

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМОБИЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА, РЕАЛИЗОВАННАЯ В СРЕДЕ САПР

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**

доктор технических наук, доцент **В.А. Зеликов**

доктор технических наук, доцент **К.А. Яковлев**

аспирант **К.А. Меняйлов**

кандидат технических наук доцент, **М.Л. Шабанов**

кандидат технических наук, доцент **М.Н. Лысыч**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

Статья посвящена проблемам имитационного моделирования рабочего процесса автомобильного крана-манипулятора с применением современных систем автоматизированного проектирования и приложений для инженерных расчетов. В настоящее время для моделирования работы манипуляторной техники преимущественно используются аналитические методы, такие как «ручное» составление и решение уравнений Лагранжа II рода, либо еще более простые оценочные расчеты, основанные лишь на базовых понятиях теоретической механики. Однако подобные объекты состоят из множества деталей, находящихся в сложном поступательном и вращательном движении, контактном взаимодействии друг с другом. Если такие сложные системы моделировать указанными аналитическими методами, приходится вводить целый ряд допущений, которые сильно упрощают математическую модель, и уровень ее адекватности оказывается невысоким. Также в последнее время за рубежом часто используют численные методы моделирования механизмов, которые реализуются через языки программирования, путём детального описания изучаемого процесса. Альтернативой данным методам является использование систем автоматизированного проектирования, в которых численные методы встроены на уровне ядра программы и требуют задания основных геометрических, динамических и кинематических параметров механизма и окружающей среды, после чего позволяют рассчитать параметры функционирования исследуемого объекта. Рассмотрен процесс создания имитационной модели автомобильного крана-манипулятора являющейся аналогом существующей лабораторной установки. Для этого разработана 3D-модель манипулятора в среде САПР SolidWorks. На ее базе создана имитационная модель манипулятора и испытательного стенда, реализованного в САЕ-приложении SOLIDWORKS Motion. Описана методика создания и основные возможности полученной имитационной модели.

**Ключевые слова:** автомобильный кран-манипулятор, имитационное моделирование, САПР, приложения для инженерных расчетов

## CAR MANIPULATOR IMITATION MODEL IMPLEMENTED IN CAD ENVIRONMENT

DSc (Engineering), Professor **P.I. Popikov**

DSc (Engineering), Associate Professor **V.A. Zelikov**

DSc (Engineering), Associate Professor **K.A. Yakovlev**

Post-graduate student **K.A. Meniaylov**

PhD (Engineering), Associate Professor **M.L. Shabanov**

PhD (Engineering), Associate Professor **M.N. Lysych**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",  
Voronezh, Russian Federation

### Abstract

The article is devoted to the problems of simulation of the working process of a truck-mounted crane using modern computer-aided design systems and applications for engineering calculations. Currently, analytical methods are mainly used to model the operation of manipulator technology, such as "manual" compilation and solution of Lagrange equations of the second order, or even simpler evaluative calculations based only on basic concepts of theoretical mechanics. However, such objects consist of many parts that are in a complex rotational motion and contact interaction with each other. If such complex systems are modeled by the indicated analytical methods, one has to introduce a number of assumptions that greatly simplify the mathematical model. The level of its adequacy is low. Also recently, numerical methods for modeling mechanisms that are implemented through programming languages by using a detailed description of the process under study are often used abroad. An alternative to these methods is the use of computer-aided design systems in which numerical methods are built-in at the core level of the program and require setting the basic geometric, dynamic and kinematic parameters of the mechanism and the environment, after which they can calculate the functioning parameters of the object under study. The process of creating a simulation model of a truck mounted crane, which is an analogue of an existing laboratory setup, has been considered. To do this, a 3D model of the manipulator in the SolidWorks CAD environment has been developed. The creation technique and the main features of the obtained simulation model have been described.

**Keywords:** truck mounted crane, simulation, CAD, engineering calculations applications

### Введение

В настоящее время для моделирования работы автотракторных кранов-манипуляторов преимущественно используются аналитические методы, такие как «ручное» составление и решение уравнений Лагранжа II рода, либо еще более простые оценочные расчеты, основанные лишь на базовых понятиях теоретической механики. Однако автотракторные агрегаты состоят из множества деталей, находящихся в сложном поступательном и вращательном движении, контактном взаимодействии друг с другом. Если такие сложные системы моделировать указанными аналитическими методами, приходится вводить целый ряд допущений, которые сильно

упрощают математическую модель, и уровень ее адекватности оказывается крайне низким [1, 2].

В последнее время за рубежом часто используют численные методы моделирования механизмов, которые реализуются через языки программирования, путём детального описания изучаемого процесса. Также применяют современные системы автоматизированного проектирования, в которых численные методы встроены на уровне ядра программы и требуют от ученого задания основных геометрических, динамических и кинематических параметров механизма и окружающей среды, после чего позволяют рассчитать параметры функционирования исследуемого объекта [2, 3, 4].

### Цель исследования

Последовательность создания имитационной модели манипулятора ЛВ-210-02 (рис. 2, а) с применением САПР SolidWorks.

### Материал и методы исследования

На первой стадии создаются отдельные элементы конструкции и задаются материалы, из которых они изготовлены. Это позволяет определить массовые характеристики 3D-моделей. Затем полученные детали компоуются в сборочном чертеже посредством задания характера сопряжения отдельных элементов. Полученная 3D-сборка полностью воспроизводит кинематику реального объекта и может использоваться для кинематических исследований и анимации рабочего процесса (рис. 1).

Вторая стадия – это непосредственное создание имитационной модели. Для этого используются САЕ-приложения, способные не только имитировать движение, но и получать данные о различных кинематических, динамических и силовых характеристиках процесса. Нами была использована программа Motion интегрированная в САПР SolidWorks и обладающая требуемым функционалом.

На рис. 2 представлена имитационная модель манипулятора (б) и стационарная лабора-

торная установка (а), предназначенная для проведения лабораторных исследований дистанционного управления манипулятором [1].

В общем виде процесс создания имитационной модели включает следующие этапы: создание 3D-модели полностью воспроизводящей кинематику и массовые характеристики реального манипулятора; приложение к штокам гидроцилиндров линейных двигателей; приложение к механизму поворота колонны углового двигателя; создание на временной шкале ключевых точек, обеспечивающих включение и выключение двигателей, изменение их скоростей; установка датчиков, фиксирующих требуемые физические параметры процесса (например, силы, возникающие на приложенных двигателях, потребляемая ими мощность, скорости движения звеньев и т.п.).

На рис. 3 приводится скриншот рабочего окна программы SOLIDWORKS Motion во время моделирования рабочего процесса. Для отслеживания изменений в реальном времени выведены некоторые ключевые характеристики.

### Новизна исследования

Новизна предлагаемого подхода к моделированию манипуляторных установок заключается в комплексном применении параметрического 3D-моделирования.



Рис. 1. 3D-модель манипулятора, созданная в среде САПР SolidWorks

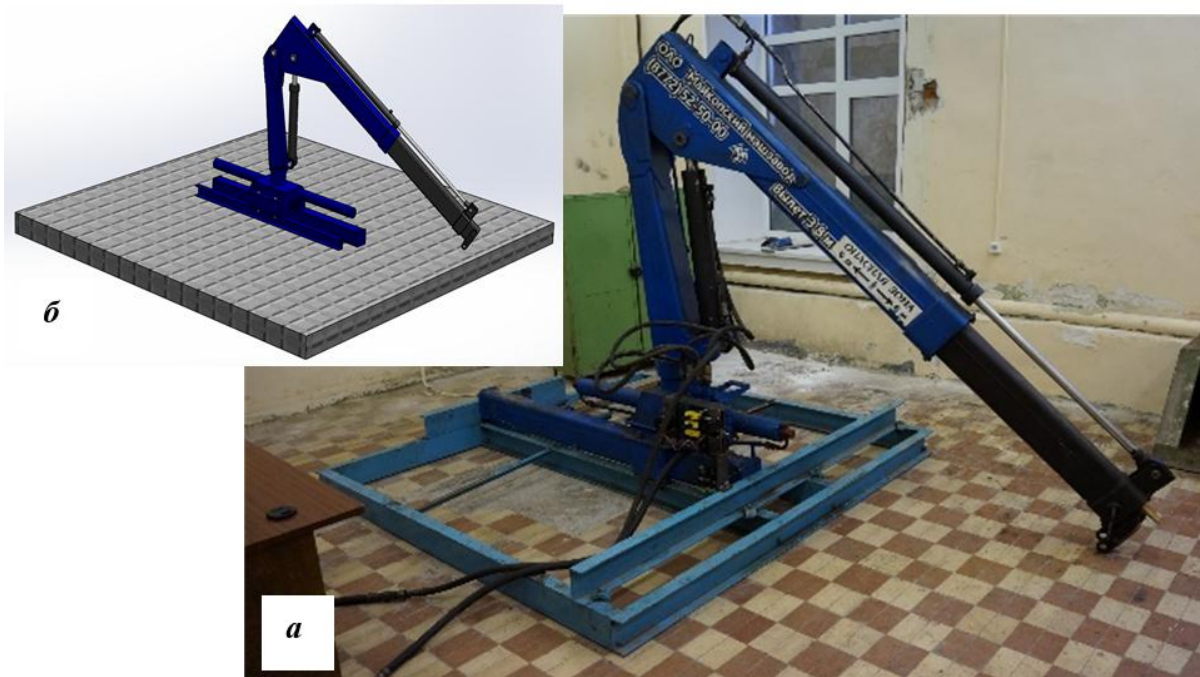


Рис. 2. Автомобильный манипулятор:  
 а – лабораторная установка; б – имитационная модель

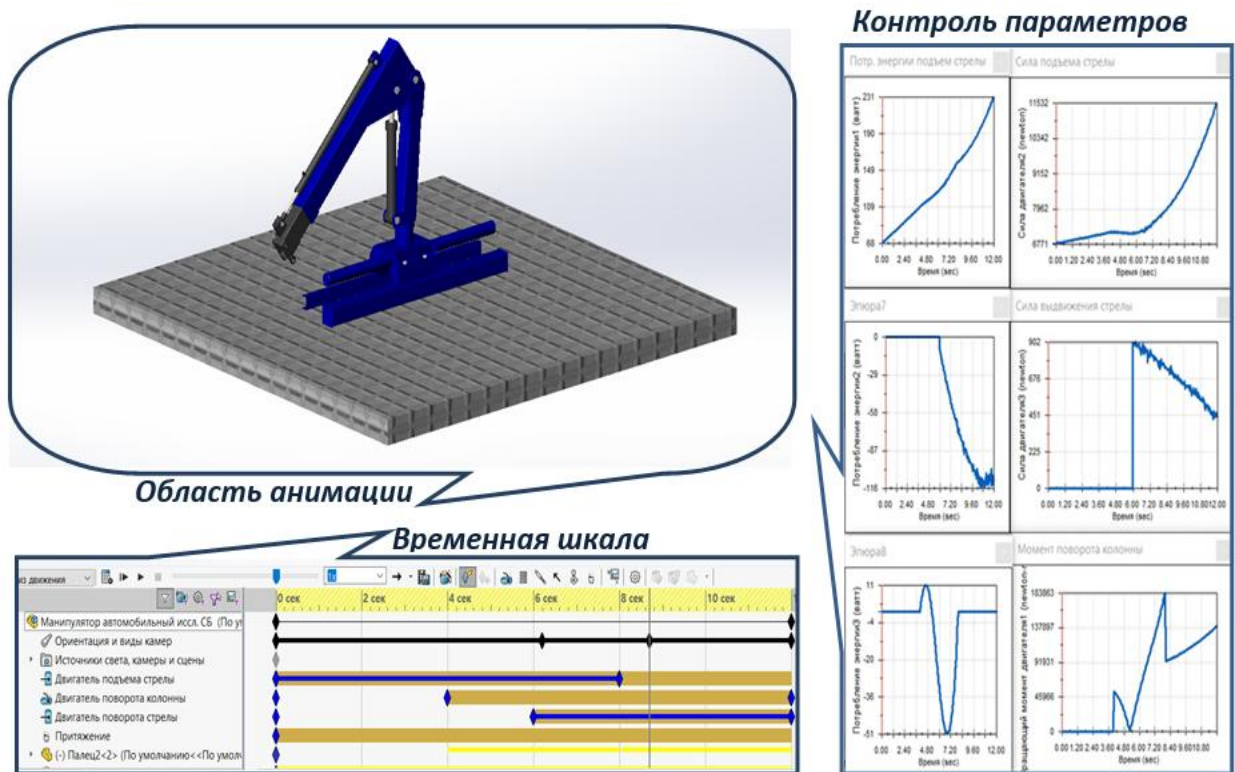


Рис. 3. Рабочее окно САЕ программы SOLIDWORKS Motion во время моделирования рабочего процесса манипулятора на виртуальном стенде

Это позволяет создать не только конструкторскую документацию, но и произвести исследования рабочего процесса с применением САЕ-приложений.

### Результаты исследования

Рассмотренная имитационная модель дает возможность изучить работу манипулятора при различных рабочих режимах и выбрать оптимальные траектории его движения, позволяющие обеспечить максимальную производительность и безопасность рабочего процесса.

Для проверки работоспособности и адекватности предлагаемой имитационной модели был проведен виртуальный эксперимент. В эксперименте моделировалось движение манипулятора по сложной траектории, задачей которого был выход в определенную точку. Для этого осуществлялось параллельное включение двигателей подъема стрелы (0...7,33 с), поворота стрелы (3,65...12 с) и выдвижения стрелы (6...12). Таким

образом обеспечивалось совмещение до 3 операций (временной участок 6...7,33 с) (рис. 4).

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, использование имитационной модели позволяет в режиме реального времени производить оценку динамической нагруженности манипулятора.

Дальнейшим развитием имитационной модели будет установка манипулятора на различные базовые машины и исследование устойчивости агрегата в разнообразных рабочих режимах (работа без аутригиров, с установленными аутригирами и т.п.), в том числе с учетом свойств опорных поверхностей. Также возможно моделирование процесса перемещения грузов разной пространственной конфигурации с использованием различных схем крепления.

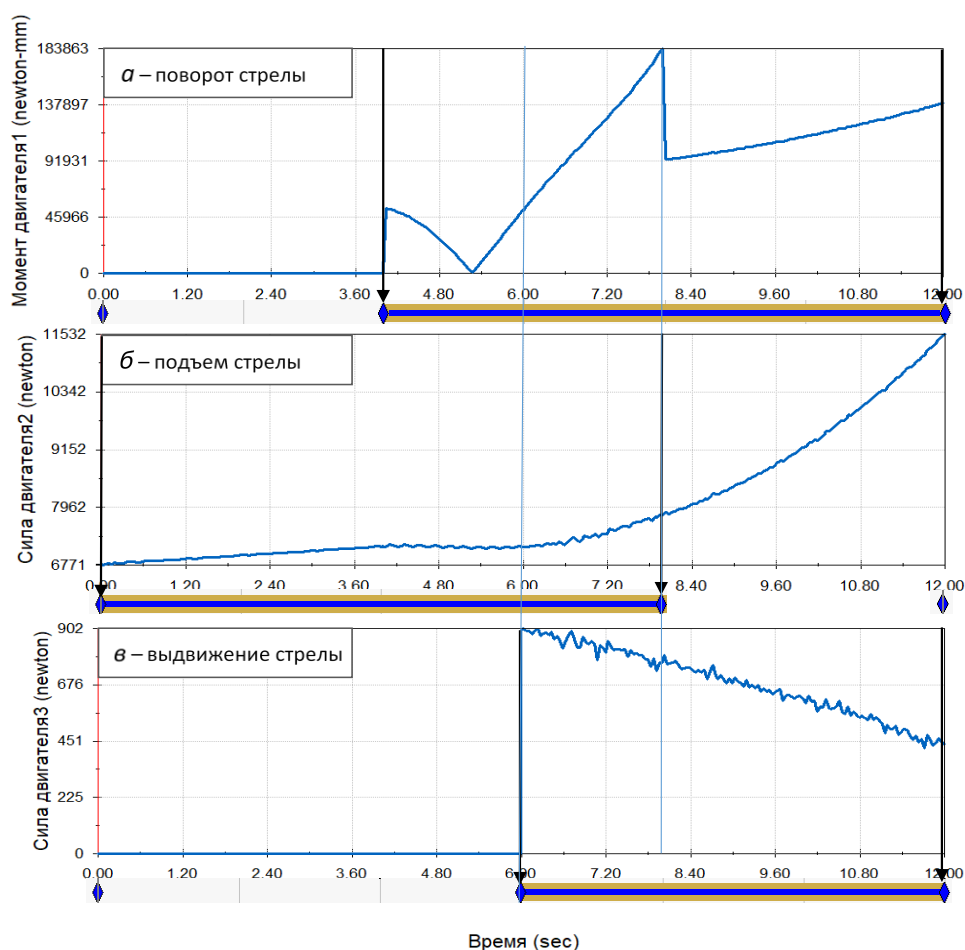


Рис. 4. Графики сил на виртуальных двигателях

Отдельно стоит отметить возможность исследования оптимальных траекторий движения манипулятора на их допустимость с точки зрения динамических нагрузок на элементы конструкции манипулятора, устойчивость агрегата и раскачивание груза.

### Заключение

Таким образом, имитационная модель манипулятора способная полностью воспроизводить кинематику реального манипулятора дает

возможность исследования как отдельных операций (подъем стрелы, выдвижение стрелы, поворот колонны), так и их различных комбинаций. Также важным преимуществом имитационной модели является возможность визуального контроля в реальном времени и наличие функций создания анимации рабочего процесса. Это позволяет оценить правильность работы имитационной модели и проработать оптимальные траектории движения манипулятора.

### Библиографический список

1. Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозного автомобиля с помощью рекуперативного гидропривода / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 131. – С. 100–113. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/131/pdf/54.pdf>.
2. Оптимизация параметров грузоподъемных механизмов автомобильных гидроманипуляторов / Д. Н. Родионов, П. И. Попиков, И. В. Четверикова, С. С. Веневитина // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования: сб. науч. трудов по материалам ежегодных конференций / отв. ред. А. И. Новиков. – Воронеж, 2016. – Т. 3, вып. 2 (5). – С. 278–282.
3. Шеленков, А. Н. Использование 3D моделирования для расчета гидроманипуляторов / А. Н. Шеленков, П. Г. Колесников. // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 3. – С. 56–57.
4. Математическое моделирование процессов в системе гидропривода лесных манипуляторов / П. И. Попиков, П. И. Титов, А. А. Сидоров, С. В. Долженко [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 69. – С. 96–106. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/69/pdf/28.pdf>.
5. Колесников, П. Г. Применение аппарата трёхмерного твердотельного моделирования в САПР "SolidWorks" при расчёте элементов гидроманипуляторов / П. Г. Колесников, Г. Д. Моисеев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2013. – № 18. – С. 148–150.
6. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 4 (370). – С. 108–123.
7. Попиков, П. И. Эффективность применения рекуперативного привода на лесных машинах / П. И. Попиков, Д. В. Обоянцев, К. А. Меняйлов // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 3 (7) – С. 95–98.
8. Смирнов, М. Ю. Результаты экспериментальных исследований продолжительности погрузки и выгрузки лесоматериалов навесными гидроманипуляторами / М. Ю. Смирнов, И. Р. Бакулина // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2008. – № 4. – С. 43–47.
9. Ермалицкий, А. А. Математическое моделирование процессов погрузки пачек сортиментов и хлыстов колесным лесопогрузчиком с гидроманипулятором / А. А. Ермалицкий, Д. В. Клоков, М. Т. Насковец // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2005. – № 11. – С. 8–12.
10. Анализ динамики телескопических гидроманипуляторов лесных машин / В. Ф. Полетайкин, П. Г. Колесников, А. Г. Савельев, Г. Д. Моисеев // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77. – № 12. – С. 41–44.

11. Оценка путей модернизации лесовозного автопоезда, оснащенного гидроманипулятором / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов, А. С. Васильев // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 12-4. – С. 789–794.

12. Сергеев, А. А. Применение гидроманипулятора на грузовом транспортном средстве / А. А. Сергеев // *Наука, техника и образование*. – 2017. – № 1 (31). – С. 55–57.

13. Гольштейн, Г. Ю. Зависимость производительности гидроманипулятора ЛЗМ от изменения параметров гидросистемы / Г. Ю. Гольштейн // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2008. – № 21-3. – С. 188–190.

14. Energy saving of hydraulic drives of machines due to increase of effectiveness of hydraulic cylinders cuffs according to the results of simulation modeling / V. I. Posmetev, I. M. Bartenev, M. A. Malyukova, S. V. Malyukov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering The I International Scientific Practical Conference "Breakthrough Technologies and Communications in Industry"*. 2019.

### References

1. Posmetev V.I., Nikonov V.O. (2017) Improving the efficiency of a logging vehicle with the help of a recuperative hydraulic drive. *Politematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, no. 131. URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/131/pdf/54.pdf> (in Russian).

2. Rodionov D.N., Popikov P.I., Chetverikova I.V., Venevitina S.S. *Optimizaciya parametrov gruzopod'emnyh mekhanizmov avtomobil'nyh gidromanipulyatorov* [Optimization of parameters of load-lifting mechanisms of automobile hydraulic manipulators]. *Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tehnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovaniya: sbornik nauchnyh trudov po materialam ezhegodnyh konferencij* [Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use: collection of scientific papers on the materials of annual conferences]. Voronezh, 2016, vol. 3, vol. 2 (5). pp. 278-282 (in Russian).

3. Shelenkov A.N., Kolesnikov P.G. (2010) *Ispol'zovanie 3D modelirovaniya dlya rascheta gidromanipulyatorov* [The use of 3D modeling for the calculation of hydraulic manipulators]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], no. 3. pp. 56-57 (in Russian).

4. Popikov P.I. et al. (2011) Mathematical modeling of processes in the system of hydraulic drive of forest manipulators. *Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*, no. 69. URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/69/pdf/28.pdf> (in Russian).

5. Kolesnikov P.G., Moiseev G.D. (2013) *Primenenie apparata tryohmernogo tverdotel'nogo modelirovaniya v SAPR [SolidWorks] pri raschyote elementov gidromanipulyatorov* [Application of the apparatus of three-dimensional solid modeling in CAD "SolidWorks" in the calculation of hydraulic manipulator elements]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], no. 18, pp. 148-150 (in Russian).

6. Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. (2019) *Komp'yuternoe modelirovanie rekuperativnogo tyagovo-scepnogo ustrojstva lesovoznogo avtomobilya s pricepom* [Computer simulation of regenerative hitch car hauling trailer]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest journal], no. 4 (370), pp. 108-123 (in Russian).

7. Popikov P.I., Oboyantsev D.V., Menyailov K.A. (2012) *Effektivnost' primeneniya rekuperativnogo privoda na lesnyh mashinah* [Efficiency of recuperative drive application on forest machines]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest Engineering journal], no. 3 (7), pp. 95-98 (in Russian).

8. Smirnov M.U., Bakulina I.R. (2008) *Rezultaty eksperimental'nyh issledovanij prodolzhitel'nosti pogruzki i vygruzki lesomaterialov navesnymi gidromanipulyatorami* [Results of experimental studies of the duration of loading and unloading of timber by hinged hydraulic manipulators]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* –

*Lesnoy Vestnik* [Bulletin of the Moscow state University of forest – Forest Bulletin], no. 4, pp. 43-47 (in Russian).

9. Ermolitskii A.A., Klokov D.V., Neskovic M.T. *Matematicheskoe modelirovanie processov pogruzki pachek sortimentov i hlystov kolesnym lesopogruzchikom s gidromanipulyatorom* [Mathematical modeling of the processes of loading bundles of logs and whips the wheel logger with crane]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of forest complex], 2005, no. 11, pp. 8-12 (in Russian).

10. Poletaykin V.F., Kolesnikov P.G., Savelyev A.G., Moiseev G.D. (2016) *Analiz dinamiki teleskopicheskikh gidromanipulyatorov lesnykh mashin* [Analysis of dynamics of telescopic hydraulic manipulators of forest machines]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction], vol. 77, no. 12, pp. 41-44 (in Russian).

11. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Vasiliev A.S. (2016) *Ocenka putej modernizatsii lesovoznogo avtopoezda, osnashchennogo gidromanipulyatorom* [Estimation of ways of modernization of the timber road train equipped with the hydraulic manipulator]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental researches], no. 12-4, pp. 789-794 (in Russian).

12. Sergeev A.A. (2017) *Primenenie gidromanipulyatora na gruzovom transportnom sredstve* [The use of hydraulic manipulator on a cargo vehicle]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education], no. 1 (31), pp. 55-57 (in Russian).

13. Holstein G.U. *Zavisimost' proizvoditel'nosti gidromanipulyatora LZM ot izmeneniya parametrov gidrosistemy* [Dependence of productivity of hydraulic manipulator LZM from change of parameters of a hydraulic system]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of a forest complex], 2008, no. 21-3, pp. 188-190 (in Russian).

14. Posmetev V.I., Bartenev I.M., Malyukova M.A., Malyukov S.V. (2019) Energy saving of hydraulic drives of machines due to increase of effectiveness of hydraulic cylinders cuffs according to the results of simulation modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering The I International Scientific Practical Conference "Breakthrough Technologies and Communications in Industry"*.

### Сведения об авторах

*Попиков Петр Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

*Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Яковлев Константин Александрович* – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация.

*Меняйлов Константин Александрович* – аспирант кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kos\_menyailov@mail.ru.

*Шабанов Михаил Леонидович* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lpmsis@vglta.vrn.ru.

*Лысыч Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: miklynea@yandex.ru.



### Information about authors

*Popikov Petr Ivanovich* – DSc (Engineering), Professor, Head of Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

*Zelikov Vladimir Anatolyevich* – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of Department of the Organization of Transportations and Safety of the Movement, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Yakovlev Konstantin Aleksandrovich* – DSc (Engineering), Associate Professor, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation.

*Menyaylov Konstantin Aleksandrovich* – the post-graduate student of Department of the Organization of Transportations and Safety of the Movement, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kos\_menyailov@mail.ru.

*Shabanov Mikhail Leonidovich* – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: lpmsis@vglta.vrn.ru.

*Lysych Mikhail Nikolaevich* – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: miklynea@yandex.ru.