15. Форвардер Тром 20 // Тром. Режим доступа: <https://trom20.ru/> (дата обращения: 25.02.25).

Forwarder Trom 20. *Trom*. (In Russ.).

16. Харвестеры и форвардеры // Амкодор. Каталог. Режим доступа: <https://amkodor.by/catalog/> (дата обращения: 25.02.25).
Harvesters and Forwarders. *Amkodor. Catalogue*. (In Russ.).
17. Apafai A.I., Proto A.R., Borz S.A. Performance of a Mid-Sized Harvester-Forwarder System in Integrated Harvesting of Sawmill, Pulpwood and Firewood. *Annals of Forest Research*, 2017, vol. 60(2), pp. 227–241. <https://doi.org/10.15287/afr.2017.909>
18. Cadei A. *The Eco-Efficiency of Forest Operations in Complex Scenarios and the Role of Harvesting and Transportation System on the Carbon Balance*. PhD Thesis. University of Padova, 2023. 152 p.
19. Eriksson M., Lindroos O. Productivity of Harvesters and Forwarders in CTL Operations in Northern Sweden Based on Large Follow-Up Datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 25, iss. 3, pp. 179–200.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2014.974309>
20. Grabowski D., Kowalska J., Bembenek M., Mederski P. Intelligent Boom Control System on Forwarder – Inexperienced Operator Benefits More. *Proceedings of the 56th International Symposium on Forest Mechanization (FORMEC)*. Gdansk, Poland, 2024. 97 p.
21. Hartsch F., Schönauer M., Pohle Ch., Breinig L., Wagner T., Jaeger D. Effects of Boom-Tip Control and a Rotating Cabin on Loading Efficiency of a Forwarder: A Pilot Study. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 45, no. 1. 14 p.
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2179>
22. Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder Crane's Boom Tip Control System and Beginner-Level Operators. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 2, art. 1717.
<https://doi.org/10.14214/sf.1717>
23. Manner J., Lundström H. The Effect of Forked Trees on Harvester Time Consumption in a *Pinus contorta* Final-Felling Stand. *Silva Fennica*, 2024, vol. 58, no. 4, art. 24039. <https://doi.org/10.14214/sf.24039>
24. Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing Forwarder Boom-Control Systems Based on an Automatically Recorded Follow-up Dataset. *Silva Fennica*, 2019, vol. 53, no. 2, art. 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
25. *Robotics and Automation for Improving Agriculture*. Ed. by Prof. J. Billingsley. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. 326 p.
26. Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Suhanov Yu.V. Statistical Analysis of Forest Machines Ergonomic Parameters. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 93, art. 01023.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301023>
27. Stankic I., Poršinsky T., Tomašić Ž., Tonkovic I., Frntic M. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, no. 33, pp. 61–78.
28. Syuney V.S., Sokolov A.P., Konovalov A.P., Katarov V.K., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., et al. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. Joensuu, Finland, Melta, 2009, no. 120, p. 117.
29. Zemánek T., Filo P. Influence of Intelligent Boom Control in Forwarders on Performance of Operators. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 47–64. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.965>

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