

## МЕТОДИКА ВЫБОРА МАНИПУЛЯТОРА ХАРВЕСТЕРА

С.П. Карпачев, М.А. Быковский, А.В. Лаптев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

karpachevs@mail.ru

Изложены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию выбора манипулятора для харвестера. Разработана математическая модель работы харвестера на основе учета природных и производственно-технологических факторов, а также характеристик базы машины и харвестерной головки. Обоснованы характеристики манипулятора, в частности, максимальный вылет и грузовой момент манипулятора при заданных параметрах базовой машины и выбранной харвестерной головки. Рекомендовано при выборе манипулятора исходить из того, что некоторая часть крупномерных деревьев может быть оставлена на лесосеке или свалена бензопилами. Установлено, что вылет стрелы манипулятора в пределах от 8 до 11 м мало влияет на объем и число заготовленных деревьев. Процент заготавливаемого объема древесины мало зависит от вылета стрелы манипулятора и остается в пределах не менее 90 %.

**Ключевые слова:** манипулятор, математическая модель, имитационное моделирование

**Ссылка для цитирования:** Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 123–129.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

Существенное влияние на выполнение основных операций технологического цикла харвестера, а значит, и на его производительность, оказывает его технологическое оборудование, в частности манипулятор, на долю которого приходится 70...80 % времени участия в рабочем цикле харвестера.

Манипулятор харвестера можно выбрать, если известна база машины и определена харвестерная головка. Характеристики харвестерной головки, которые влияют на выбор манипулятора, это прежде всего максимальная ширина раскрытия захватных рычагов, которая определяет максимальный диаметр обрабатываемого дерева и вес головки.

### Цель работы

Цель работы — разработка методики выбора манипулятора по критерию достижения максимальной производительности харвестера на основе учета природных и производственно-технологических факторов, а также характеристик базы машины и харвестерной головки на примере природных условий Центрального федерального округа (ЦФО).

Для достижения указанной цели нами применялись методы имитационного моделирования с использованием математических моделей [1–8].

### Объекты и методика исследований

Валка леса харвестером осуществляется со стоянок в пределах рабочей зоны. Размер рабочей зоны определяется максимальным  $R_{\text{ман}}$  и минимальным  $r_{\text{ман}}$  вылетом стрелы манипулятора (рис. 1).

Первоначально харвестер 2 находится на стоянке 0 и заготавливает деревья в пределах рабочей зоны площадки I. После обработки всех деревьев

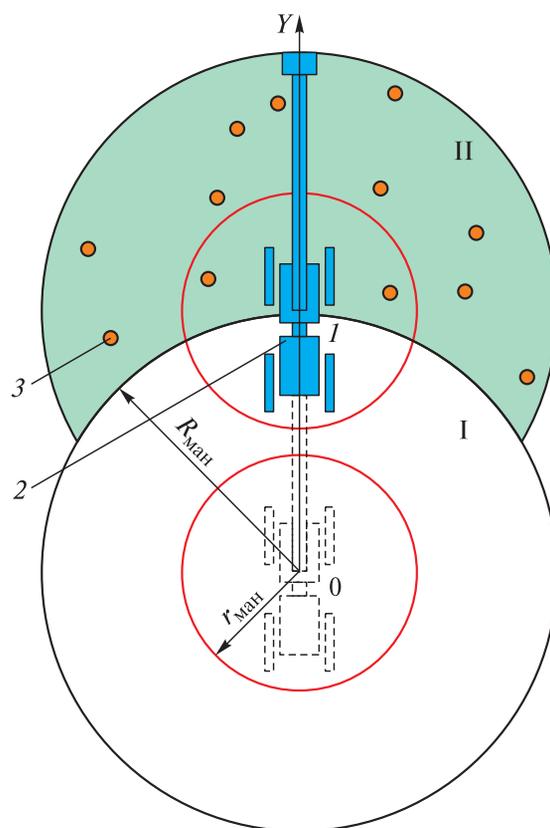


Рис. 1. Технологическая схема работы харвестера: 0, 1 — стоянка; 2 — харвестер; 3 — деревья; I, II — рабочие зоны  
Fig. 1. Technological scheme of the harvester operation: 0, 1 — parking; 2 — harvester; 3 — trees; I, II — working areas

на площадке I оператор направляет харвестер 2 от стоянки 0 к стоянке 1 в рабочей зоне площадки II. Среднее расстояние перемещения харвестера от стоянки к стоянке равно длине вылета манипулятора. Обработка деревьев в пределах «мертвой»

зоны работы манипулятора может осуществляться с промежуточной стоянки.

Харвестер на рабочей стоянке устанавливается таким образом, чтобы харвестерную головку можно было навести на дерево без задевания других деревьев и обзор из кабины на место пропила был наилучшим. Работа на рабочей стоянке начинается с валки ближайших деревьев и заканчивается валкой наиболее удаленных. Оператор с помощью манипулятора осуществляет подведение головки к дереву, затем проводит захват и спиливает дерево. При этом манипулятор в момент падения дерева сталкивает и подтаскивает его к месту дальнейшей обработки. Направление сталкивания дерева выбирается с учетом места пакетирования сортиментов и предъявляемых требований к сохранности деревьев и подроста, оставляемых после рубки. Обрезка сучьев и раскряжевка осуществляются, как правило, на волоке перед харвестером, так чтобы обрезаемые сучья оказались на волоке, а отпиливаемые сортименты сбоку от волока.

Технологический процесс работы харвестера смоделирован с учетом природно-производственных факторов [9–25].

Основные природные факторы учтенные в модели:

- число деревьев в пределах рабочей зоны;
- диаметр ствола дерева в месте спиливания;
- масса дерева и объем хлыста.

Основными учитываемыми в модели производственными факторами были приняты максимальный  $R_{\text{ман}}$  и минимальный  $r_{\text{ман}}$  вылеты стрелы манипулятора, которые ограничивают возможную площадь рабочей зоны.

При валке деревьев были проверены следующие ограничительные условия по харвестерной головке и по манипулятору:

1) диаметр ствола дерева в месте спиливания должен быть меньше максимальной ширины раскрытия захватных рычагов харвестерной головки; если условие не выполняется, то дерево остается на лесосеке;

2) масса дерева создает грузовой момент меньше допустимого грузового момента манипулятора;

3) масса дерева создает опрокидывающий момент меньше удерживающего (стабилизирующего) момента харвестера.

Если условия 2 или 3 не выполняются, то харвестер будет съезжать с волока и располагаться по отношению к дереву на расстоянии минимального вылета стрелы манипулятора. В случае если при подъезде к дереву на минимальное расстояние ограничительные условия по моментам не выполняются, дерево остается на лесосеке.

Средние значения таксационных показателей лесов по ЦФО, которые использовались при моделировании, были приняты следующими:

Объем хлыста, м <sup>3</sup> .....	0,41
Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см.....	23,4
Высота дерева, м.....	20,2
Запас леса на 1 га, м <sup>3</sup> .....	192
Число деревьев на 1 га, шт. ....	468

При моделировании древостоев использовались распределения количества деревьев и их объемы по диаметрам стволов на высоте 1,3 м и в месте спиливания. Диаметр ствола в месте спиливания определялся как случайное непрерывное число. В моделях при генерации диаметров стволов использовалось *beta*-распределение с диапазоном варьирования диаметров стволов, которые были установлены экспериментально.

Ограничительные условия, связанные с массой обрабатываемого дерева, представляют собой зависимости сочетания грузового момента используемого манипулятора и устойчивости харвестера от опрокидывания во время его работы [10].

Проверка по грузовому моменту используемого манипулятора (рис. 2) (ограничение, связанное с поломкой манипулятора от перегрузки) проводилась для каждого *i*-го дерева по условию

$$G_{\text{дери}} \leq \frac{1000M_{\text{брутто}}K}{R_{1i}} - G_{\text{хг}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{брутто}}$  — грузовой момент манипулятора брутто, кН·м;

$K = 0,725$  — коэффициент перевода грузового момента брутто в грузовой момент нетто;

$R_{1i}$  — расстояние вылета стрелы манипулятора до *i*-го дерева, м;

$G_{\text{хг}}$  — вес харвестерной головки, Н;

$G_{\text{дери}}$  — вес *i*-го дерева, Н;

$G_{\text{дери}} = m_{\text{дери}} \cdot g$ ;

$m_{\text{дери}}$  — масса *i*-го дерева, кг;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Проверка устойчивости харвестера от опрокидывания во время выполнения валки для каждого дерева проводилась по допустимым опрокидывающим моментам [11].

Допустимый опрокидывающий момент по условию продольной устойчивости должен быть меньше или равен стабилизирующему моменту (относительно оси *Y*)

$$M_{\text{стаб}_y} \geq M_{\text{опр}_y} \quad (2)$$

Допустимый опрокидывающий момент по условию поперечной устойчивости должен быть меньше или равен стабилизирующему моменту (относительно оси *X*)

$$M_{\text{стаб}_x} \geq M_{\text{опр}_x} \quad (3)$$

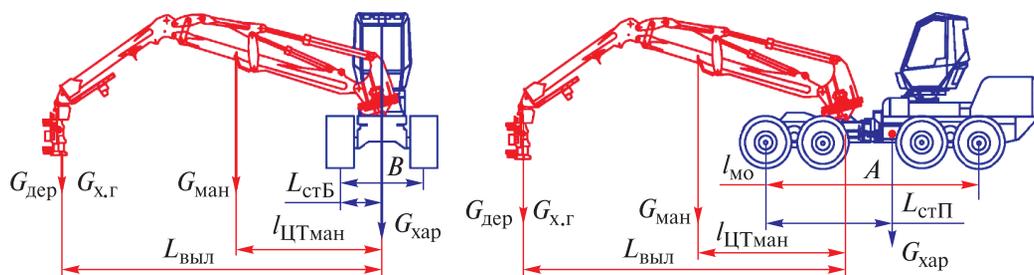


Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих на многооперационную машину  
 Fig. 2. Design scheme of forces acting on a multioperational machine

**Расчетные формулы (обозначения соответствуют рис. 2)**

Calculation formulas (notations correspond to Fig. 2)

Наименование	Расчетные формулы	
	Относительно оси Y	Относительно оси X
Стабилизирующий момент	$M_{\text{стаб\_yi}} = \frac{G_x L_{\text{стП}}}{1,4}$	$M_{\text{стаб\_xi}} = \frac{G_x L_{\text{стБ}}}{1,4}$
Грузовой момент от дерева	$M_{\text{гр\_yi}} = G_{\text{дер}}(R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{гр\_xi}} = G_{\text{дер}}(R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Момент манипулятора	$M_{\text{ман\_yi}} = G_{\text{ман}}(0,42R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{ман\_xi}} = G_{\text{ман}}(0,42R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Момент харвестерной головки	$M_{\text{ХГ\_yi}} = G_{\text{ХГ}}(R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{ХГ\_xi}} = G_{\text{ХГ}}(R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Опрокидывающий момент	$M_{\text{опр\_yi}} = M_{\text{гр\_yi}} + M_{\text{ман\_yi}} + M_{\text{ХГ\_yi}}$	$M_{\text{опр\_xi}} = M_{\text{гр\_xi}} + M_{\text{ман\_xi}} + M_{\text{ХГ\_xi}}$
Угол поворота манипулятора	$\alpha$	

Формулы для расчета моментов приведены в таблице.

В случае невыполнения условий (1) или (2), или (3) харвестер подъезжал к дереву на минимальное расстояние, которое соответствовало минимальному вылету стрелы манипулятора равному 4 м. Для этого моделировался соответствующий маневр харвестера. В случае невыполнения условий (1) или (2), или (3) и при минимальном вылете манипулятора, дерево считалось не сваленным и учитывалось как оставленное на лесосеке.

Производительность харвестера в модели определялась как объем всех сваленных и переработанных на сортименты деревьев за 1 час

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n T_{\text{циj}} = 3600 \text{ с;} \\ P_{\text{час}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n_c} V_{\text{сijk}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{циj}}$  — время  $i$ -го цикла обработки одного дерева на  $j$ -й стоянке, с;

$V_{\text{сijk}}$  — объем  $k$ -го сортимента во время  $i$ -го цикла обработки дерева на  $j$ -й стоянке,  $\text{м}^3$ ;

$N$  — число стоянок харвестера за 1 час;

$n$  — число деревьев на  $j$ -й стоянке, которые могут быть спилены и обработаны харвестером, с учетом ограничений (1) — (3);

$n_c$  — число сортиментов на  $j$ -й стоянке при обработке  $i$ -го дерева.

Время цикла  $T_{\text{циj}}$  включает в себя время на наведение и доставку харвестерной головки к дереву, зажим рычагов, валку дерева (спиливание, сталкивание с пня и перемещение), обрезку сучьев и раскряжевку на сортименты. Время цикла обработки каждого дерева в модели задавалось как непрерывное случайное число. Распределение времени цикла принято по экспоненциальному закону.

Математическая модель была реализована в виде компьютерной программы. Эта программа позволяет вводить любую базу машины и любые характеристики харвестерной головки, и исследовать работу манипулятора с разными максимальными вылетами стрелы и грузовыми моментами.

**Результаты и обсуждение**

В настоящей статье представлены результаты исследований влияния максимального вылета стрелы манипулятора (для линейки манипуляторов от 8 до 11 м) на выходные показатели работы харвестера с максимальной шириной раскрытия захватных рычагов харвестерной головки 750 мм.

В качестве базовой машины был выбран харвестер со следующими характеристиками (см. рис. 2):

- Длина опорного контура  $A$ , мм ..... 5580
- Ширина опорного контура  $B$ , мм ..... 2196
- Расстояние от центра тяжести харвестера до поперечной оси опрокидывания  $L_{\text{стП}}$ , мм ..... 3380

Расстояние от центра тяжести харвестера до боковой оси опрокидывания $L_{стБ}$ , мм .....	1098
Расстояние от оси вращения (крепления манипулятора) до поперечной оси опрокидывания $\ell_{мо}$ , мм .....	208
Вес харвестера $G_x$ , Н .....	159475,4
Вес харвестерной головки с ротатором $G_{хд}$ , Н .....	13524
Вес манипулятора $G_{ман}$ изменяется в расчетах в зависимости от максимального вылета манипулятора.	

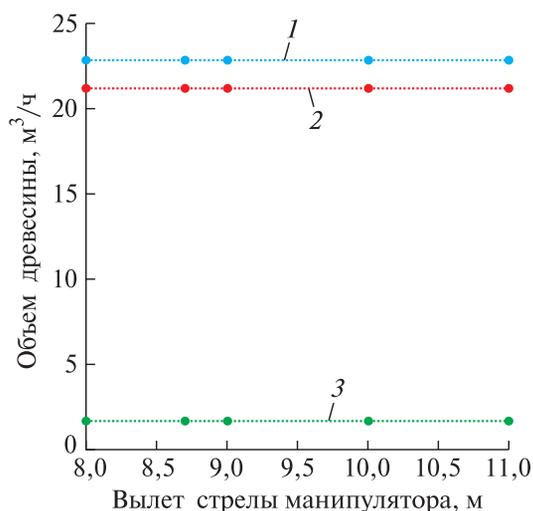


Рис. 3. Зависимость объема древесины от максимального вылета стрелы манипулятора: 1 — общий объем древесины; 2 — объем заготовленной древесины; 3 — объем оставленной древесины

Fig. 3. Dependence of the wood volume on the maximum of manipulator boom reach: 1 — total volume of wood; 2 — the volume of harvested wood; 3 — the volume of wood left

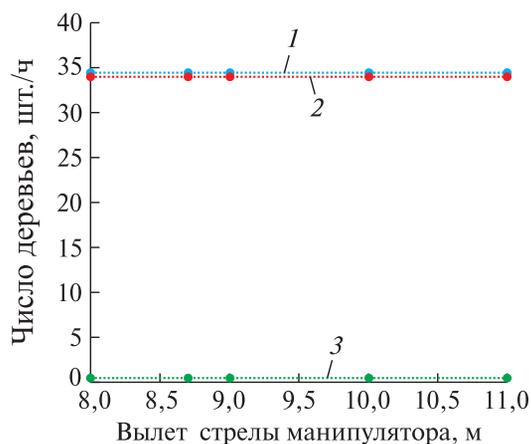


Рис. 4. Зависимость числа деревьев от максимального вылета стрелы манипулятора: 1 — общее число деревьев; 2 — число заготовленных деревьев; 3 — число оставленных деревьев

Fig. 4. Dependence of the trees number on the maximum manipulator boom reach: 1 — the total number of trees; 2 — the number of harvested trees; 3 — the number of trees left

Некоторые результаты исследований представлены в виде зависимостей (рис. 3, 4).

Из рис. 3 видно, что общий объем древесины с увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет. Этого и следовало ожидать, поскольку увеличивается площадь рабочей зоны. Отметим, что рост небольшой и особенно преимущества манипулятор с максимальным вылетом стрелы 11 м не дает, по сравнению с манипулятором 8 м. Так, например, общий объем охватываемой древесины манипулятором 8 м составляет 22,761 м³/ч, а манипулятора 11 м — 22,971 м³/ч, т. е. увеличение объема древесины составляет всего 1 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

Объем заготовленной древесины с увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет, а объем оставленных на лесосеке деревьев почти не изменяется (см. рис. 4). Так, например, для манипулятора 8 м объем заготовленной древесины равен 21,088 м³/ч, объем оставленной — 1,673 м³/ч. Для манипулятора с максимальным вылетом стрелы 11 м, соответствующие объемы будут равны 21,263 и 1,708 м³/ч. Таким образом, рост производительности при увеличении максимального вылета стрелы манипулятора с 8 до 11 м составил менее 0,8 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

Число заготовленных деревьев (см. рис. 4) также почти не изменяется. Так, например, число заготавливаемого объема древесины манипулятором 8 м составляет 33,806 шт./ч, а манипулятора 11 м — 34,152 шт./ч, т. е. рост составляет не более 1 %.

Число оставленных деревьев остается в пределах 0,4 шт./ч. Рост не превышает 2,5 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

## Выводы

Результаты имитационных экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1. С увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет объем заготавливаемой древесины, то есть производительность харвестера по объему заготовок, однако этот рост не существен и не превышает 0,8 %.

2. С увеличением влияния максимального вылета стрелы манипулятора растет количество заготавливаемых деревьев, то есть производительность харвестера по числу заготовленных деревьев, однако этот рост не существен и не превышает 1 %.

3. Процент заготавливаемого объема древесины почти не зависит от влияния максимального вылета стрелы манипулятора и остается в пределах не менее 90 %.

4. Процент заготавливаемых деревьев практически не зависит от влияния максимального вылета стрелы манипулятора и остается более 98 %.

*Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.*

## Список литературы

- [1] Шелгунов Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная промышленность, 1982. 520 с.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // Biomass and Bioenergy, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Ширнин Ю.А. Технологии и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Spinelli R., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers // Croatian J. of Forest Engineering, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // Croatian J. of Forest Engineering, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Виногоров Г.К. Лесосечные работы. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
- [7] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // Croatian J. of Forest Engineering, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.531>
- [8] Салминен Э.О., Гуров С.В., Большаков Б.М. Размещение волоков на заболоченных участках // Лесная промышленность, 1988. № 3. С. 32–33.
- [9] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1977. 248 с.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [11] Рыжков А.Е., Проказин Н.Е. Система добровольной лесной сертификации PEFC-FCR, оценка лесопользования, лесопользования и цепочки поставок лесопроизводства на соответствие международным требованиям. М.: PEFC-FCR, 1916. 254 с.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps // Croatian J. of Forest Engineering, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевочной // ИВУЗ Лесной журнал, 2004. № 4. С. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? // Biomass Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (дата обращения 01.02.2020).
- [16] Сюнев В.С. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоенсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 126 с.
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 01–02 декабря 2015 г., Вологодский государственный университет. Вологда: ВГТУ, 2016. С. 32–37.
- [18] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптированные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 174 с.
- [19] Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. 120 с.
- [20] Макаренко А.В. Оптимизация размещения сети трелевочных волоков на лесосеке // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 апреля 2017 г. Минск, БГТУ. Минск: БГТУ, 2017. С. 233–237.
- [21] Галактионов О.Н. Технологический процесс лесозаготовок и ресурсы лесосечных отходов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 95 с.
- [22] Кузнецов В.И. Представляем фирму «Лестехком» – новое качество лесозаготовительной техники // Лесная промышленность, 2006. № 1. С. 12–14.
- [23] Пискунов М.А. Распределение проходов форвардера и построение оптимальных схем расположения трелевочных волоков на лесосеке // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование, 2017. № 2 (34). С. 37–48.
- [24] Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
- [25] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Лесотехнический журнал, 2016. № 2. С. 69–75. DOI: [10.12737/19956](https://doi.org/10.12737/19956)

## Сведения об авторах

**Карпачев Сергей Петрович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [karpachevs@mail.ru](mailto:karpachevs@mail.ru)

**Быковский Максим Анатольевич** — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [bykovskiy@mgul.ac.ru](mailto:bykovskiy@mgul.ac.ru)

**Лаптев Александр Валентинович** — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [laptev@mgul.ac.ru](mailto:laptev@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 16.10.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

## METHOD OF SELECTING A HARVESTER MANIPULATOR

S.P. Karpachev, M.A. Bykovskiy, A.V. Laptev

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

karpachevs@mail.ru

Theoretical and experimental studies to substantiate the choice of a manipulator for a harvester are presented. A mathematical model of the harvester's operation has been developed based on natural and production-technological factors, as well as the characteristics of the machine base and the harvester head. The characteristics of the manipulator have been substantiated, in particular, the maximum reach and load moment of the manipulator for the given parameters of the base machine and the selected harvester head. When choosing a manipulator, it is recommended to proceed from the fact that some part of large trees can be left in the cutting area or dumped with chainsaws. It has been established that the manipulator boom reach within the range from 8 to 11 m has little effect on the volume and number of harvested trees. The percentage of the harvested volume of wood depends little on the boom reach of the manipulator and remains at least 90 %.

**Keywords:** loader, mathematical model, service simulating test

**Suggested citation:** Karpachev S.P., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Metodika vybora manipulyatora kharvestera* [Method of selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 123–129.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

### References

- [1] Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogokhozyaystva* [Machines and equipment of logging, timber rafting and forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 520 p.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Shirnin Yu.A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennykh proizvodstv. Ch. 1. Lesosechnye raboty* [Technology and equipment of forest industry. Part 1. Logging work]. Moscow: MGUL, 2004, 445 p.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Vinogorov G.K. *Lesosechnye raboty* [Logging work]. Moscow: Lesnaya prom-t' [Forest industry], 1981, 272 p.
- [7] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.531>
- [8] Salminen E.O., Gurov S.V., Bol'shakov B.M. *Razmeshchenie volokov na zabolochennykh uchastkakh* [Placement of portages on wetlands]. *Lesnaya promyshlennost' [Forestry]*, 1988, no. 3, pp. 32–33.
- [9] Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlya lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya prom-t' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. *Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa*, 2012, 52 p.
- [11] Ryzhkov A.E., Prokazin N.E. *Sistema dobrovol'noy lesnoy sertifikatsii PEFC-FCR, otsenka lesoupravleniya, lesopol'zovaniya i ispechki postavok lesoproduktsii na sootvetstvie mezhdunarodnym trebovaniyam* [PEFC-FCR voluntary forest certification system/assessment of forest management, forest use and supply chain of forest products for compliance with international requirements]. Moscow: PEFC-FCR, 1916, 254p.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Koordinatno-ob'emnaya metodika trassirovaniya pri osvoenii lesosek trelevkoy* [Coordinatevolumetric tracing technique in the development of skidding sites]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2004, no. 4, pp. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? *Biomass Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (accessed 01.02.2020).
- [16] Syuney V.S. *Sravnienie tekhnologiy lesosechnykh rabot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh Respubliki Kareliya* [Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2008, 126 p.
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [The efficiency of technological operations during selective logging] Aktual'nye problem razvitiya lesnogo kompleksa. *Materialy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 01–02 dekabrya 2015 g. Vologodskiy gosudarstvennyy universitet* [Actual problems of the development of the forest complex. Materials of the 13<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, December 01–02, 2015. Vologda State University]. Vologda: VSTU, 2016, pp. 32–37.
- [18] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh severo-zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Mediating technologies for the development of cutting areas in the northwestern region of the Russian Federation]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 174 p.

- [19] Gerts E.F. *Otsenka tekhnologii lesopol'zovaniya na lesosechnykh rabotakh* [Evaluation of forest technology in logging work]. Ekaterinburg: USFU, 2003, 120 p.
- [20] Makarenko A.V. *Optimizatsiya razmeshcheniya seti trelevochnykh volokov na lesoseke* [Optimizing the placement of a network of skidding trails in the cutting area. Logging production: problems and solutions]. Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Minsk, BGTU, 26–28 aprelya 2017 g. [Materials of the international scientific and technical conference, Minsk, BSTU, April 26–28, 2017]. Minsk: BSTU, 2017, pp. 233–237.
- [21] Galaktionov O.N. *Tekhnologicheskiy protsess lesozagotovok i resursy lesosechnykh otkhodov* [Technological process of logging and resources of logging waste]. Petrozavodsk: PetrSU, 2007, 95 p.
- [22] Kuznetsov V.I. *Predstavlyаем firmu «Lestekhkom» — novoe kachestvo lesozagotovitel'noy tekhniki* [We represent Lestekkom, a new quality of logging equipment] Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 2006, no. 1, pp. 12–14.
- [23] Piskunov M.A. *Raspredelenie prokhodov forvardera i postroenie optimal'nykh skhem raspolozheniya trelevochnykh volokov na lesoseke* [Distribution of forwarder passes and the construction of optimal layouts of skidding tracks in the cutting area]. Vestnik Volga State University of Technology. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Forest. Ecology. Nature use], 2017, no. 2 (34), pp. 37–48.
- [24] Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled tractors by justifying the modes of their movement and technological equipment]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2006, 236 p.
- [25] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [The technology of the harvester's work in selective felling]. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forest Engineering Journal], 2016, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.12737/19956

## Authors' information

**Karpachev Sergey Petrovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

**Bykovskiy Maksim Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.) Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), bykovskiy@mgul.ac.ru

**Laptev Aleksandr Valentinovich** — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), laptev@mgul.ac.ru

Received 16.10.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.