

УДК (UDC) 630.36(075.8)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА  
ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ЛП-19A MOVEMENT IMPROVEMENT OF THE WORKING BODY  
OF THE FELLING AND BULKING LP-19 MACHINEБогданов Е.Н., Полянин И.А., Егоров А.В., Багаутдинов И.Н.  
Bogdanov E.N. , Polyenin I.A. , Egorov A.V., Bagautdinov I.N.Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола, Россия)  
Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation)

**Аннотация.** Разработана математическая модель шарнирно-сочлененного манипулятора валочно-пакетирующей машины типа ЛП-19, позволяющая выявлять законы движения стрелы и рукояти, а также стойки захватно-срезающего устройства в зависимости от объема рабочей жидкости в приводных гидроцилиндрах. На основании результатов математического моделирования разработан способ и средство управления траекторией рукояти, стрелы и захватно-срезающего устройства машины типа ЛП-19 одним комплексным устройством управления, которое обеспечивает движение захватно-срезающего устройства близкого к плоскопараллельному. Выявлены зависимости положения захватно-срезающего устройства в вертикальной плоскости от вылета стрелы и рукояти при использовании и без использования разработанного комплексного устройства управления траекторией рукояти, стрелы и захватно-срезающего устройства. Использование разработанного комплексного устройства управления траекторией рукояти, стрелы и захватно-срезающего устройства машины типа ЛП-19 обеспечивает отклонения от вертикали захватно-срезающего устройства при горизонтальном перемещении стрелы и рукояти в диапазоне от +5 до -11 см. Использование разработанного комплексного устройства управления обеспечивает относительное снижение отклонения от вертикали захватно-срезающего устройства при горизонтальном перемещении стрелы в диапазоне от 150 до 1600% по сравнению с базовой конструкцией машины типа ЛП-19. Экспериментально установлено, что использование разработанного комплексного устройства управления обеспечивает сокращение времени осуществления операции наводки захватно-срезающего устройства машины типа ЛП-19 (изменение вылета стрелы) с 13,2 с до 7,7 с. Экспериментально установлено, что при использовании разработанного комплексного устройства управления среднее время производства одного кубического метра древесины меньше чем у базовой машины, что позволило увеличить производительность на 17 %.

**Abstract.** A LP-19 mathematical model of the felling and bulking LP-19 machine articulated manipulator has been developed, which allows to reveal the laws of movement of the boom and stick, as well as the working body racks depending on the volume of working fluid in the hydraulic cylinders of the boom drive. Based on the results of mathematical modeling, a method and means for controlling the trajectory of the stick, boom and working body is developed by one integrated control device that provides working body movement close to plane-parallel. The dependences of the position of the working body in the vertical plane on the outreach of the boom and handle were revealed when using the developed integrated control device for the trajectory of the handle, boom and working body and without its use. Using the developed integrated device for controlling the trajectory of the handle, boom and working body provides deviations from the vertical working body with horizontal movement of the boom and handle in the range from +5 to -11 cm. Using the developed integrated device for controlling the trajectory of the handle, booms and working body provides a relative reduction in deviation from the vertical of the working body with horizontal boom movement in the range from 150 to 1600% compared with the base felling and bulking LP-19 machine. It has been experimentally established that the use of the developed integrated control device provides a reduction in the time of the guidance operation of the working body (changing the boom outreach) from 13.2 s up to 7.7 s. It was experimentally established that when using the developed integrated control device, the average production time of 1 m<sup>3</sup> of wood is less than that of the base machine, which allowed to increase the productivity of felling and bulking LP-19 machine by 17%.

**Ключевые слова:** плоскопараллельное движение, захватно-срезающее устройство, валочно-пакетирующая машина.

**Дата принятия к публикации:** 12.03.2020  
**Дата публикации:** 25.03.2020

#### Сведения об авторах:

**Богданов Евгений Николаевич** – аспирант кафедры транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
*e-mail: bogdanoven@volgatech.net.*

**Полянин Игорь Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
*e-mail: polyaninia@volgatech.net.*

**Егоров Алексей Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
*e-mail: aleg1976@me.com.*

**Багаутдинов Ильдар Нургаязович** – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
*e-mail: ooobin@mail.ru.*

**Keywords:** plane-parallel movement, gripping-cutting device, feller buncher.

**Date of acceptance for publication:** 12.03.2020  
**Date of publication:** 25.03.2020

#### Authors' information:

**Evgenii N. Bogdanov** – graduate student of the Department “Transport and technological machines” at Volga State University of Technology,  
*e-mail: bogdanoven@volgatech.net.*

**Igor A. Polyinin** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Transport and technological machines” at Volga State University of Technology,  
*e-mail: polyaninia@volgatech.net.*

**Aleksey V. Egorov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Transport and technological machines” at Volga State University of Technology,  
*e-mail: aleg1976@me.com.*

**Idar N. Bagautdinov** – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of the Department "Operation of machines and equipment" at Volga State University of Technology,  
*e-mail: ooobin@mail.ru.*

## 1. Введение

Анализ работ в области плоскопараллельного движения рабочих органов манипуляторных машин показывает, что исследования направлены на разработку новых типов плоскопараллельных манипуляторов, обеспечивающих максимальную скорость выполнения технологических операций [1-5].

Существует большое количество манипуляторных машин (в том числе для заготовки леса), при работе которых плоскопараллельное движение рабочего органа не реализуется. Широкое распространение на лесозаготовках в Российской Федерации получили валочно-пакетирующие машины ЛП-19. Гидравлические системы и конструкции этих машин не обеспечивают синхронную работу гидродвигателей манипуляторов, необходимую для снижения времени технологических операций. Отсутствие технических решений по обеспечению плоскопараллельного движения рабочего органа в значительной степени сдерживает развитие автоматизации технологических операций машины ЛП-19.

Таким образом, настоящая работа является актуальной, так как ее успешная реализация позволит перейти к решению задач автоматизации технологических операций машины ЛП-19.

Объектом исследования является механизм пространственного перемещения рабочего органа (захватно-срезающего устройства) валочно-пакетирующие машины ЛП-19. Цель исследования – улучшение параметров плоскопараллельного движения ее рабочего органа.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель манипулятора машины, позволяющую оценить пространственное перемещение элементов манипулятора при движении рабочего органа, близкого к плоскопараллельному.

2. Выявить зависимости расхода рабочих жидкостей в гидроцилиндрах привода стрелы и рукояти при осуществлении плоскопараллельного движения рабочего органа.

3. Разработать способ и средство управления траекторией движения рукояти и стрелы манипулятора машины ЛП-19 одним комплексным устройством (джойстиком),

обеспечивающим реализацию плоскопараллельного движения рабочего органа.

4. Обосновать сокращение времени рабочего цикла наводки и подтягивания спиленного дерева при использовании средства управления траекторией движения рукояти и стрелы одним комплексным устройством, обеспечивающего движение рабочего органа близкого к плоскопараллельному.

## 2. Расчетная схема машины

Решение задачи обеспечения плоскопараллельного движения рабочего органа валочно-пакетирующей машины ЛП-19 может потребовать дополнительного нагружения насосной станции машины. Поэтому необходимо найти возможности использования перетоков рабочей жидкости между полостями приводных гидроцилиндров при совершении рабочих операций в целях обеспечения плоскопараллельного движения рабочего органа. Для этого необходимо разработать математическую модель изменения пространственного положения элементов манипулятора и определить количество рабочей жидкости вытесняемой и всасываемой приводными гидроцилиндрами.

На рис. 1 представлена исходная расчетная схема с нанесенной расчетной сеткой и исходными осями. Преобразуем ее в эквивалентную схему (рис. 2), которая позволит осуществить математическое моделирование плоскопараллельного движения захватно-срезающего устройства.

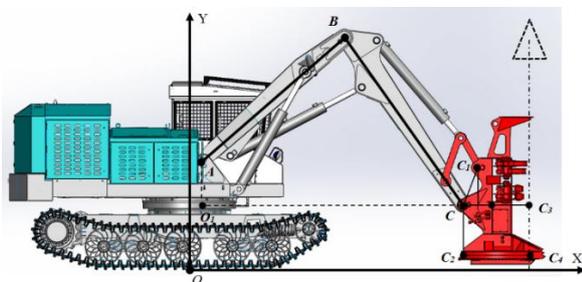


Рис. 1. Исходная расчетная схема валочно-пакетирующей машины ЛП-19

Плоскопараллельное движение рабочего органа характеризуется постоянством положения угла наклона рабочего органа

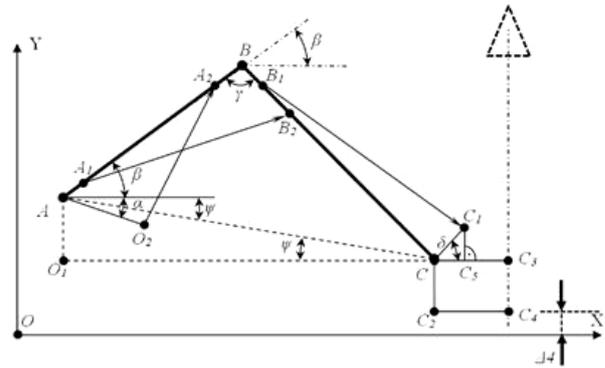


Рис. 2. Эквивалентная расчётная схема валочно-пакетирующей машины ЛП-19

( $\angle \delta = \text{const}$ ,  $\Delta CC_1C_5$  и  $\square CC_2C_4C_3$ ). Таким образом, зная траекторию движения точки С и ее величину, в процессе изменения вылета манипулятора с минимального значения до максимального от оси поворота платформы, необходимо определить изменения длин гидроцилиндров стрелы ( $\Delta 1$ ), рукояти ( $\Delta 2$ ) и рабочего органа ( $\Delta 3$ ) (рис. 3).

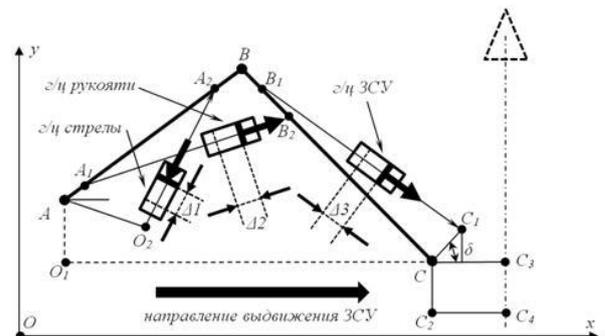


Рис. 3. Схема работы гидроцилиндров при выдвигении рабочего органа

Таким образом, необходимо решить обратную задачу по известной величине вылета манипулятора и кинематическим параметрам. Эти величины взаимосвязаны с расходами жидкости в гидроцилиндрах, что позволяет определить количество рабочей жидкости, вытесняемой и всасываемой приводными гидроцилиндрами манипулятора.

## 3. Математическое моделирование

В расчетной схеме (рис. 2) плоскопараллельного движения рабочего органа известными величинами являются:

1) Длины звеньев:  $AB$  – стрела;  $BC$  – рукоять;  $AB$  – стрела;  $\Delta CC_1C_5$  и  $\square CC_2C_4C_3$ ; и дру-

гие геометрические параметры звеньев по рис. 2;

- 2) высота пня спиленного дерева  $\Delta 4$ ;
- 3) начальные величины углов  $\beta$ ,  $\gamma$ ;
- 4) угол положения гидроцилиндра стрелы манипулятора  $\alpha$ .

Переменными (искомыми) величинами являются:

- 1) углы положения стрелы  $\beta$  и рукояти  $\gamma$ ;
- 2) длины (вылет) гидроцилиндров стрелы ( $\Delta 1$ ), рукояти ( $\Delta 2$ ) и захватно-срезающего устройства ( $\Delta 3$ ).

Определим зависимости объемов жидкостей в гидроцилиндрах от изменения углов образуемых, стрелой, рукоятью, рабочим органом. Из рис. 3 видно, что при осуществлении плоскопараллельного движения рабочего органа (в момент наведения на дерево) рассматриваемая схема работает следующим образом. Для увеличения вылета стрелы гидроцилиндры втягиваются, таким образом излишки жидкости из поршневой полости можно использовать для привода других гидроцилиндров манипуляторов. В момент увеличения вылета рукояти и рабочего органа гидроцилиндры выдвигаются, жидкости штоковых полостей которых можно также использовать. Таким образом, выдвигание манипулятора сопровождается выработкой излишек жидкостей в приводных гидроцилиндрах. Появляется возможность их взаимного использования. Уравнивающий объем жидкости, зависимый от величины вылета манипулятора (объем перераспределяемой рабочей жидкости), можно вычислить следующим образом:

$$V = V_{гц.порш.рук.} + V_{гц.порш.зу} - 2V_{гц.порш.стр.}$$

где  $V_{гц.порш.стр.}$ ,  $V_{гц.порш.рук.}$ ,  $V_{гц.порш.зу}$  – объемы поршней приводных гидроцилиндров стрелы, рукояти и рабочего органа.

Таким образом

$$|V| = 0.5S_{пн} \left[ \left( 4A_1B_2^2 - 16A_1B \times BB_2 \sin\left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2}\right) \right)^{0.5} - 2A_1B_2 \right] + 0.5S_{пн} \left[ \left( 4B_1C_1^2 - 16B_1C \times CC_1 \sin\left(\frac{2\beta + 2\gamma - \delta_1 - \delta_2}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\delta_2 - \delta_1}{2}\right) \right)^{0.5} - 2B_1C_1 \right] -$$

$$- S_{пн} \left[ \left( 4AO_2^2 - 16AO_2 \times AA_2 \sin\left(\frac{2\alpha + \beta_1 + \beta_2}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right) \right)^{0.5} - 2A_2O_2 \right],$$

где  $S_{пн}$  – вылет манипулятора.

На рис. 4. представлен график зависимости хода гидроцилиндров стрелы и рукояти от вылета манипулятора. Вылет манипулятора изменяется от минимального до максимального значения. На рис. 5 представлен график изменения объема жидкости в полостях гидроцилиндров стрелы и рукояти в зависимости от вылета манипулятора.

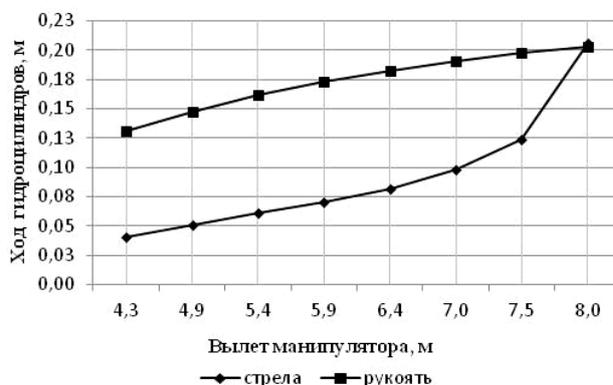


Рис. 4. Зависимость хода гидроцилиндров стрелы и рукояти от вылета захватно-срезающего устройства

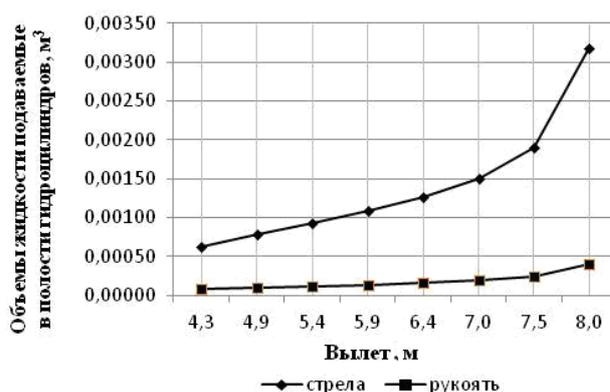


Рис. 5. Зависимость объема жидкости, подаваемой в полости гидроцилиндров вылета стрелы и рукояти, от вылета

Сравнительный анализ показал, что объемы жидкости вытесняемые гидроцилиндром стрелы по объему сопоставимы с объемами, потребляемыми гидроцилиндром привода рукояти на совершение рабочего хода. Таким образом, использование объема жид-

кости, вытесняемого гидроцилиндром стрелы, позволяет избежать дополнительного нагружения насосной станции машины и организовать работу гидравлической системы валочно-пакетирующей машины ЛП-19 таким образом, чтобы обеспечить движение рабочего органа близкого к плоскопараллельному [6, 7].

На рис. 6 представлен дополнительный элемент (дивертор Р6) и его местоположение в гидросистеме валочно-пакетирующей машины ЛП-19, позволяющий организовать движение рабочего органа, близкое к плоскопараллельному.

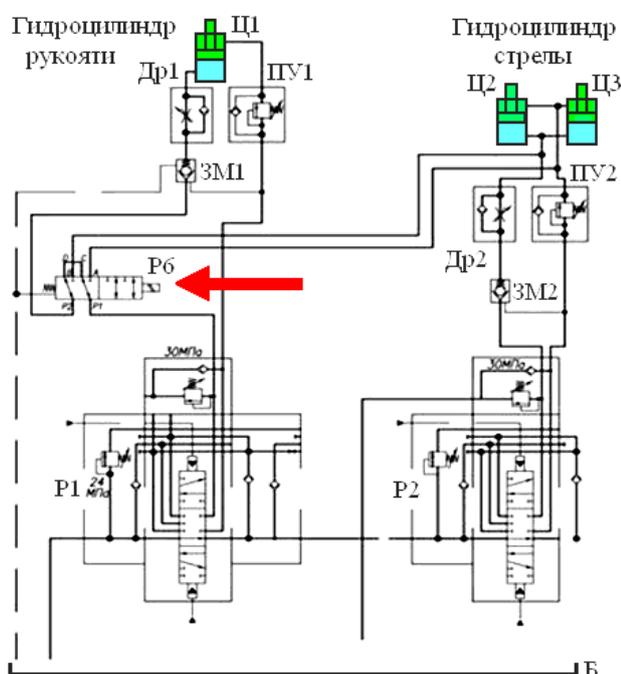


Рис. 6. Схема установки дивертора в гидросистеме машины ЛП-19

#### 4. Экспериментальные исследования

С целью подтверждения результатов теоретических исследований плоскопараллельного движения рабочего органа валочно-пакетирующей машины ЛП-19 и эффективности работы дивертора проведены экспериментальные исследования в сборочном цехе ООО фирма «Лестехком», выпускающего машины рассматриваемого типа.

Для проведения экспериментальных исследований согласно рекомендациям [8, 9]

на площадке был организован стенд (рис. 7, а). Измерения положения элементов стрелы манипулятора и рабочего органа машины выполнялись (рис. 7, б, в):

- по вертикали – с помощью контрастной метрики, нанесенной на торце оси крепления рабочего органа к рукояти;

- по горизонтали – с помощью мерной шкалы, состоящей из расположенных на расстоянии 500 мм мерных индикаторов, установленных на поверхности пола цеха с расположенными.

Выполненные натурные эксперименты позволили оценить пространственное положение рабочего органа.

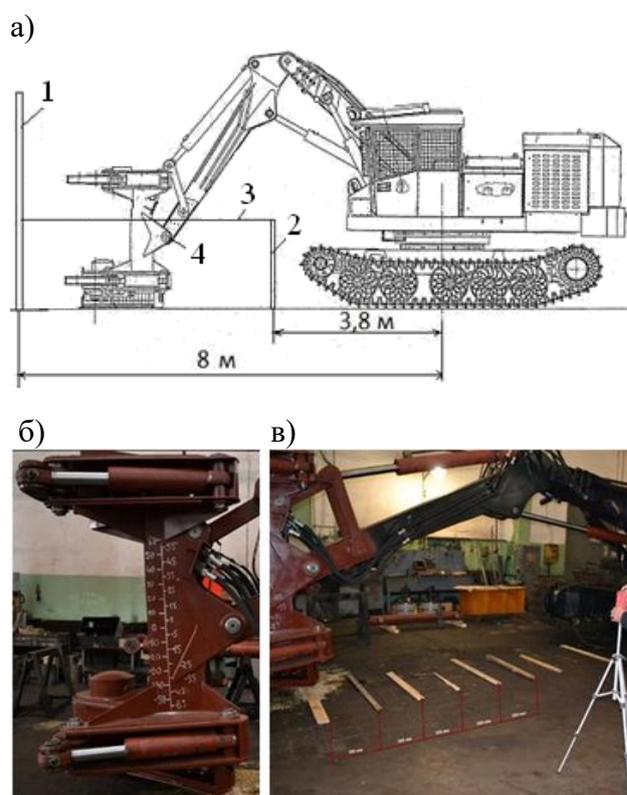


Рис. 7. Экспериментальная установка для исследования работы манипулятора валочно-пакетирующей машины ЛП-19: а – схема экспериментальной установки; б – вертикальная мерная шкала; в – горизонтальная мерная шкала; 1 – шест (длина 4 метра); 2 – стойка (длина 1,5 м); 3 – луч лазерного уровня; 4 – ось крепления рабочего органа машины

Средние результаты измерения зависимости вертикального положения рабочего органа от вылета показаны на рис. 8. Нулевая

соответствует положение рабочего органа на максимальном вылете.

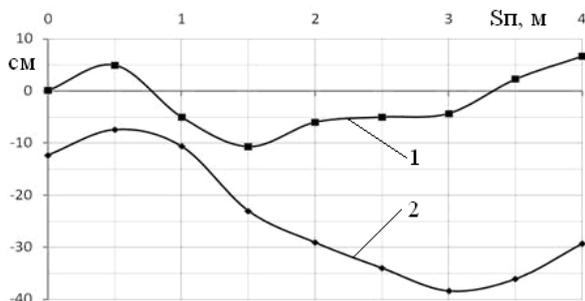


Рис. 8. Зависимость вертикальных перемещений рабочего органа от вылета: 1 – с дивертором; 2 – без дивертора

Уравнение движения рабочего органа (зависимость вертикальной координаты рабочего органа  $y$  от горизонтальной –  $x$ ) в случае использования стандартной гидравлической схемы с достоверностью 99,2% описывается уравнением:

$$y = 0,1191x^6 - 1,0447x^5 + 1,806x^4 + 9,1571x^3 + 37,028x^2 + 27,291x - 12,4.$$

Уравнение движения рабочего органа в случае использования в гидравлической схеме дивертора с достоверностью 98,4% описывается уравнением:

$$y = -1,1384x^6 + 14,825x^5 + 74,014x^4 + 175,64x^3 + 193,24x^2 + 71,817x + 0,0355.$$

При проведении экспериментов фиксировалась длительность выполнения операций наводки и подтягивания спиленного дерева.

Применение дивертора позволило обеспечить сокращение времени осуществления операции наводки рабочего органа (изменения вылета стрелы) с 13,2 с до 7,7 с.

В процессе выполнения экспериментальных исследований первоначально принят и в последствие путем сравнения расчетного и табличного коэффициента Фишера подтвержден нормальный закон распределения измеряемых величин [10]. Статистическая обработка экспериментальных данных с учетом точности применяемых измерительных приборов показала, что для получения достоверных данных необходимо проведение не

менее 7 измерений вертикальных перемещений рабочего органа в каждой точке конечных и промежуточных положений и не менее 7 измерений времени наводки рабочего органа из позиции минимального вылета до позиции максимального вылета.

## 5. Выводы

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. Разработана математическая модель шарнирно-сочлененного манипулятора валочно-пакетирующей машины ЛП-19, позволяющая выявлять законы движения стрелы, рукоятки и стойки рабочего органа в зависимости от объема рабочей жидкости в гидроцилиндрах привода стрелы и рукоятки.

2. На основании результатов математического моделирования разработан способ и средство управления траекторией рукоятки, стрелы и рабочего органа одним комплексным устройством управления, которое за счет использования дивертора обеспечивает движение рабочего органа близкого к плоскопараллельному.

3. Выявлены зависимости положения рабочего органа в вертикальной плоскости от вылета стрелы и рукоятки при использовании и без использования дивертора.

4. Использование дивертора обеспечивает отклонение рабочего органа от вертикали при горизонтальном перемещении стрелы и рукоятки в диапазоне от +5 до –11 см.

5. Использование дивертора обеспечивает относительное снижение отклонения рабочего органа от вертикали при горизонтальном перемещении стрелы в диапазоне от 150 до 1600% по сравнению с базовой конструкцией.

6. Экспериментально установлено, что использование дивертора обеспечивает сокращение времени осуществления операции наводки рабочего органа (изменения вылета стрелы) с 13,2 с до 7,7 с, что обеспечивает увеличение производительности на 17 %.

## Список литературы

1. Круглов В.С., Барман М.А. Валочно-пакетирующая машина ЛП-19. М.: Лесная промышленность, 1982. 288 с.
2. Руководство по эксплуатации валочно-пакетирующей машины ЛП-19А с сервоуправлением, отечественным гидрооборудованием и импортными механизмами передвижения и механизмом поворота. Йошкар-Ола: ООО фирма «Лестехком», 2008.
3. Лагереv А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники. Брянск: БГТУ, 2010. 180 с.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1306614>
4. Лагереv И.А. Сравнительный анализ гидравлических кранов-манипуляторов транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2016. № 3. С. 16-49. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198767>
5. Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980>.
6. Виногоров Г.К. Технологические циклы валочно-пакетирующих машин // Труды ЦНИИМЭ. 1974. № 141. С. 5-15.
7. Багин Ю.И., Ерахтин Д.Д. Гидросистемы лесозаготовительных машин. М.: Лесная промышленность, 1983. 231 с.
8. Пижурин А.А. Методика планирования экспериментов и обработки их результатов при исследовании технологических процессов в лесной и деревообрабатывающей промышленности. Ч.1. М., 1972. 52 с.
9. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.
10. Длин А.М. Математическая статистика в технике. М.: Книга по Требованию, 2013. 468 с.

## References

1. Kruglov V.S., Barman M.A. *Valochno-paketiruyushchaya machina* [Feller Buncher LP-19]. Moscow, Timber industry, 1982. 288 p. (In Russian)
2. *Rukovodstvo po ekspluatatsii valochno-paketiruyushchey machiny LP-19A s servoupravleniem, otechestvennym gidrooborudovaniem i importnymi mekhanizmami peredvidzeniya i mekhanizmom povorota* [Operation manual for feller buncher LP-19A with servo control, domestic hydraulic equipment and imported: movement mechanisms and rotation mechanism]. Yoshkar-Ola, Lestekhkom LLC, 2008. (In Russian)
3. Lagerev A.V. *Nagruzhennost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1306614> (In Russian)
4. Lagerev I.A. Comparative analysis of hydraulic crane-manipulating installations transport and technological machines and industrial robots hydraulic manipulators. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.3, pp. 16-49. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198767> (In Russian)
5. Lagerev I.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BGTU, 2016. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980> (In Russian)
6. Vinogorov G.K. Technological cycles of feller bunchers. *Proceedings of TsNIIME*, 1974, No. 141, pp. 5-15. (In Russian)
7. Bagin Yu.I., Erakhtin D.D. Hydraulic systems of forestry machines. Moscow, Timber industry, 1983. 231 p. (In Russian)
8. Pizhurin A.A. *Metodika planirovaniya eksperimenta i obrabotki ikh rezultatov pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov v lesnoy i derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti. Chast 1* [Methods of planning experiments and processing their results in the study of technological processes in the

‡ forest and woodworking industries. Textbook  
‡ for FPKP and graduate students. Part 1]. Mos-  
‡ cow, 1972. 52 p. (In Russian)

‡ 9. Lagerev I.A., Tarichko V.I.,  
‡ Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experi-  
‡ mental model creation of a mobile ropeway by  
‡ 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik*  
‡ *Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta,*  
‡ 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-  
‡ 9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)

‡ 10. Dlin A.M. *Matematicheskaya statistika*  
‡ *v tekhnike* [Mathematical statistics in technol-  
‡ ogy]. Moscow, Kniga po trebovaniyu, 2013.  
‡ 468 p.