

УДК (UDC) 62-236.58

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНИПУЛЯТОРА  
ХАРВЕСТЕРА НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ РАБОЧЕЙ ЗОНЫTHE INFLUENCE OF THE HARVESTER MANIPULATOR DESIGN  
CHARACTERISTICS ON THE WORKING AREA OPTIMAL SIZEЛагерев А.В.<sup>1</sup>, Макулина А.В.<sup>1</sup>, Лагерев И.А.<sup>2</sup>  
Lagerev A.V.<sup>1</sup>, Makulina A.V.<sup>1</sup>, Lagerev I.A.<sup>2</sup><sup>1</sup> – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)<sup>2</sup> – Кубанский государственный технологический университет (Краснодар, Россия)<sup>1</sup> – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)<sup>2</sup> – Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

**Аннотация.** Эффективность использования лесозаготовительных машин на крутом склоне зависит от многих факторов, в том числе от рабочей зоны манипулятора, которая может быть реализована в различных технологических режимах работы. Геометрические параметры реализуемой рабочей зоны определяются рабочей позицией машины в соответствующем технологическом режиме, то есть местом установки машины относительно дерева или группы деревьев, подлежащих заготовке. Оптимизация рабочей зоны манипулятора, образуемой при работе лесозаготовительной машины, является одним из действенных способов повышения ее производительности. В данной статье на основе ранее разработанной математической модели оптимизации конструктивных размеров звеньев четырехзвенного шарнирно-сочлененного гидравлического манипулятора, предназначенного для пространственного манипулирования харвестерной головкой при спиливании и укладки деревьев в штабель для дальнейшего транспортирования на погрузочную площадку, выполнен анализ влияния основных геометрических и силовых характеристик харвестера на оптимальные размеры рабочей зоны.

**Ключевые слова:** харвестер, гидроманипулятор, лесозаготовка, рабочая зона, оптимизация.

**Дата получения статьи:** 12.01.2024

**Дата принятия к публикации:** 22.05.2024

**Дата публикации:** 25.06.2024

**Сведения об авторах:**

**Лагерев Александр Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

**Макулина Анна Васильевна** – аспирант ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: [annahimich14@mail.ru](mailto:annahimich14@mail.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>

**Abstract.** The efficiency of using logging machines on a steep slope depends on many factors, including the working area of the manipulator, which can be implemented in various technological modes of operation. The geometric parameters of the implemented working area are determined by the working position of the machine in the appropriate technological mode, that is, the place of installation of the machine relative to the tree or group of trees to be harvested. Optimization of the manipulator's working area, formed during the operation of a logging machine, is one of the most effective ways to increase its productivity. In this article, based on a previously developed mathematical model for optimizing the structural dimensions of the links of a four-link articulated hydraulic manipulator designed for spatial manipulation of the harvester head when cutting and stacking trees for further transportation to the loading area, an analysis of the influence of the main geometric and power characteristics of the harvester on the optimal size of the working area is performed.

**Keywords:** harvester, hydraulic manipulator, logging, work area, optimization.

**Date of manuscript reception:** 12.01.2024

**Date of acceptance for publication:** 22.05.2024

**Date of publication:** 25.06.2024

**Authors' information:**

**Alexander V. Lagerev** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

**Anna V. Makulina** – Postgraduate at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: [annahimich14@mail.ru](mailto:annahimich14@mail.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>

Лагереv Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor at Kuban State Technological University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук № МД-1543.2022.4

### Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. MD-1543.2022.4

## 1. Введение

Функция леса как источника древесины остается одной из важнейших. В связи с возрастающими потребностями в древесине, а также важной почвозащитной, водорегулирующей и оздоровительной ролью лесов особое значение придается рациональному использованию и непрерывному воспроизводству лесных богатств. Современные машины и комплексы позволяют проводить лесозаготовительные работы в ресурсосберегающем режиме [1, 2].

В настоящее время при работе на равнинных лесах в Российской Федерации все большее распространение находит машинная заготовка древесины, которая при больших объемах заготовки и сплошных рубках спелых и перестойных насаждений оказывается выгоднее механизированной [3].

Механизированная заготовка древесины на склонах имеет свои очевидные сложности, как технические, так и технологические. Но серьезной альтернативы механизированной заготовке древесины, даже в условиях крутых склонов, в настоящее время нет [1, 3].

Машинная валка деревьев на склонах может осуществляться как машинами для сортиментной заготовки, так и машинами для хлыстовой заготовки [4]. Трудности при лесозаготовке вызывает не валка, а транспортировка поваленных деревьев, хлыстов, сортиментов на погрузочную площадку [3, 5].

Ведущие компании-производители машин для сортиментной заготовки – Ponsse, John Deere, Komatsu – предлагают свои технические решения, которые существенно повышают эффективность работы техники при работе

на склонах. Прежде всего – это установка специальной лебедки [1, 5-9]. Установка лебедки и других дополнительных опций достаточно существенно удорожают и утяжеляют базовую машину, делают ее узкоспециализированной и увеличивают срок получения машины с завода [1].

В настоящее время научная проработка технических и технологических проблем, связанных с эксплуатацией лесозаготовительных машин на склонах, нашла отражение в относительно небольшом числе публикаций, в частности, в [5, 10-12].

## 2. Модели и методы

При проектировании и производстве манипуляторов современных харвестеров в качестве их кинематических схем используются открытые схемы на основе трех- или четырехзвенных механизмов с последовательно расположенными и шарнирно сочлененными с помощью цилиндрических шарниров V класса отдельными звеньями. В настоящее время преимущественно используются четырехзвенные манипуляторы [1, 6, 13, 14]. На рис. 1 показана типичная кинематическая схема такого манипулятора. Она включает кинематически связанные между собой посредством цилиндрического шарнира E кинематическую схему манипулятора и кинематическую схему рабочего органа – харвестерной головки. Таким образом, рабочий орган в целом имеет возможность свободного качания в вертикальной плоскости под действием нагрузки от собственного веса и веса спиленного дерева или сортимента.

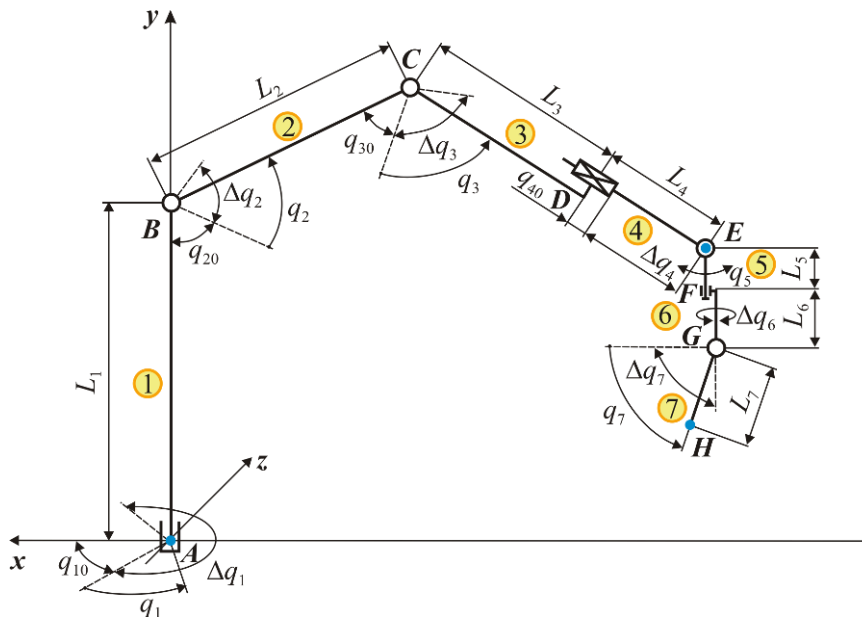


Рис. 1. Единая кинематическая схема манипулятора и рабочего органа харвестера

Кинематическая схема манипулятора включает его основание, три поворотных и одно поступательное звено, обеспечивающих пространственное перемещение рабочего органа. Они формируют плоскую открытую кинематическую цепь, состоящую из последовательно установленных пяти нижних кинематических пар V класса (трех вращательных и одной поступательной). Манипулятор имеет четыре степени свободы, каждая из которых соответствует одной из обобщенных координат  $q_1 \dots q_4$ . Конечная точка  $E$  кинематической схемы манипулятора совпадает с цилиндрическим шарниром, у которого ось вращения перпендикулярна к плоскости кинематической пары 3-4 и параллельна координатной плоскости  $xOz$ . С помощью данного шарнира производится сопряжение кинематических схем манипулятора и рабочего органа харвестера. Сопряжение образуется кинематической парой 4-5, причем вследствие отсутствия привода соответствующая ей обобщенная координата  $q_5$  изменяется путем свободного качания звена 5 по мере изменения величины и направления действия суммарной нагрузки от веса харвестерной головки органа и веса дерева или сортамента.

Кинематические пары 0-1, 1-2, 2-3 и 3-4, составляющие кинематическую схему манипулятора, обеспечивают пространственное

перемещение конечной точки  $E$  металлоконструкции рукоятки, к которой крепится рабочий орган харвестера. Таким образом, манипулятор обеспечивает требуемое переносное движение рабочего органа к спиливаемому дереву. Кинематические пары 5-6 и 6-7, составляющие кинематическую схему рабочего органа, обеспечивают пространственное перемещение шарнира  $G$  и плоскости поперечного сечения спила точки  $H$ , т.е. обеспечивают ориентирующее движение рабочего органа при выполнении технологических операций со спиливаемым деревом – закреплении дерева в харвестерной головке, валке дерева и его переноса после предусмотренной обработки в формируемую пачку хлыстов.

Рабочей зоной харвестера является та область пространства в локальной системе координат манипулятора  $xuz$ , в пределах которой может находиться в рабочем положении цепная пила харвестерной головки, т.е. точка  $H$  кинематической схемы рабочего оборудования при вертикальной ориентации кинематических пар 5-6 и 6-7 (рис 2). Она является сферической.

В качестве цели оптимизации геометрических характеристик кинематической схемы рабочего оборудования харвестера целесообразно принять нахождение такого сочетания длин отдельных звеньев манипулятора,

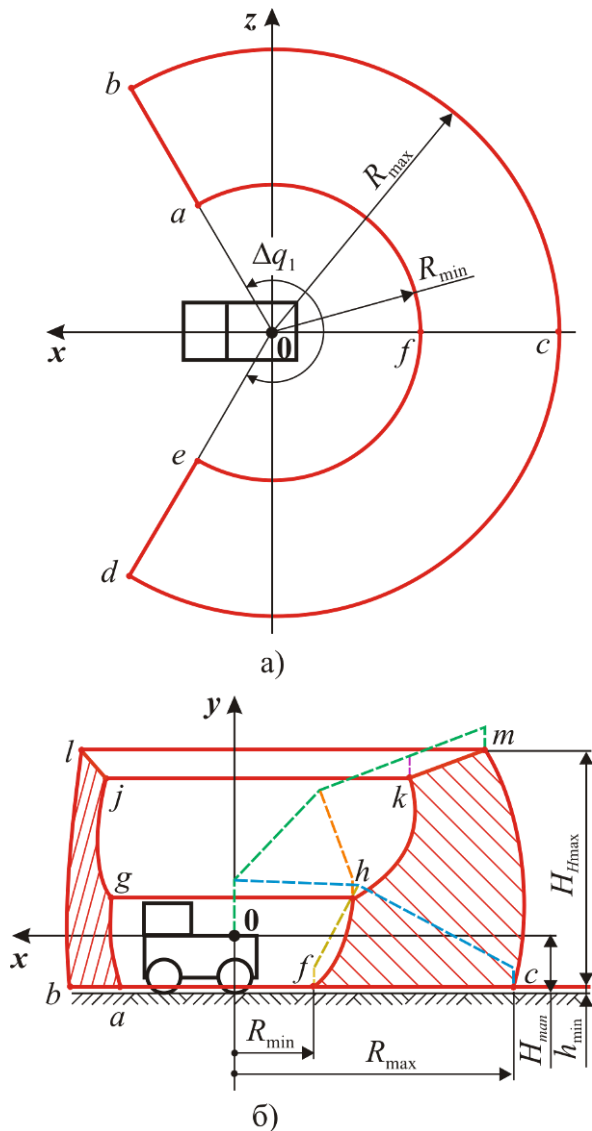


Рис. 2. Рабочая зона манипулятора

при котором площадь  $S_w$  области требуемого нахождения спиливаемого дерева  $abcdefa$  (рис. 2, а) принимает максимальное значение при соблюдении ряда геометрических, конструктивных и режимных ограничений, т.е. когда целевая функция

$$Ц(L_1; L_2; L_3; L_4) = \Delta q_1 (R_{\max}^2 - R_{\min}^2) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Ранее в [15] был разработан и реализован метод оптимального проектирования гидравлического манипулятора харвестера для лесозаготовок на склонах, который позволяет получить максимально возможную площадь рабочей зоны за счет выбора оптимального сочетания длин отдельных звеньев с учетом необходимых конструктивных и режимных ограничений. В качестве таких ограничений были использованы ограничения:

- на величину допустимого угла поворота или хода отдельных звеньев;

- на недопущение потери устойчивости харвестером и его опрокидывания под действием опрокидывающего момента, создаваемого весом дерева и собственным весом манипулятора;

- на обеспечение требуемого размера зоны безопасного приближения рабочего органа к конструкциям харвестера.

Разработанная задача оптимизации была реализована в компьютерной программе «Оптимизация геометрических характеристик кинематической схемы рабочего оборудования харвестера» [16]. Структура программы включает в себя главную программу и 6 подпрограмм типа Procedure:

- *BeginPointOptimization* – задание начальной точки оптимизации – вектора управляемых параметров  $\{L_1 L_2 L_3 L_4\}^{beg}$ ;

- *CelFun* – вычисление целевой функции (1) для текущего вектора управляемых параметров  $\{L_1 L_2 L_3 L_4\}$ ;

- *DetermQ20max* – определение обобщенной координаты  $q_{2,\max}$  при вычислении максимального радиуса рабочей зоны  $R_{\max}$ ;

- *DetermQ20min* – определение обобщенной координаты  $q_{2,\min}$  при вычислении минимального радиуса рабочей зоны  $R_{\min}$ ;

- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений;

- *Optimizer* – решение оптимизационной задачи методом типа Хука-Дживса [17, 18] и нахождение вектора управляемых параметров  $\{L_1 L_2 L_3 L_4\}^{opt}$ .

Результатом выполнения компьютерной программы является нахождение такого сочетания длин звеньев  $L_1^{opt}$ ,  $L_2^{opt}$ ,  $L_3^{opt}$  и  $L_4^{opt}$  манипулятора, при котором площадь  $S_w$  области требуемого нахождения спиливаемого дерева принимает максимальное значение при соблюдении ряда требуемых геометрических, конструктивных и режимных. В число расчетных данных входят такие параметры, как

- оптимальные значения длин звеньев  $L_1^{opt}$ ,  $L_2^{opt}$ ,  $L_3^{opt}$  и  $L_4^{opt}$ ;

- минимальное  $q_{20} = q_{2,\min}$  и максимальное  $q_{2,\max}$  значения обобщенной координаты  $q_2$ ;
- минимально требуемая величина предельного угла поворота стрелы манипулятора  $\Delta q_2 = q_{2,\max} - q_{2,\min}$ ;
- минимальный  $R_{\min}^{opt}$  и максимальный  $R_{\max}^{opt}$  радиусы оптимальной области требуемого нахождения спиливаемого дерева;
- максимальная высота поднятия цепной пилы харвестерной головки над поверхностью грунта  $H_{H\max}$ ;
- площадь  $S_w^{opt}$  оптимальной области требуемого нахождения спиливаемого дерева;
- объем  $V_w^{opt}$  рабочей зоны харвестера, соответствующей оптимальной области требуемого нахождения спиливаемого дерева.

### 3. Обсуждение результатов расчетов

Результаты расчетов влияния основных технических характеристик харвестера, в том числе, поперечного габаритного размера (ширины машины), его полного веса, относительного веса звеньев манипулятора и развиваемого грузового момента  $[M_t]$ , на геометрические характеристики рабочей зоны оптимального размера приведены на рис. 3–7.

Рабочая зона харвестера существенно зависит от грузового момента манипулятора  $[M_t]$ , который в свою очередь определяется полным весом харвестера и положением центра тяжести системы «харвестер – манипулятор – харвестерная головка». Если центр тяжести самого харвестера, как можно достаточно справедливо считать, находится приблизительно на продольной оси машины, то влияние собственного веса звеньев манипулятора и харвестерной головки приводит к заметному смещению положения центра тяжести указанной системы «харвестер – манипулятор – харвестерная головка» в поперечном направлении относительно продольной оси машины. Это обуславливает уменьшение величины грузового момента, который может обеспечить харвестер в процессе манипулирования спиленным деревом. Указанное снижение тем больше, чем на боль-

шем расстоянии от продольной оси харвестера находится харвестерная головка. Уменьшение грузового момента отрицательно влияет на поперечную устойчивость харвестера против опрокидывания, ухудшает его управляемость и снижает безопасность работы харвестера на склоне.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что грузовой момент манипулятора следует рассматривать как важнейший параметр, определяющий размеры рабочей зоны харвестера, так как при его изменении в 2 раза (со 150 до 300 кН·м) площадь  $S_w$  оптимальной области требуемого нахождения спиливаемого дерева возрастает от приблизительно 3 раз (для дерева весом 8 кН) до 4 раз (для дерева весом 4 кН). Максимальные значения геометрических характеристик рабочей зоны наблюдаются, когда вес хлыста принимает минимальные значения. Следует отметить, что увеличение грузового момента уменьшает угол наклона склона, на котором может безопасно работать харвестер. Это приводит к сужению рабочей зоны на более крутых склонах, так как харвестер может стать менее маневренным, особенно при выполнении поворотов и маневров на крутом склоне.

С уменьшением класса [13] харвестера, т.е. с использованием харвестера меньшего типоразмерного ряда по грузовому моменту, наблюдается уменьшение площади области требуемого нахождения спиливаемого дерева  $S_w$ . Это связано с тем, что манипулятор с меньшим грузовым моментом и сам по весу меньше и, соответственно, требуемый для его потери поперечной устойчивости опрокидывающий момент уменьшается. Как следствие, манипулятор вследствие уменьшенного грузового момента не сможет поднять груз на больших вылетах, что сказывается на максимальном радиусе рабочей зоны и необходимости введения ограничений по грузоподъемности манипулятора в целом.

Поперечный габарит харвестера  $D_h$  при постоянном значении грузового момента манипулятора  $[M_t]$  оказывает значительное влияние на геометрические характеристики рабочей зоны, особенно при работе на крутых склонах (рис. 4). Увеличение поперечно-

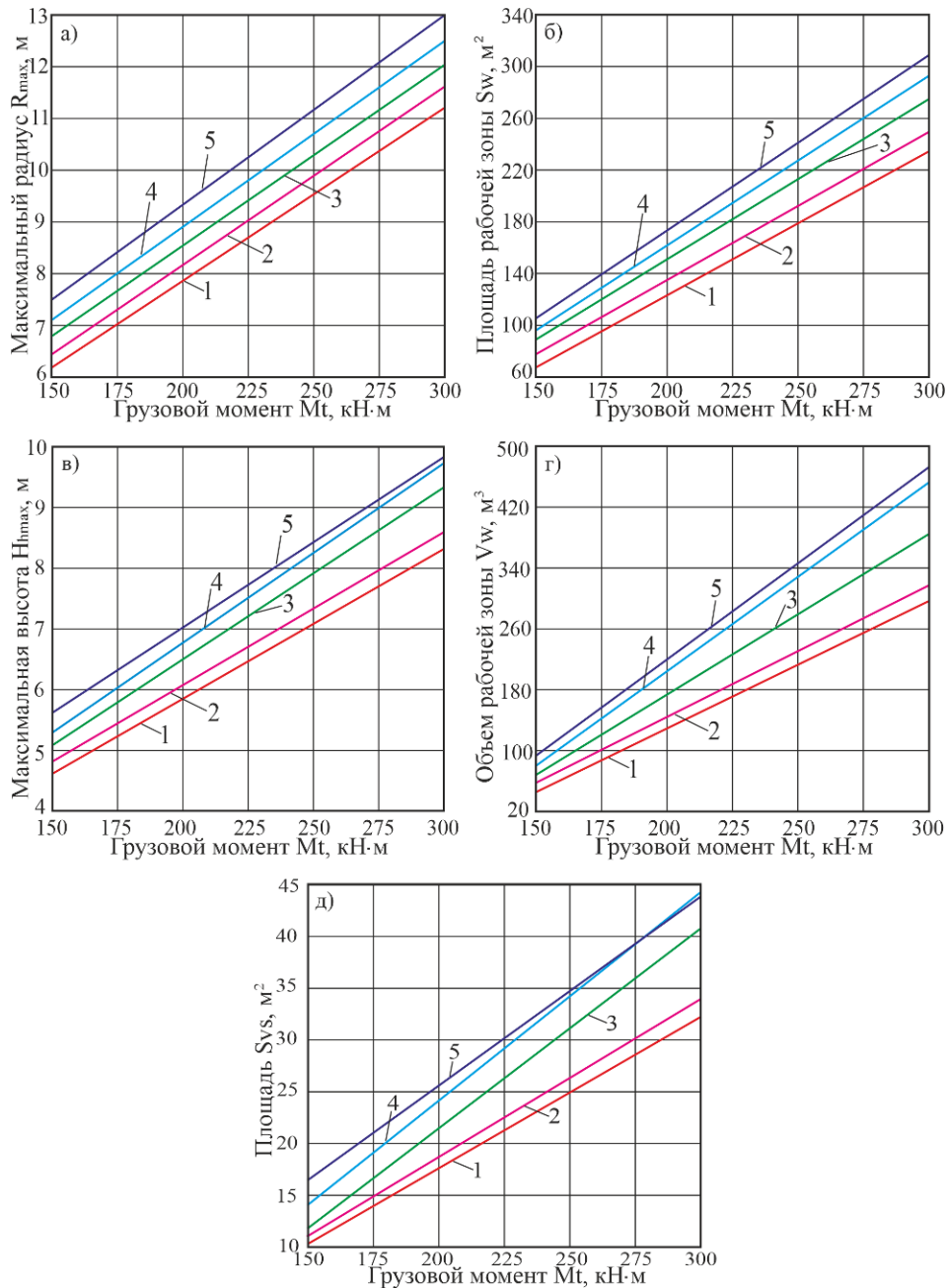


Рис. 3. Влияние грузового момента манипулятора и веса хлыста на характеристики рабочей зоны харвестера при поперечном габарите  $D_h = 2,6$  м: а – максимальный радиус рабочей зоны; б – площадь рабочей зоны; в – максимальная высота от поверхности грунта; г – объем рабочей зоны; д – площадь области требуемого нахождения дерева (1 –  $G_{tr} = 8$  кН; 2 –  $G_{tr} = 7$  кН; 3 –  $G_{tr} = 6$  кН; 4 –  $G_{tr} = 5$  кН; 5 –  $G_{tr} = 4$  кН)

го габарита харвестера повышает поперечную устойчивость машины на склоне, так как его более широкая база снижает вероятность опрокидывания. Харвестер с большим поперечным габаритом может охватить большую площадь области требуемого нахождения спиливаемого дерева  $S_w$  за один проход. Для харвестера базового класса с грузовым моментом  $[M_t] = 225$  кН·м увели-

чение поперечного габарита на 0,97 м увеличивает максимальный радиус на 0,4 м (%), площадь рабочей зоны - на 5 м<sup>2</sup> (на 3...4%) и объем рабочей зоны - на 10 м<sup>3</sup> (рис. 4).

При неизменных геометрических и весовых характеристиках звеньев манипулятора с увеличением поперечного габарита харвестера должно происходить пропорциональное увеличение грузового момента  $[M_t]$

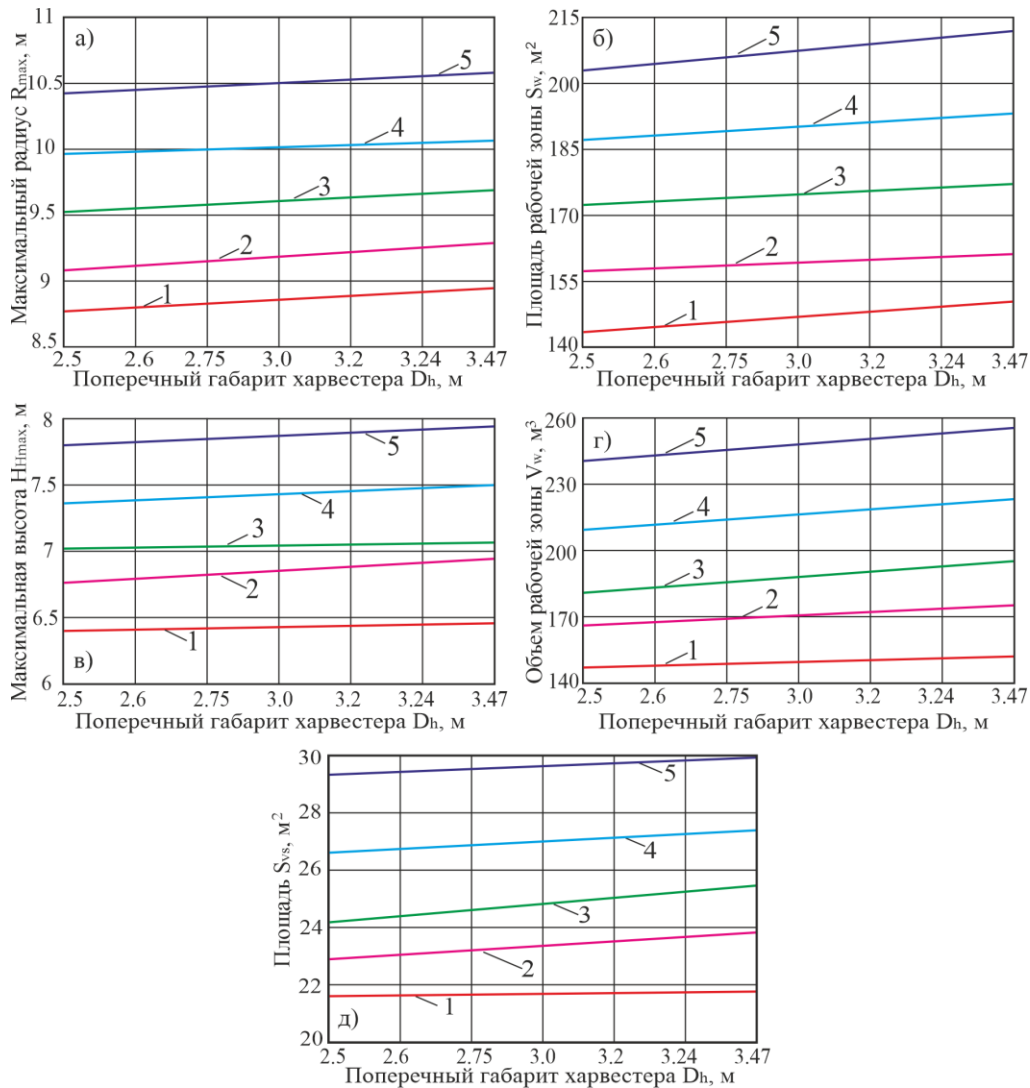


Рис. 4. Влияние поперечного габарита харвестера на характеристики рабочей зоны при постоянном значении грузового момента манипулятора  $[M_t] = 225$  кН·м: а – максимальный радиус рабочей зоны; б – площадь рабочей зоны; в – максимальная высота от поверхности грунта; г – объем рабочей зоны; д – площадь области требуемого нахождения дерева (1 –  $G_{tr} = 8$  кН; 2 –  $G_{tr} = 7$  кН; 3 –  $G_{tr} = 6$  кН; 4 –  $G_{tr} = 5$  кН; 5 –  $G_{tr} = 4$  кН)

вследствие увеличения расстояния между положением центра тяжести системы «харвестер – манипулятор – харвестерная головка» и ребром опрокидывания, приблизительно проходящего вдоль внешних боковых сторон колес харвестера. В частности, для проведенных расчетов определяемый таким образом грузовой момент изменялся в диапазоне от 216,3 кН·м при поперечном габарите  $D_h = 2,5$  м до 300 кН·м при поперечном габарите  $D_h = 3,47$  м. На рис. 5 показано влияние поперечного габарита харвестера на характеристики его рабочей зоны при синхронном изменении грузового момента манипулятора

$[M_t]$  в диапазоне 216,3...300 кН·м. Видно, что увеличение поперечного габарита харвестера приводит к пропорциональному росту всех расчетных характеристик рабочей зоны вследствие возрастания величины грузового момента, допустимого для безопасного манипулирования спиленным деревом в процессе лесозаготовительных работ на лесосеке. И в этом случае, сравнивая графики на рис. 4 и 5, видно более существенное влияние увеличения поперечного габарита харвестера на увеличение геометрических характеристик рабочей зона. В частности, площадь  $S_w$  оптимальной области требуемого

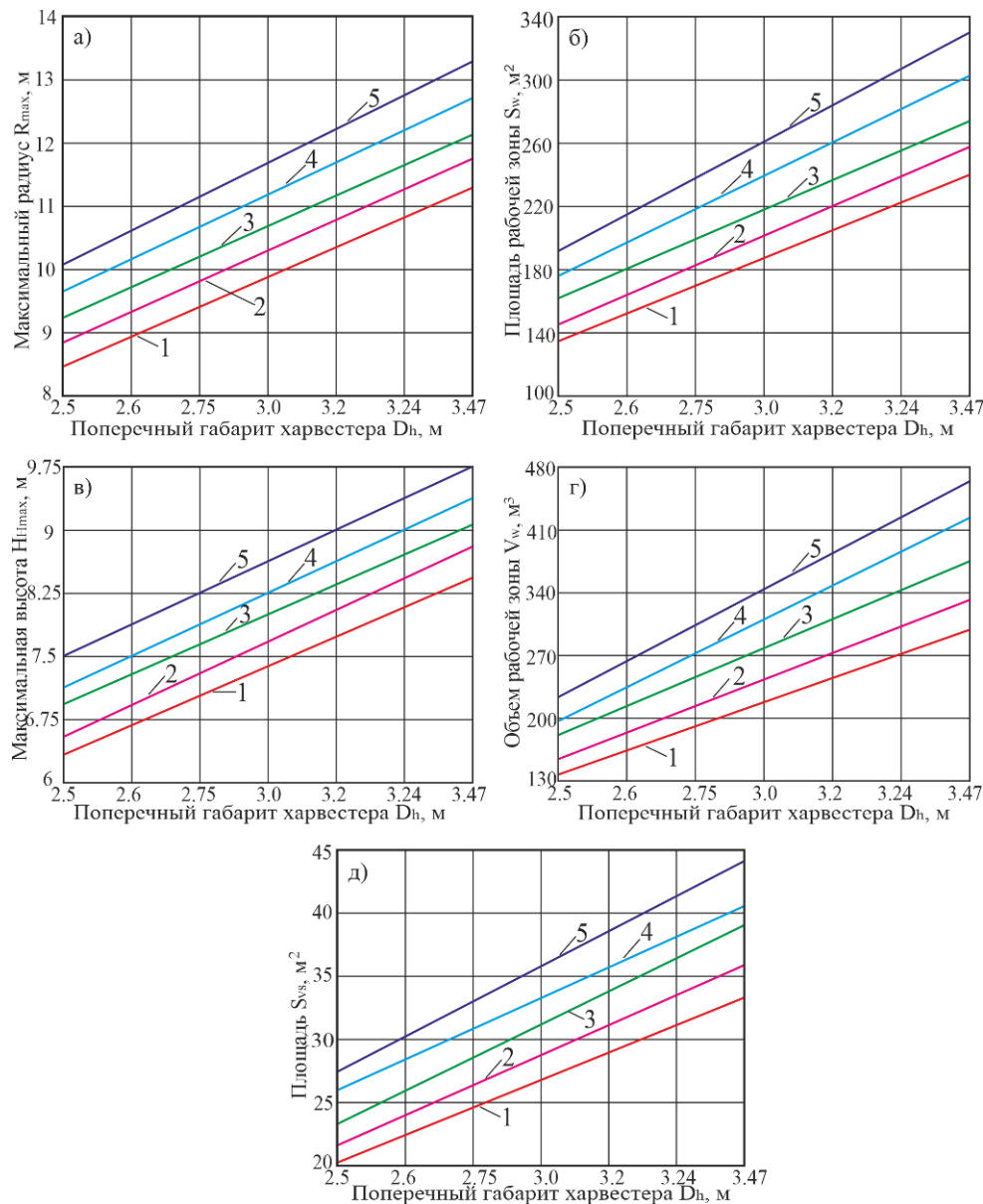


Рис. 5. Влияние поперечного габарита харвестера на характеристики рабочей зоны при переменном значении грузового момента манипулятора  $[M_t] = 216,3 \dots 300$  кН·м:

а – максимальный радиус рабочей зоны; б – площадь рабочей зоны; в – максимальная высота от поверхности грунта; г – объем рабочей зоны; д – площадь области требуемого нахождения дерева (1 –  $G_{lr} = 8$  кН; 2 –  $G_{lr} = 7$  кН; 3 –  $G_{lr} = 6$  кН; 4 –  $G_{lr} = 5$  кН; 5 –  $G_{lr} = 4$  кН)

нахождения спиливаемого дерева возрастает приблизительно в 1,7 раза.

Увеличение собственного веса харвестера приводит к увеличению допустимого грузового момента манипулятора  $[M_t]$  и, таким образом, благоприятно сказывается на повышении поперечной устойчивости харвестера против опрокидывания в процессе манипулирования спиленным деревом. На рис. 6 показано влияние изменения собственного веса харвестера на геометрические характе-

ристики его рабочей зоны в пределах диапазона относительных значений веса  $\bar{G}_h = 0,7 \dots 1,3$  относительно расчетного харвестера с  $\bar{G}_h = 1$ , в качестве которого использовался харвестер с грузовым моментом  $[M_t] = 225$  кН·м, поперечным габаритом  $D_h = 2,6$  м и собственным весом  $G_h = 17,3$  кН. Видно, что увеличение собственного веса харвестера приводит к пропорциональному росту всех расчетных характеристик рабочей зоны



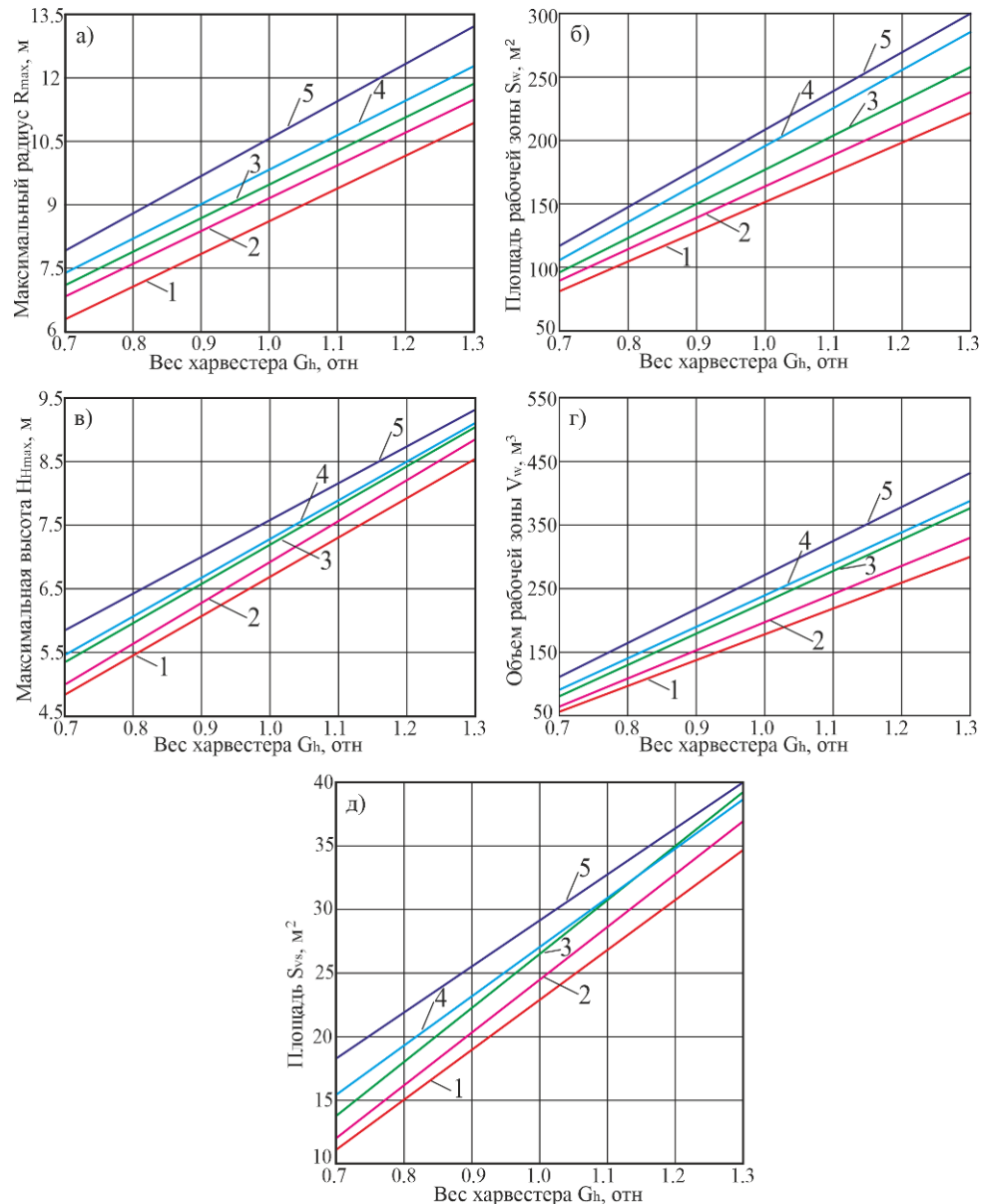


Рис. 6. Влияние относительного веса харвестера на характеристики рабочей зоны при его поперечном габарите  $D_h = 2,6$  м и грузовом моменте манипулятора  $[M_t] = 225$  кН·м:  
 а – максимальный радиус рабочей зоны; б – площадь рабочей зоны; в – максимальная высота от поверхности грунта; г – объем рабочей зоны; д – площадь области требуемого нахождения дерева (1 –  $G_{tr} = 8$  кН; 2 –  $G_{tr} = 7$  кН; 3 –  $G_{tr} = 6$  кН; 4 –  $G_{tr} = 5$  кН; 5 –  $G_{tr} = 4$  кН)

вследствии возрастания величины грузового момента, допустимого для безопасного манипулирования спиленным деревом в процессе лесозаготовительных работ на лесосеке. Собственный вес харвестера также следует рассматривать как важнейший параметр, определяющий размеры рабочей зоны харвестера, так как при его изменении почти в 1,9 раза (с относительного значения 0,7 до 1,3) площадь  $S_w$  оптимальной области тре-

буемого нахождения спиливаемого дерева возрастает приблизительно в 2,5...2,8 раз.

Собственный вес манипулятора, который складывается из собственного веса его отдельных звеньев, также оказывает заметное влияние на геометрические характеристики рабочей зоны харвестера. Это обусловлено тем, что вес звеньев совместно с их длинами определяют положение центра тяжести системы «манипулятор – харвестерная головка» и, следовательно, определяют величину смещения общего центра тяжести системы

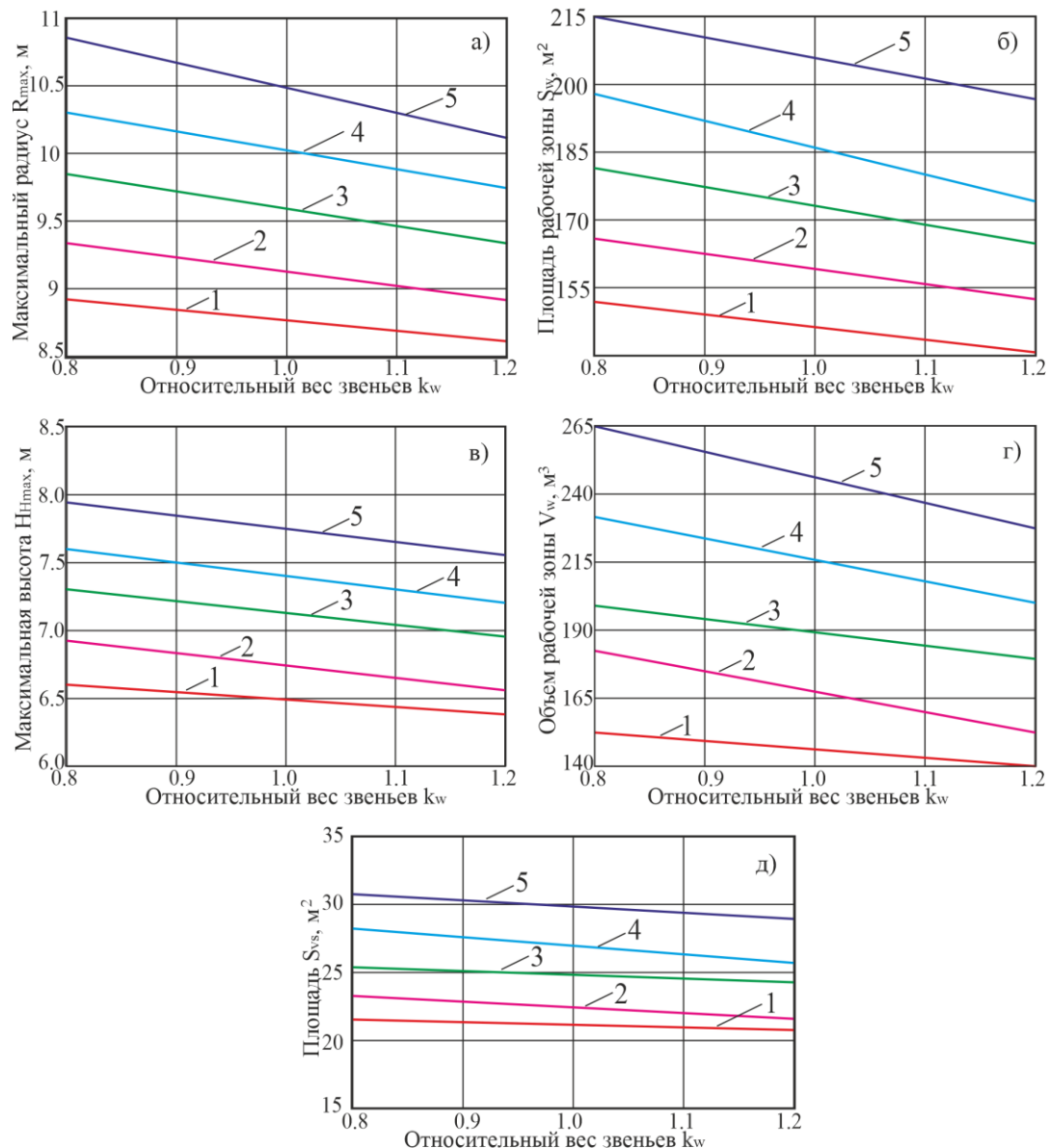


Рис. 7. Влияние относительного веса звеньев харвестера на характеристики рабочей зоны: а – максимальный радиус рабочей зоны; б – площадь рабочей зоны; в – максимальная высота от поверхности грунта; г – объем рабочей зоны; д – площадь области требуемого нахождения дерева (1 –  $G_{tr} = 8$  кН; 2 –  $G_{tr} = 7$  кН; 3 –  $G_{tr} = 6$  кН; 4 –  $G_{tr} = 5$  кН; 5 –  $G_{tr} = 4$  кН)

«харвестер – манипулятор – харвестерная головка» в поперечном направлении относительно продольной оси харвестера, что сказывается на изменении допустимого грузового момента  $[M_t]$  и уровня поперечной устойчивости харвестера. На рис. 7 показано влияние изменения собственного веса звеньев манипулятора на геометрические характеристики рабочей зоны харвестера в пределах диапазона относительных значений веса звеньев  $k_w = 0,8 \dots 1,2$  относительно расчетного харвестера с  $k_w = 1$ , в качестве которого

использовался харвестер с грузовым моментом  $[M_t] = 225$  кН·м, поперечным габаритом  $D_h = 2,6$  м и собственным весом  $G_h = 17,3$  кН. Видно, что увеличение собственного веса звеньев манипулятора приводит к пропорциональному снижению всех расчетных характеристик рабочей зоны вследствие снижения величины грузового момента, допустимого для безопасного манипулирования спиленным деревом в процессе лесозаготовительных работ на лесосеке. Собственный вес звеньев манипулятора в меньшей степе-

ни оказывает влияние на размеры рабочей зоны харвестера, так как при его изменении в 1,5 раза (с относительного значения 1,2 до 0,8) площадь  $S_w$  оптимальной области требуемого нахождения спиливаемого дерева возрастает приблизительно на 10%.

#### 4. Заключение

Проведенный анализ, основанный на использовании оптимизационной модели кинематической схемы четырехзвенного манипулятора харвестера, показал, что ключевыми параметрами, которые в наибольшей степени определяют геометрические характеристики рабочей зоны машины, являются развиваемый манипулятором грузовой момент, собственный вес харвестера и отдельных звеньев манипулятора, поперечный габарит машины и вес обрабатываемого дерева.

#### Список литературы

1. Григорьев И.В., Куницкая О., Рудов С., Каляшов В., Тамби А. Лесозаготовительные машины для работы на склонах // Бюллетень ассоциации «Лестех». 2020. № 1. С. 4-9.
2. Комплексная механизация лесозаготовок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lsdinfo.org/kompleksnaya-mexanizaciya-lesozagotovok> (дата обращения: 16.05.2024).
3. Химич А. В. Особенности механизированной лесозаготовки на склонах // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: мат. Всеросс. научно-практ. конф., Брянск, 26–27 мая 2022 г. Брянск: БГТУ, 2022. С. 199-204.
4. Лагереv И.А., Химич А.В. Перспективы развития транспортно-технологических машин для заготовки леса на склонах // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сб. статей, Екатеринбург, 3 декабря 2021 г. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. С. 64-65.
5. Каляшов В.А., Ань Д.Т., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины на горных лесосеках // ЛесПромИнформ. 2022. №5.

Для повышения значений геометрических характеристик рабочей зоны в процессе проектирования необходимо стремиться к взаимовязанному увеличению таких параметров, как грузовой момент манипулятора, собственный вес и поперечный габарит харвестера.

Одним из направлений конструктивного совершенствования харвестера является снижение собственного веса звеньев манипулятора, которое обеспечивает улучшение геометрических характеристик рабочей зоны. Очевидно, реализация такого подхода требует использования на стадии проектирования манипулятора оптимизации конструкции и определяющих конструктивных размеров поперечных сечений звеньев по критерию минимума их собственного веса с учетом комплекса конструктивных, прочностных и деформационных ограничений.

#### References

1. Grigorev I.V., Kunitskaya O., Rudov S., Kalyashov V., Tambi A. Lesozagotovitelnye mashiny dlya raboty na sklonakh. *Bulleteniy assotsiatsii «Lestekh»*, 2020, No., pp. 4-9. (In Russian)
2. Kompleksnaya mekhanizatsiya lesozagotovok. Available at: <https://lsdinfo.org/kompleksnaya-mexanizaciya-lesozagotovok> (In Russian)
3. 1. Khimich A.V. Features of mechanized logging on slopes. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference “Innovative development of lifting and transport equipment”*. Bryansk, BGTU, 2022, pp. 199-204. (In Russian)
4. Lagerev I.A., Khimich A.V. Prospects for the development of transport and technological machines for logging on slopes. In: *Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference “Innovative development of land transport equipment and technologies”*. Ekaterinburg, UrFU, 2022, pp. 64-65. (In Russian)
5. Kalyashov V.A., An D.T., Grigorjeva O.I. Mashinnaya zagotovka drevesiny na gornyykh le-sosekakh. *LesPromInform*, 2022, No.5. (In Russian)

6. Berkett H., Visser R. Measuring Slope of Forestry Machines on Steep Terrain // *Future Forests Research*. 2012. HTN05-02.

7. Visser R. Stampfer K. Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015. Vol. 36. № 2. P. 321-331.

8. Holzfeind T., Visser R., Chung W., Holzleitner F., Erber G. Development and Benefits of Winch-Assist Harvesting // *Current Forestry Reports*. 2020. № 6. P. 201–209.

9. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // *Forest engineering. Материалы научно-практ. конф.* Якутск: ЯГСХА. 2018. С. 67-71.

10. Лагереv И.А., Химич А.В., Шкурманова С.С. Подходы к имитационному моделированию рабочих процессов канатной лесозаготовительной машины для работы на склонах // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 2. С. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130

11. Химич А.В., Лагереv И.А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 2. С. 159-164. DOI 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164.

12. Химич А.В. Сравнительный анализ вариантов размещения тяговых лебедок машин для лесозаготовки на склонах // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Мат. Междунар. научно-техн. конф., Тюмень, 13–14 апреля 2023 г.* Тюмень: ТИУ, 2023. С. 202-206.

13. Селиверстов А.А. Однозахватные харвестеры // *Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ*. 2005. Вып. 5. С. 98-101.

14. Лаптеv А.В., Матросов А.В. Обоснование конфигурации и геометрических размеров рабочей зоны колесного харвестера // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. 2018. №5. С. 77-85.

15. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Makulina A.V. Reducing the negative environmental

6. Berkett H., Visser R. Measuring Slope of Forestry Machines on Steep Terrain. *Future Forests Research*, 2012, HTN05-02.

7. Visser R. Stampfer K. Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2015, Vol. 36, No.2, pp. 321-331.

8. Holzfeind T., Visser R., Chung W., Holzleitner F., Erber G. Development and Benefits of Winch-Assist Harvesting. *Current Forestry Reports*, 2020, No.6, pp. 201–209.

9. Grigorev I.V., Rudov S.E. Osobennosti ekspluatatsii kolesnykh lesnykh mashin v slozhnykh pochvenno-gruntovykh i releyfnykh usloviyakh. In: *Forest engineering. Materialy nauchno-prakt. konf.* Yakutsk, YaGSKhA, 2018, pp. 67-71. (In Russian)

10. Lagerev I.A., Khimich A.V., Shkurmanova S.S. Approaches to simulation modeling of working processes of a rope logging machine for working on slopes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130 (In Russian)

11. Khimich A.V., Lagerev I.A. The dynamic loading study of a mobile transport and technological machine, placed on a slope. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 159-164. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164 (In Russian)

12. Khimich A.V. Comparative analysis of options for placing traction winches of logging machines on slopes. In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy»*. Tyumen, TIU, 2023, pp. 202-206 (In Russian)

13. Seliverstov A.A. Odnozakhvatnye kharvestery. *Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU*, 2005, No.5, pp. 98-101 (In Russian)

14. Laptev A.V., Matrosov A.V. Obosnovanie konfiguratsii i geometricheskikh razmerov rabochey zony kolesnogo kharvestera. *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik*, 2018, No.5, pp. 77-85 (In Russian)

15. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Makulina A.V. Reducing the negative environmental impact of harvesters on the forest ecosystem dur-

impact of harvesters on the forest ecosystem during logging // Proceeding book of 11 Int. Zeugma Conf. on Scientific Research. Gaziantep, Turkey, March 18-20, 2024. P. 712.

16. Оптимизация геометрических характеристик кинематической схемы гидроманипулятора харвестера / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев, А.В. Макулина. - Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024612783. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 05.02.2024.

17. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 813 p.

18. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. Брянск: Изд-во БГТУ, 2013. 228 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>

ing logging. In: *Proc. Book of 11 Int. Zeugma Conference on Scientific Research*, Gaziantep, Turkey, March 18-20, 2024. P. 712.

16. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Makulina A.V. *Optimizatsiya geometricheskikh kharakteristik kinematoicheskoy ckhemy gidromanipulatoa kharvestera. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Optimization of geometric characteristics of the harvester hydraulic manipulator kinematic scheme. The Certificate on official registration of the computer program], 2024, No. 2024612783 (In Russian)

17. Rao S.S. *Engineering Optimization. Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

18. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 228 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230> (In Russian)