

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/12>

УДК 630*4



Прогнозирование изменения кинематических и динамических параметров новой конструкции шнекороторного грунтомета на основе авторской методики

Петр И. Попиков, popikovpetr@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Андрей В. Зленко, 89686763952@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-1090-6874>

Александр Ф. Петков, alexanderpetkoff@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6348-8931>

Виктор П. Попиков, e-mail: vpopikov75@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>

Владимир И. Усков, vum1@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-3542-9662>

Роман Г. Боровиков, borovikov_roman@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Анализ литературных источников показал, что вопросы обоснования параметров конических шнеков для подачи грунтов к роторам метателям изучены недостаточно. Целью исследования является прогнозирование изменения кинематических и динамических параметров новой конструкции шнекороторного грунтомета на основе авторской методики с применением фредгольмовых операторов. В разработанной математической модели рабочего процесса новой конструкции шнекороторного грунтомета уравнение такого вида называется неразрешенным относительно старшей (второй) производной. Если оператор необратим, то задача Коши имеет решение не при всех начальных значениях. Благодаря свойству фредгольмовости, можно применить метод каскадной декомпозиции, заключающийся в том, что данное дифференциальное уравнение и условия раскладываются на соответствующие уравнения и условия в подпространствах уменьшающихся размерностей. Получены зависимости искомых функций и их производные в виде кубических многочленов. С применением программы ЭВМ построены графики функций угла поворота шнекороторного метателя, давления рабочей жидкости в гидроприводе и пути движения лесопожарного агрегата. С помощью математической модели можно установить оптимальные параметры и режимы работы для повышения эффективности рабочего процесса шнекороторного лесопожарного грунтомета при предупреждении и ликвидации лесных пожаров.

Ключевые слова: *шнекороторный грунтомет, гидропривод, метатель, грунт, математическая модель, прогнозирование, рабочий процесс.*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы данной статьи заявляют об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

Для цитирования: Прогнозирование изменения кинематических и динамических параметров новой конструкции шнекороторного грунтомета на основе авторской методики / П. И. Попиков, А. В. Зленко, А. Ф. Петков, В. П. Попиков, В. И. Усков, Р. Г. Боровиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 204–221. – Библиогр.: с. 216–220 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/12>.

Поступила 16.04.2024. Пересмотрена 26.06.2024. Принята 29.06.2024. Опубликовано онлайн 11.11.2024.

Article

Prediction of changes in kinematic and dynamic parameters of a new design of auger soil thrower based on the author's methodology

Petr I. Popikov, popikovpetr@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Andrey V. Zlenko, 89686763952@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-1090-6874>

Alexander F. Petkov, alexanderpetkoff@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8931>

Victor P. Popikov, e-mail: vpopikov75@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>

Vladimir I. Uskov, vum1@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3542-9662>

Roman G. Borovikov, borovikov_roman@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>

Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova, Timiryazeva st., 8, Voronezh, 394087, Russia.

Abstract

An analysis of literary sources showed that the issues of substantiating the parameters of conical augers for supplying soil to the throwing rotors have not been sufficiently studied. The purpose of the study is to predict changes in the kinematic and dynamic parameters of a new design of a rotary auger soil thrower based on the author's methodology using Fredholm operators. In the developed mathematical model of the working process of a new design of auger soil thrower, an equation of this type is called unresolved with respect to the highest (second) derivative. If the operator is irreversible, then the Cauchy problem does not have a solution for all initial values. Thanks to the Fredholm property, it is possible to apply the cascade decomposition method, which consists in decomposing a given differential equation and conditions into corresponding equations and conditions in subspaces of decreasing dimensions. The dependences of the sought functions and their derivatives in the form of cubic polynomials are obtained. Using a computer program, graphs of the functions of the rotation angle of the rotary auger thrower, the pressure of the working fluid in the hydraulic drive and the path of movement of the forest fire unit were constructed. Using a mathematical model, it is possible to establish optimal parameters and operating modes to increase the efficiency of the working process of a rotary auger forest fire soil thrower when preventing and eliminating forest fires.

Keywords: *screw-rotor primer, hydraulic drive, thrower, soil, mathematical model, forecasting, workflow*

Funding: This study received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of the article.

Conflict of interest: the authors of this article declare that there are no personal, commercial, ideological, or intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

For citation: Popikov P. I., Zlenko A. V., Petkov A. F., Popikov V. P., Uskov V. I., Borovikov R. G. (2024) Prediction of changes in kinematic and dynamic parameters of a new design of auger soil thrower based on the author's methodology. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 204-221 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/12>.

Received 16.04.2024. *Revised* 26.06.2024. *Accepted* 29.06.2024. *Published online* 11.11.2024.

Введение

В лесном хозяйстве и других отраслях нашей страны и зарубежных странах существует проблема профилактики и тушения лесных пожаров. Одним

из способов пожаротушения является метание потока грунта грунтометательными машинами на кромку огня. Однако в конструкциях грунтометов не

решены полностью вопросы подачи грунта к роторам-метателям. Наиболее широкое распространение в технологических машинах и оборудовании для перемещения сыпучих и кусковых материалов получили шнековые рабочие органы.

С.М. Ведищевым и др. (2022) [1-2] разработана новая конструкция смесителя сыпучих кормовых компонентов с рабочим органом с винтовыми лопастями. В результате теоретических исследований работы новой конструкции смесителя, выявлено оптимальное количество витков шнекового смесителя с активным каналом обратного хода.

А.И. Завражновым и др. (2021) [3] установлены отношения шага винта к его диаметру принимается в пределах 0,8 – 1,2, а наиболее выгодное соотношение для скольжения сыпучей массы по винтовой поверхности равны 0,6-0,8. Шаг витка дополнительного шнека должен лежать в пределах от 1,0 до 1,2.

О.Е. Шабаетовым и др. (2021) [4] проведены исследования по определению оптимальных параметров шнековых рабочих органов горных комбайнов по критериям минимальных энергозатрат и максимальной производительности.

М.В. Борисовой и др. (2019) [5- 6] получены аналитические зависимости, которые позволяют получить минимальные силы сопротивления материала за счет угла профиля лопастей и ширины лопасти. В результате исследований получены аналитические выражения для определения мощности, производительности и удельных энергозатрат смешивания компонентов. Основными параметрами являются частота вращения шнека, количество лопастей, угол установки лопастей и их ширина. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические зависимости от частоты вращения и количества лопастей.

А.Л. Яблонев и А.М. Гусева (2019) [7] отмечают, что машины для добычи кускового торфа, в которых используется шнековый пресс, обладают высокой энергоемкостью. Поэтому авторами проведено исследование по изучению режимов формования кускового торфа для того, чтобы получить параметры, при которых снижается энергоемкость процесса. В результате исследования установлены ра-

циональные режимы работы шнекового пресса, которые учитывают скорость вращения шнека, диаметр мундштука, а также шаг витков шнека. В результате исследования режимов работы установлено, что минимальная энергоемкость получается при частоте вращения шнека 220...320 мин⁻¹. Интенсивность изменения удельных энергозатрат при уменьшении диаметра мундштука увеличивается. При увеличении шага витка, производительность также увеличивается. Установлен рациональный режим рабочего процесса при частоте вращения 220-320 мин⁻¹, коэффициент напора $k_n = 2,22$, а шаг витка шнека равен половине диаметра шнека.

П.И. Павловым и др. (2019) [8] проведены исследования процесса взаимодействия шнекового рабочего органа с компостом. Выявлены оптимальные режимы работы погрузчика-смесителя при скорости движения 0,05 м/с, частота вращения равна 175-215 мин⁻¹.

И.Я. Ражабовым и др. (2023) [9] проведен теоретический анализ определения применяемой мощности шнекового рабочего органа очистителя хлопка при первичной обработке [9]. Определены силовые факторы рабочего процесса: силы прижатия, силы трения и сопротивления при движении хлопка по шнеку.

И.С. Хасановым и др. (2020; 2021) [10; 11] получены экспериментальные результаты рабочих процессов шнеков, установленных перед ковшем планировщика. В результате экспериментального исследования установлено, что площадь поперечного сечения призмы волочения уменьшается при увеличении скорости движения планировщика от 0,69 до 2,08 м/с. Однако тяговое сопротивление планировщика возрастает. При этом увеличивается производительность планировочного агрегата.

О.В. Абрамовым и др. (2022) [12] предложена перспективная конструкция снегоочистителя с рабочими органами в виде конического шнека и лопастного ротора, которые имеют общую ось вращения и один привод. При высокой частоте вращения металлического аппарата обеспечивается требуемая дальность удаления снега при различной толщине покрова снега при минимальной расходуемой мощности и повышенной производительности.

С.А. Васильев и Н.И. Затылков (2019) [13] предложили технологию обработки почвы на склонах шнековым рабочим органом, который обеспечивает уменьшение смывания плодородного слоя почвы. Получены зависимости ширины борозды от угла наклона витков шнека 15-25 градусов и диаметра витка шнека от 20 см до 60 см. Частота вращения шнека изменялась от 0 до 20 об/с, а скорость движения трактора составляла от 2 до 4,5 м/с, при которых обеспечивается требуемое качество обработки почвы.

А.К. Поздняковым (2022) [14;15] проведен обзор исследований кинематики и динамики шнекового рабочего органа грунтомета-полосопрокладывателя на виртуальном стенде, при этом использовалось 3D-моделирование в среде. Шнековые рабочие органы предназначены для удаления лесной подстилки, чтобы они не попадали в зону огня, так как они являются горючим материалом, поэтому шнековые рабочие органы установлены впереди грунтомета и раздвигают лесную подстилку в сторону, таким образом они не попадают в поток грунта.

М.А.Gnusov и др. (2020) [16] отмечают, что, применяя метод динамики частиц, почва будет состоять из множества сфер диаметром 40-150 мм. При взаимодействии этих шариков с машиной, предназначенной для тушения лесных пожаров, будет возникать сила трения (вязкого и сухого). После проведения ряда экспериментов, было выявлено, что чем больше сферических частиц, тем больше уравнений, что в свою очередь, увеличивает время расчетов. Оптимальными являются сферы диаметром 70 мм. Для построения модели была выбрана машина для однорядного тушения пожаров, в имитационной модели ключевые точки расположили так, чтобы математические выражения для описания агрегата могли быть составлены без затруднений.

М.А.Gnusov и др (2020) [17] выполнили исследования 3D моделей трактора Т-150К, грейдера DZ-122 и форвардера Amkodor 2661-01 с помощью системы 3D-CAD SolidWorks. Также были смоделированы почвообрабатывающие машины различных типов и дополнительные виды оборудования. При проведении тестирования 3D макетов и сравнения различных агрегатов, авторами были выявлены некоторые преимущества и недостатки конструкций.

При установке разбрасывателя тяжелого грунта сзади агрегата происходит смещение центра масс к задней оси, это может привести к сильным вибрациям при передвижении. Более сбалансированным является вариант установки оборудования для рыхления на переднюю навеску, при таком варианте меньше вероятность разбрасывания горючих веществ. На маневренность агрегата может повлиять увеличение его длины и фронтальный монтаж. С помощью специализированных программ на основе разработанных моделей можно оценить размеры и характеристики агрегатов, выбрать наилучшие параметры.

М.А.Gnusov и др (2021) [18] предложили конструкции динамометрических установок. Изучение динамометрии играет большую роль в машиностроении. Для динамометрии можно использовать тензометрические датчики, благодаря которым можно измерять тяговое сопротивление, а также действие различных сил на агрегат. Существуют динамометры, которые позволяют не только измерить действующую силу, но и определить местоположение всех действующих сил и моментов на почвообрабатывающем оборудовании. В результате исследований авторы пришли к выводу, что для достижений наибольшей энергоэффективности почвообрабатывающих агрегатов необходимо использовать объемную динамометрию, позволяющую более углубленно изучить силовые характеристики.

М.А.Gnusov и др (2021) [19] разработан стенд для изучения процесса метания и полета частиц грунта (рисунок 1). Имитационное моделирование позволило значительно уменьшить количество проводимых экспериментов и сэкономить ресурсы.

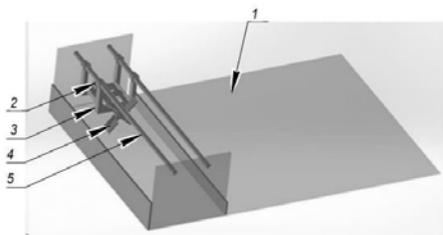


Рисунок 1 - Модель станда для разбрасывания частиц грунта фрезой. 1 - коробка; 2 - шаговый двигатель; 3 - каретка; 4 - фреза-разбрасыватель; 5 - направляющие

Figure 1 - Model of a stand for scattering soil particles with a milling cutter. 1 - box; 2 - stepper motor; 3 - carriage; 4 - cutter-spreader; 5 - guides

Источник: Electromechanical stand for the process of throwing soil with a cutter-thrower / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin, L. D. Bukhtoyarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 29–31 июля 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 1181. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12023. – DOI 10.1088/1757-899X/1181/1/012023.

Source: Electromechanical stand for the process of throwing soil with a cutter-thrower / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin, L. D. Bukhtoyarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 29–31 июля 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 1181. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12023. – DOI 10.1088/1757-899X/1181/1/012023.

При помощи станда можно провести лабораторные исследования, используя различные характеристики рабочего органа. Экспериментально полученные данные в дальнейшем могут использоваться для настройки имитационных моделей.

С. В. Малюков и др. (2019) [20] в результате проведения многофакторной оптимизации рабочих процессов фрезерного рабочего органа грунтомета выявили оптимальные значения длины и ширины лопатки $l_n = 200...230$ мм, $h_n = 180...250$ мм, которые обеспечивают минимальную энергоёмкость.

Для эффективного тушения лесных низовых пожаров дальность метания грунта должна быть не менее 10 метров, а толщина насыпного грунта не менее 6 сантиметров.

П.И. Попиковым и др. (2021) [21] разработана новая конструкция лесопожарной машины с гидроприводом шнеков для удаления горючего напочвенного покрова. Предложена математическая модель и получено аналитическое решение и конечные формулы для определения кинематических и динамических параметры шнековых рабочих органов. В результате имитационного моделирования на виртуальном станде установлены величина крутящего момента 1468,49 Н·м при частоте вращения шнека 400 мин⁻¹. Рациональная частота вращения ротора-метателя должна быть около 500 мин⁻¹, а скорость трактора 2,5 км/ч. Наличие шнека впереди ротора-метателя улучшает качество подготовки почвенного вала перед ротор-метателем.

С. В. Малюков и др. (2023) [22] разработали математическую модель взаимодействия рабочих органов комбинированного орудия с лесной почвой на основе метода динамики частиц. Установлено, что сила сопротивления комбинированного орудия для влажных липких почв в 0,886 раз ниже суммы сил сопротивления отдельных рабочих органов.. Имитационное моделирование проводилось на виртуальном почвенном канале длиной 4 м и шириной 1,2 м, скорость движения рабочего органа составляла 1 м/с, а общее модельное время составляло 3 с.

И.М. Секериным и др. (2023) [23] установлено, что торфяные пожары являются причиной многоочаговых лесных пожаров, поэтому тушение следует начинать с выкорчевывания в очаге горения деревьев и расталкивание горящего торфа слоем до 10 см бульдозером марки Б-10М, при этом сменная производительность составляет от 0,5 до 2,0 га активных очагов лесных торфяных пожаров.

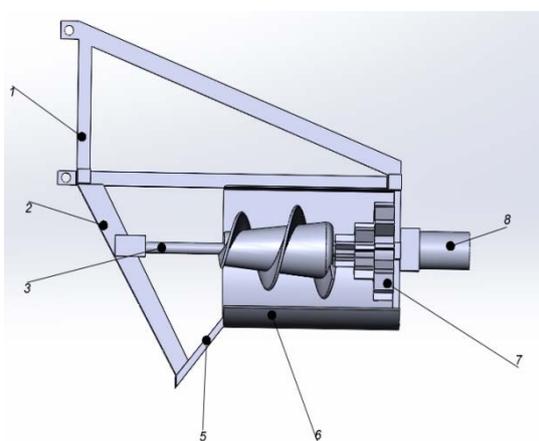
Таким образом проведенный анализ литературных источников, посвященных исследованиям обоснования параметров шнеков для подачи грунтов к роторам-метателям грунтометальных машин, показал, что данные вопросы изучены недостаточно. Поэтому целью исследования является прогнозирование изменения кинематических и динамических параметров новой конструкции шнекороторного

грунтомета на основе авторской методики с применением фредгольмовых операторов.

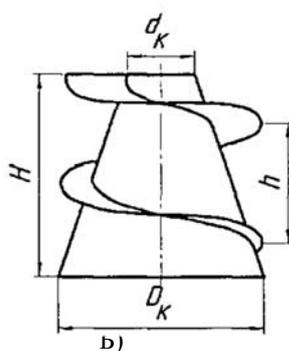
Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектом исследования является разработанная авторами новая конструкция шнекороторного лесопожарного грунтомета (рис. 2). На раме 1 жестко закреплено навесное устройство. В передней части рамы установлены предохранительные ножи 2, на которых смонтирован передний подшипниковый узел вала конического шнека 3. Лоток с лемехом 5 закреплен на кожухе-рыхлителе 6. Ротор-метатель 7 приводится в действие от гидромотора 8.



А)



Б)

Рисунок 2 - Конструктивно-технологическая схема шнекороторного лесопожарного грунтомета (А) и расчетная схема конического шнека (Б)

Источник: собственная композиция авторов

Figure 2 - Design and technological diagram of a rotary auger forest fire ground thrower (A) and design diagram of a conical auger (B)

Source: author's composition

После прибытия к очагу возгорания лесопожарного агрегата в составе колесного трактора типа МТЗ-82 или автомобиля повышенной проходимости и предлагаемого шнекороторного грунтомета, навешенного на заднюю навеску последний опускается из транспортного положения в рабочее и лемех 5 заглубляется в почву. Почвенный пласт поднимается по лотку вверх и подхватывается шнеком 4 и подается по кожуху-рыхлителю 6 к ротору-метателю 7. Во время перемещения почвенного пласта шнеком 4 к ротору-метателю 7 происходит его разрыхление на более мелкие фракции и ротор-метатель затрачивает меньше энергии на метание почвогрунта на кромку огня. Лесопожарный агрегат движется вдоль кромки огня низового лесного или степного пожара и забрасывает огонь почвогрунтом. При встрече с препятствиями в виде пней или крупных порубочных наклонные предохранительные ножи 2 преодолевают препятствие и защищают шнекороторный рабочий орган 4 от поломок. В случае попадания крупных порубочных остатков в шнек и его стопорения срабатывает предохранительный клапан гидромотора 8 и рабочий орган останавливается и поломки не происходит. Удаление постороннего крупного предмета происходит при включении обратного вращения шнека 4. Рабочий режим агрегата подбирается таким образом, чтобы скорость движения и частота вращения ротора-метателя обеспечивали толщину слоя грунта не менее 6 см, достаточную для тушения кромки огня.

Предметом исследования являются закономерности изменения кинематических и динамических параметров новой конструкции шнекороторного грунтомета на основе авторской методики

Дизайн численного эксперимента на основе авторской методики исследования показателей работы шнекороторного лесопожарного грунтомета

Для исследования показателей работы (давления рабочей жидкости и др.) новой конструкции лесопожарного грунтомета, представленного на рис. 2, разработали математическую модель с оригинальным авторским решением:

$$J_{\text{пр}} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\eta_n q_m p}{2\pi \eta_0} - \frac{1}{3} \mu_k \frac{d\varphi}{dt} (R_i^3 - (R_i - h_{\text{мет}})^3) - \left[bh\tau_0 \frac{\cos\beta + 1}{\sin\beta} + \frac{2}{9} b\mu v_0 (\sqrt{9h\tau_0 \mu^{-1} v_0^{-1} + 1} + 1) \cdot \frac{3\cos\beta + 1}{\sin\beta} + b(\rho - \rho_b)g \frac{h^2}{2} \right] \cdot R_{\text{ср}}, \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{K_p} \left(q_n n_m - \frac{q_m}{\pi} \frac{d\varphi}{dt} - a_y p \right), \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\pi(D_k^2 - d_k^2)}{4ab_c} \cdot \frac{B}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \rho \cdot K_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции вращающихся масс рабочего органа к валу гидромотора, кг·м²,

φ – угол поворота шнекороторного рабочего органа, рад.

$M_{\text{вр}}$ – вращающий момент определяется функциональными факторами гидромотора, Нм,

μ_k – коэффициент, определяемый согласованием элементов трёхступенчатого ротора,

R_i – радиус, соответствующей ступени ротора, м,

$h_{\text{мет}}$ – высота выброса грунта из кожуха, м,

μ – вязкость грунта, Пас,

τ – сопротивление грунта сдвигу, Па,

b – ширина резания, в нашем случае режет лопасть, поэтому равна высоте лопасти, м,

β – угол резания, в нашем случае угол, под которым лопасть режет грунт, это угол наклона винтовой лопасти от перпендикуляра к оси шнека, рад,

h – длина перемещения грунта по шнеку (высота ножа в исходной формуле Фрез), м.

Принято допущение на основании предыдущих исследований и наблюдений за процессом разработки грунтов одну треть от ширины резания:

v_0 – скорость резания единичным ножом, м/с,

$$v_0 = \omega R_{\text{ср}},$$

где $R_{\text{ср}}$ – радиус середины винтовой лопасти, м,

p – давление рабочей жидкости, Па,

K_p – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода,

q_n, q_m – рабочие объемы насоса и гидромотора, $\frac{\text{м}^3}{\text{об}}$,

a_y – коэффициент утечек рабочей жидкости,

x – перемещение (путь) трактора грунтометом, м,

D_k – большой диаметр конуса шнека, м,

d_k – малый диаметр конуса шнека, м,

a – величина заглубления скобы кожуха рыхлителя, м,

b_c – ширина захвата скобы кожуха разрыхлителя, м,

B – шаг шнека винта в зоне загрузки, м,

$K_{\text{ш}}$ – коэффициент рабочего пространства наполнения шнека, учитывающий заполнение вала лопастями шнека,

η_n – полный КПД гидромотора,

η_0 –объемный КПД гидромотора.

Для системы уравнений (1)-(3) поставим задачу Коши [23] на промежутке $t \in [0; t_k]$:

$$\begin{aligned} \varphi(0) &= \varphi_0, & \varphi'(0) &= \varphi_1, \\ p(0) &= p_0, \\ x(0) &= x_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для краткости введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} B_{11} &= -\frac{1}{3} \mu_k (R_i^3 - (R_i - h_{\text{мет}})^3), \\ B_{21} &= -\frac{q_m}{K_p \pi}, \\ B_{31} &= \frac{\pi(D_k^2 - d_k^2)}{4ab_c} \cdot \frac{B}{\pi} \cdot \rho \cdot K_{\text{ш}}, \\ C_{12} &= \frac{\eta_n q_m}{2\pi \eta_0}, & C_{22} &= -\frac{a_y}{K_p}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_1$$

$$= - \left[bh\tau_0 \frac{\cos\beta + 1}{\sin\beta} + \frac{2}{9} b\mu v_0 (\sqrt{9h\tau_0 \mu^{-1} v_0^{-1} + 1} + 1) \cdot \frac{3\cos\beta + 1}{\sin\beta} + b(\rho - \rho_b)g \frac{h^2}{2} \right] \cdot R_{\text{ср}},$$

$$f_2 = \frac{q_n n_m}{K_p}$$

система (1)-(3) примет вид:

$$J_{\text{пр}} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = B_{11} \frac{d\varphi}{dt} + C_{12} p(t) + f_1,$$

$$\begin{aligned} 0 &= B_{21} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{dp}{dt} + f_2, \\ 0 &= B_{31} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{dx}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

Запишем задачу (1)-(3), (4) в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \frac{d^2 y}{dt^2} &= \mathcal{B} \frac{dy}{dt} + \mathcal{C} y(t) + f \\ y(0) &= y_0, \quad \frac{dy}{dt}(0) = y_1 \end{aligned}$$

с операторами

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= \begin{pmatrix} J_{np} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{B} = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ B_{21} & -1 & 0 \\ B_{31} & 0 & -1 \end{pmatrix}, \\ \mathcal{C} &= \begin{pmatrix} 0 & C_{12} & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

искомой вектор-функцией

$$y(t) = \begin{pmatrix} \varphi(t) \\ p(t) \\ x(t) \end{pmatrix},$$

и векторами

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad y_0 = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ p_0 \\ x_0 \end{pmatrix}, \quad y_1 = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ p_1 \\ x_1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Значения координат вектора y_0 и координаты φ_1 заданы в начальных условиях (4). Значения координат p_1, x_1 мы найдем далее.

Уравнение вида $\mathcal{A} \frac{d^2 y}{dt^2} = \mathcal{B} \frac{dy}{dt} + \mathcal{C} y(t) + f$ называется неразрешенным относительно старшей (второй) производной. Если оператор \mathcal{A} необратим, то задача Коши имеет решение не при всех начальных значениях. Благодаря свойству фредгольмовости, можно применить метод каскадной декомпозиции, заключающийся в том, что данное дифференциальное уравнение и условия раскладываются на соответствующие уравнения и условия в подпространствах уменьшающихся размерностей.

В данной работе оператор \mathcal{A} при старшей производной задается вырожденной квадратной числовой матрицей, то есть является необратимым. Известно, что такой оператор обладает свойством фредгольмовым.

Задача такого вида с некоторыми операторами $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}$, функцией $f(t)$ и начальными векторами в случае фредгольмова оператора \mathcal{A} , обладающим двумерным ядром решена в работе Ускова В.И. (2023) [24].

Применим результаты этой работы. С помощью леммы 2 (стр. 4) уравнение (1) разрешается относительно старшей производной:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \mathcal{T}_1 \frac{dy}{dt} + \mathcal{T}_0 y(t) + \mathcal{g}(t).$$

С помощью замен

$$\begin{aligned} y(t) &= w_1(t), \\ \frac{dy}{dt} &= w_2(t) \end{aligned}$$

оно сводится к системе

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dt} &= w_2(t), \\ \frac{dw_2}{dt} &= \mathcal{T}_0 w_1(t) + \mathcal{T}_1 w_2(t) + \mathcal{g}(t). \end{aligned}$$

Методами функционального анализа с применением неравенства Коши-Буняковского показано, что оператор

$$\begin{pmatrix} 0 & I \\ \mathcal{T}_0 & \mathcal{T}_1 \end{pmatrix}$$

ограничен, что влечет единственность решения задачи (1)-(4). Оно существует при выполнении условий

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 C_{22} + \varphi_1 B_{21} + f_2, \\ x_1 &= \varphi_1 B_{31}. \end{aligned} \quad ((8))$$

Это решение единственно и определяется из первых трех компонент функции:

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ p_0 \\ x_0 \\ \varphi_1 \\ p_0 C_{22} + \varphi_1 B_{21} + f_2 \\ \varphi_1 B_{31} \end{pmatrix} \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{t^i}{i!} \begin{pmatrix} 0 & I \\ \mathcal{T}_0 & \mathcal{T}_1 \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ p_0 \\ x_0 \\ \varphi_1 \\ p_0 C_{22} + \varphi_1 B_{21} + f_2 \\ \varphi_1 B_{31} \end{pmatrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{t^i}{i!} \begin{pmatrix} 0 & I \\ \mathcal{T}_0 & \mathcal{T}_1 \end{pmatrix}^{i-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{f_1}{J_{np}} \\ \frac{f_1 B_{21}}{J_{np}} \\ \frac{f_1 B_{31}}{J_{np}} \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где

$$\mathcal{T}_1 = \begin{pmatrix} \frac{B_{11}}{J_{np}} & 0 & 0 \\ \frac{B_{11}B_{21}}{J_{np}} & C_{22} & 0 \\ \frac{B_{11}B_{31}}{J_{np}} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{T}_0 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{C_{12}}{J_{np}} & 0 \\ 0 & \frac{B_{21}C_{12}}{J_{np}} & 0 \\ 0 & \frac{B_{31}C_{12}}{J_{np}} & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \frac{f_1}{J_{np}} \\ \frac{f_1 B_{21}}{J_{np}} \\ \frac{f_1 B_{31}}{J_{np}} \end{pmatrix}.$$

Из этой формулы в обозначениях (5) и обозначениях:

$$\sigma_{10} = \varphi_0, \quad \sigma_{11} = \varphi_1, \quad \sigma_{12} = \frac{p_0 C_{12} + \varphi_1 B_{11} + f_1}{2J_{np}},$$

$$\sigma_{13} = \frac{p_0 C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{21} C_{12} + f_2 C_{12}}{6J_{np}} + \frac{p_0 B_{11} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^2 + f_1 B_{11}}{6J_{np}^2},$$

$$\sigma_{14} = \frac{p_0 C_{12} C_{22}^2 + \varphi_1 B_{21} C_{12} C_{22} + f_2 C_{12} C_{22}}{24J_{np}} + \frac{p_0 B_{11} C_{12} C_{22} + p_0 B_{21} C_{12}^2 + 2\varphi_1 B_{11} B_{21} C_{12} + f_1 B_{21} C_{12} + f_2 B_{11} C_{12}}{24J_{np}^2} + \frac{p_0 B_{11}^2 C_{12} + \varphi_1 B_{11}^3 + f_1 B_{11}^2}{24J_{np}^3},$$

$$\sigma_{15} = \frac{p_0 C_{12} C_{22}^3 + \varphi_1 B_{21} C_{12} C_{22}^2 + f_2 C_{12} C_{22}^2}{120J_{np}} + \frac{p_0 B_{11} C_{12} C_{22}^2 + 2p_0 B_{21} C_{12}^2 C_{22} + 2\varphi_1 B_{11} B_{21} C_{12} C_{22} + f_1 B_{21} C_{12} C_{22}}{120J_{np}^2} + \frac{f_2 B_{11} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{21}^2 C_{12}^2 + f_2 B_{21} C_{12}^2}{120J_{np}^2} + \frac{p_0 B_{11}^2 C_{12} C_{22} + 2p_0 B_{11} B_{21} C_{12}^2 + 3\varphi_1 B_{11}^2 B_{21} C_{12} + 2f_1 B_{11} B_{21} C_{12} + f_2 B_{11}^2 C_{12}}{120J_{np}^3} + \frac{p_0 B_{11}^3 C_{12} + \varphi_1 B_{11}^4 + f_1 B_{11}^3}{120J_{np}^4},$$

$$\sigma_{20} = p_0, \quad \sigma_{21} = p_0 C_{22} + \varphi_1 B_{21} + f_2,$$

$$\sigma_{22} = \frac{p_0 C_{22}^2 + \varphi_1 B_{21} C_{22} + f_2 C_{22}}{2} + \frac{p_0 B_{21} C_{12} + \varphi_1 B_{11} B_{21} + f_1 B_{21}}{2J_{np}},$$

$$\sigma_{23} = \frac{p_0 C_{22}^3 + \varphi_1 B_{21} C_{22}^2 + f_2 C_{22}^2}{6} + \frac{2p_0 B_{21} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{11} B_{21} C_{22} + f_1 B_{21} C_{22}}{6J_{np}} + \frac{\varphi_1 B_{21}^2 C_{12} + f_2 B_{21} C_{12}}{6J_{np}} + \frac{p_0 B_{11} B_{21} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^2 B_{21} + f_1 B_{11} B_{21}}{6J_{np}^2},$$

$$\sigma_{24} = \frac{p_0 C_{22}^4 + \varphi_1 B_{21} C_{22}^3 + f_2 C_{22}^3}{24} + \frac{3p_0 B_{21} C_{12} C_{22}^2 + \varphi_1 B_{11} B_{21} C_{22}^2 + f_1 B_{21} C_{22}^2}{24J_{np}} + \frac{2\varphi_1 B_{21}^2 C_{12} C_{22} + 2f_2 B_{21} C_{12} C_{22}}{24J_{np}} + \frac{2p_0 B_{11} B_{21} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{11}^2 B_{21} C_{22}}{24J_{np}^2} + \frac{f_1 B_{11} B_{21} C_{22} + p_0 B_{21}^2 C_{12}^2 + 2\varphi_1 B_{11} B_{21}^2 C_{12} + f_1 B_{21}^2 C_{12} + f_2 B_{11} B_{21} C_{12}}{24J_{np}^2} + \frac{p_0 B_{11}^2 B_{21} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^3 B_{21} + f_1 B_{11}^2 B_{21}}{24J_{np}^3},$$

$$\sigma_{25} = \frac{p_0 C_{22}^5 + \varphi_1 B_{21} C_{22}^4 + f_2 C_{22}^4}{120} + \frac{4p_0 B_{21} C_{12} C_{22}^3 + \varphi_1 B_{11} B_{21} C_{22}^3 + f_1 B_{21} C_{22}^3}{120J_{np}} + \frac{3\varphi_1 B_{21}^2 C_{12} C_{22}^2 + 3f_2 B_{21} C_{12} C_{22}^2}{120J_{np}} + \frac{3p_0 B_{11} B_{21} C_{12} C_{22}^2 + \varphi_1 B_{11}^2 B_{21} C_{22}^2}{120J_{np}^2} + \frac{f_1 B_{11} B_{21} C_{22}^2 + 3p_0 B_{21}^2 C_{12}^2 C_{22} + 4\varphi_1 B_{11} B_{21}^2 C_{12} C_{22} + 2f_1 B_{21}^2 C_{12} C_{22}}{120J_{np}^2} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2f_2 B_{11} B_{21} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{21}^3 C_{12}^2 + f_2 B_{21}^2 C_{12}^2}{120J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad \frac{2p_0 B_{11}^2 B_{21} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{11}^3 B_{21} C_{22}}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & \quad \frac{+ f_1 B_{11}^2 B_{21} C_{22} + 2p_0 B_{11} B_{21}^2 C_{12}^2}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & + \frac{3\varphi_1 B_{11}^2 B_{21}^2 C_{12} + 2f_1 B_{11} B_{21}^2 C_{12} + f_2 B_{11}^2 B_{21} C_{12}}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & \quad + \frac{p_0 B_{11}^3 B_{21} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^4 B_{21} + f_1 B_{11}^3 B_{21}}{120J_{\text{np}}^4}, \\
 & \quad \sigma_{30} = x_0, \quad \sigma_{31} = \varphi_1 B_{31}, \\
 & \quad \sigma_{32} = \frac{p_0 B_{31} C_{12} + \varphi_1 B_{11} B_{31} + f_1 B_{31}}{2J_{\text{np}}}, \\
 & \quad \sigma_{33} = \frac{p_0 B_{31} C_{12} C_{22} + \varphi_1 B_{21} B_{31} C_{12} + f_2 B_{31} C_{12}}{6J_{\text{np}}} + \\
 & \quad + \frac{p_0 B_{11} B_{31} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^2 B_{31} + f_1 B_{11} B_{31}}{6J_{\text{np}}^2}, \\
 & \quad \sigma_{34} = \frac{p_0 B_{31} C_{12} C_{22}^2 + \varphi_1 B_{21} B_{31} C_{12} C_{22} + f_2 B_{31} C_{12} C_{22}}{24J_{\text{np}}} + \\
 & \quad + \frac{p_0 B_{11} B_{31} C_{12} C_{22} + p_0 B_{21} B_{31} C_{12}^2 + 2\varphi_1 B_{11} B_{21} B_{31} C_{12}}{24J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad + \frac{f_1 B_{21} B_{31} C_{12} + f_2 B_{11} B_{31} C_{12}}{24J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad + \frac{p_0 B_{11}^2 B_{31} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^3 B_{31} + f_1 B_{11}^2 B_{31}}{24J_{\text{np}}^3}, \\
 & \quad \sigma_{35} = \frac{p_0 B_{31} C_{12} C_{22}^3 + \varphi_1 B_{21} B_{31} C_{12} C_{22}^2 + f_2 B_{31} C_{12} C_{22}^2}{120J_{\text{np}}} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & p_0 B_{11} B_{31} C_{12} C_{22}^2 + 2p_0 B_{21} B_{31} C_{12}^2 C_{22} + \\
 & + \frac{2\varphi_1 B_{11} B_{21} B_{31} C_{12} C_{22}}{120J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad \frac{f_1 B_{21} B_{31} C_{12} C_{22} + f_2 B_{11} B_{31} C_{12} C_{22}}{120J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad \frac{+ \varphi_1 B_{21}^2 B_{31} C_{12}^2 + f_2 B_{21} B_{31} C_{12}^2}{120J_{\text{np}}^2} + \\
 & \quad \frac{p_0 B_{11}^2 B_{31} C_{12} C_{22} + 2p_0 B_{11} B_{21} B_{31} C_{12}^2}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & \quad \frac{+ 3\varphi_1 B_{11}^2 B_{21} B_{31} C_{12}}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & \quad \frac{2f_1 B_{11} B_{21} B_{31} C_{12} + f_2 B_{11}^2 B_{31} C_{12}}{120J_{\text{np}}^3} + \\
 & \quad + \frac{p_0 B_{11}^3 B_{31} C_{12} + \varphi_1 B_{11}^4 B_{31} + f_1 B_{11}^3 B_{31}}{120J_{\text{np}}^4}
 \end{aligned}$$

запишем искомые функции их производные в виде частичных сумм степенных рядов:

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &= \sigma_{10} + \sigma_{11}t + \sigma_{12}t^2 + \sigma_{13}t^3 + \sigma_{14}t^4, \\
 p(t) &= \sigma_{20} + \sigma_{21}t + \sigma_{22}t^2 + \sigma_{23}t^3 + \sigma_{24}t^4, \\
 x(t) &= \sigma_{30} + \sigma_{31}t + \sigma_{32}t^2 + \sigma_{33}t^3 + \sigma_{34}t^4.
 \end{aligned}$$

Их первые производные равны

$$\begin{aligned}
 \varphi'(t) &= \sigma_{11} + 2\sigma_{12}t + 3\sigma_{13}t^2 + 4\sigma_{14}t^3, \\
 p'(t) &= \sigma_{21} + 2\sigma_{22}t + 3\sigma_{23}t^2 + 4\sigma_{24}t^3, \\
 x'(t) &= \sigma_{31} + 2\sigma_{32}t + 3\sigma_{33}t^2 + 4\sigma_{34}t^3.
 \end{aligned}$$

Их вторые производные равны

$$\begin{aligned}
 \varphi''(t) &= 2\sigma_{12} + 6\sigma_{13}t + 12\sigma_{14}t^2 + 20\sigma_{15}t^3, \\
 p''(t) &= 2\sigma_{22} + 6\sigma_{23}t + 12\sigma_{24}t^2 + 20\sigma_{25}t^3, \\
 x''(t) &= 2\sigma_{32} + 6\sigma_{33}t + 12\sigma_{34}t^2 + 20\sigma_{35}t^3.
 \end{aligned}$$

Анализ данных

С применением программы ЭВМ Maxima построены графики функций угла поворота шнекороторного метателя, давления рабочей жидкости в гидроривводе и пути движения лесопожарного агрегата.

Результаты и обсуждение

Аналитическое выражение и график функции угла поворота шнекороторного рабочего органа $\varphi(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$ будет иметь вид (рис. 3):

$$\varphi(t) \approx 1.72 \cdot 10^{14}t^4 + 5.14 \cdot 10^{11}t^3 - 5.56 \cdot 10^{14}t^2$$

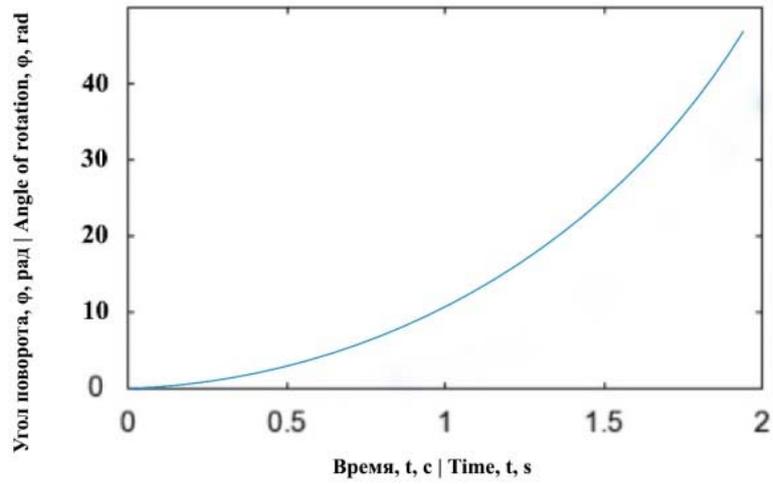


Рисунок 3 - График функции угла поворота шнекороторного рабочего органа $\varphi(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$

Figure 3 - Graph of the rotation angle function of the screw-rotor working body $\varphi(t)$ on the segment $t \in [0; 2]$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Аналитическое выражение и график функции давления рабочей жидкости в гидроприводе шнекороторного рабочего органа $p(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$ имеет вид (рис. 4):

$$p(t) \approx 1.26 \cdot 10^{32}t^4 - 3.83 \cdot 10^{26}t^3 + 8.71 \cdot 10^{20}t^2 + 2.76 \cdot 10^{13}t$$

Аналитическое выражение и график функции движения агрегата $x(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$ имеет вид (рис. 5):

$$x(t) \approx 1.94 \cdot 10^{17}t^4 + 5.79 \cdot 10^{14}t^3 - 6.27 \cdot 10^{17}t^2$$

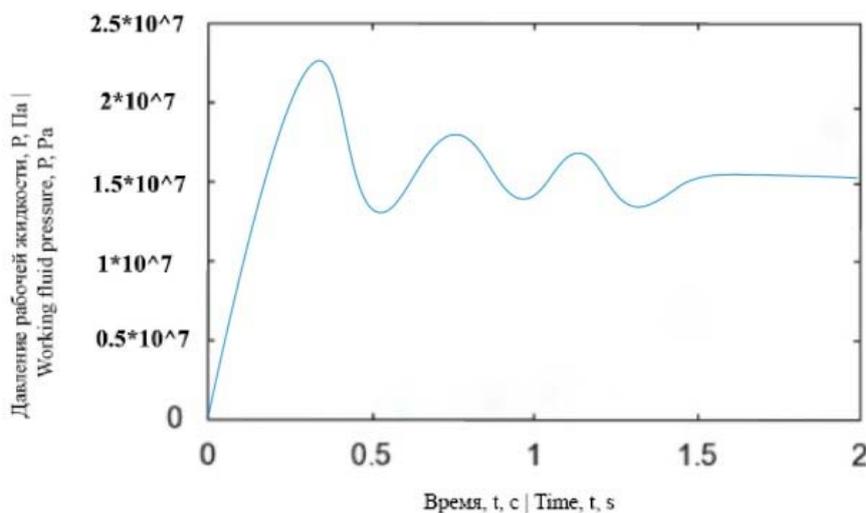


Рисунок 4. График функции давления рабочей жидкости в гидроприводе шнекороторного рабочего органа $p(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$

Figure 4. Graph of the pressure function of the working fluid in the hydraulic drive of the screw-rotor working body $p(t)$ on the segment $t \in [0; 2]$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

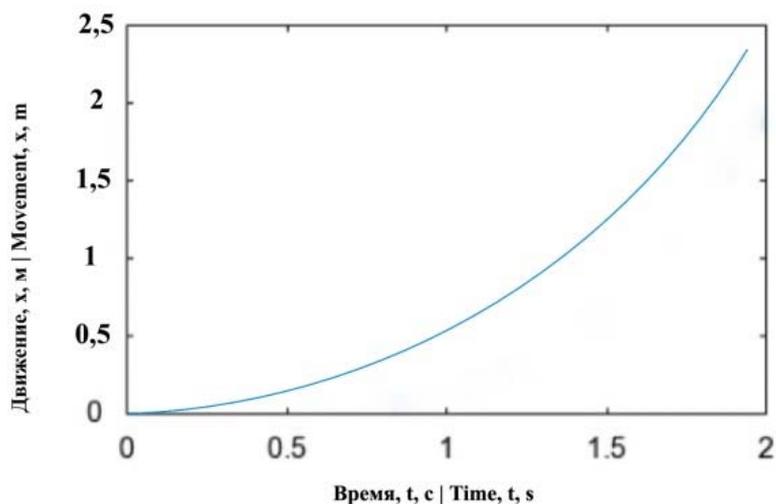


Рисунок 5 - График функции движения агрегата $x(t)$ на отрезке $t \in [0; 2]$.

Figure 5 - Graph of the motion function of the unit $x(t)$ on the segment $t \in [0; 2]$.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Обсуждение

Анализ литературных источников показал, что вопросы обоснования параметров конических шнеков для подачи грунтов к роторам метателям лесопожарных грунтометов изучены недостаточно.

Таким образом, с помощью математической модели можно установить оптимальные параметры и режимы работы для повышения эффективности рабочего процесса шнекороторного лесопожарного грунтомета при профилактике и тушении лесных низовых пожаров.

Заключение

Разработаны новая конструкция шнекороторного рабочего органа и математическая модель его работы. Уравнение такого вида называется неразрешенным относительно старшей (второй) производной. Если оператор необратим, то задача Коши имеет решение не при всех начальных значениях.

Благодаря свойству фредгольмовости, можно применить метод каскадной декомпозиции, заключающийся в том, что данное дифференциальное уравнение и условия раскладываются на соответствующие уравнения и условия в подпространствах уменьшающихся размерностей. Получены зависимости искомых функций и их производные в виде кубических многочленов. С применением программы ЭВМ построены графики функций угла поворота шнекороторного метателя, давления рабочей жидкости в гидроприводе и пути движения лесопожарного агрегата. С помощью математической модели можно установить оптимальные параметры и режимы работы для повышения эффективности рабочего процесса шнекороторного лесопожарного грунтомета при предупреждении и ликвидации лесных низовых пожаров.

Список литературы

1. Ведищев, С. М., Завражнов, А. И., Прохоров, А. В., Кжияхметова, А. А. Определение рационального количества витков шнекового смесителя с активным каналом обратного хода. Наука в центральной России. 2022; 3 (57): 14-23. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48728600>
2. Ведищев, С. М., Кажияхметова, А. А., Бралиев, М. К., Умбеткалиев, А. Н. Определение полезного объема шнекового смесителя рассыпных комбикормов. Наука и образование. 2022; 3-3 (68): 275-289. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54158356>
3. Завражнов А.И., Ведищев, С. М., Бралиев М.К., Кжияхметова, А. А. Исследование влияния конструктивно-режимных параметров смесителя на его показатели. Наука и образование. 2021; 2: 65-72. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44276474>
4. Шабаев, О. Е., Нечепавев В. Г., Зинченко П. П. Обоснование рациональных структуры и параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров. Вестник Донецкого национального технического университета. 2021. 1: 20-28. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47145989>
5. Борисова, М. В., Новиков В.В., Коновалов В.В. Аналитическое описание показателей работы смесителя сыпучих материалов с винтовыми лопастями. Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019; 1: 69-78. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37100648>
6. Борисова М. В., Титов А. Ю., Новиков В. В., Коновалов В. В. Регрессионная модель производительности опорожнения тихоходного смесителя. Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019; 2(50): 103-108. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-103-109.
7. Яблонев А. Л., Гусева А. М. Определение энергоемкости процесса формирования кускового торфа. Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019; 1 (1): 36-45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39562643>
8. Павлов, П. И., Дзюбан, И. Л., Везиров, А. О. Обоснование параметров шнекового погрузчика-смесителя органоминерального компоста. Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2019; 6 (94): 4-9. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-6-4-9.

9. Ражабов, И. Я., Агзамов, М. М., Каримова, М. М. Теоретический анализ определения потребляемой мощности в шнековой части очистителя хлопка. *Endless Light in Science*. 2023; 2-2: 251-260. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50483669>

10. Хасанов И.С., Кучкаров Ж.Ж., Рафаиловна У.Ф. Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сборник научных трудов XV-ой Международной научно-практической конференции 19-20 марта 2020 года. 2020; 321-325. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42627223>

11. Хасанов, И. С., Хикматов, П. Г., Олимов, Х. Х., Януков, Н. В., Камилов, А. И. Экспериментальные результаты установленных шнеков перед ковшом планировщика. *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. 2021; 23: 715-719. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48314937>

12. Абрамов, О. В., Абрамова, И. Н., Лазукин, В. В. Перспективная конструкция снегоочистителя. *Актуальные проблемы науки и техники. Сборник трудов по материалам IX Международного конкурса научно-исследовательских работ*. Уфа: ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». 2022; 21-26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49485930>

13. Васильев, С. А., Затылков, Н. И. Теоретические предпосылки для реализации контурной обработки почвы склоновых земель активным шнековым орудием. *Природообустройство*. 2019; 3: 54-61. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-3-54-61.

14. Поздняков, А. К. Обзор кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа грунтомета-полосопрокладывателя на виртуальном стенде в лесных условиях. *Механика и машиностроение. Наука и практика. Материалы международной научно-практической конференции*. Санкт-Петербург: ИП Жукова Елена Валерьевна, 2022; 111-112. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50075270>

15. Поздняков А.К. Имитационная модель очистки грунта от напочвенного покрова шнековым барабаном лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. В сборнике: *повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием*. 2022; 155-156. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49563490>

16. Gnusov, M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use. *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk*, 04 марта 2020 года. *Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52066. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.

17. Gnusov M.A., Drapalyuk M.V., Lysych M.N. Simulation of layout schemes of soil-throwing machine-tractor units based on articulated load-bearing machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia*, 31 июля 2020 года. *Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32023. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032023.

18. Gnusov, M. A., Lysych M.N., Druchinin D. Yu. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment. *Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 52047. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

19. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Bukhtoyarov L. D. Electromechanical stand for the process of throwing soil with a cutter-thrower. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia*, 29–31 июля 2021 года. *Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering*. Vol. Volume 1181. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12023. – DOI 10.1088/1757-899X/1181/1/012023.

20. Малоюков С. В., Ступников Д. С., Шаров А. В., Ступников А. С. Многофакторная оптимизация параметров фрезерного рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины. Лесотехнический журнал. – 2019. – № 3 (35). – С. 172–179. – Библиогр.: с. 177–179 (14 назв.). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/16.

21. Попиков П. И., Поздняков А. К., Усков В. И., Лысыч М. Н., Гнусов М. А. Математическое моделирование удаления напочвенного покрова шнековыми рабочими органами лесопожарной грунтометательной машины. Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 140–151. – Библиогр.: с. 147–150 (16 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>.

22. Малоюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Шавков М.В., Поздняков Е.В., Петков А.Ф. Метод динамики частиц: моделирование комбинированного почвообрабатывающего орудия, применяемого при лесовосстановлении и защите леса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 215-234. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234.

23. Секерин И.М., Ерицов А.М., Кректунов А.А., Залесов С.В. Эффективный способ тушения торфяных пожаров в зимний период. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023;(245):23-35. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.23-35>

24. Усков В.И. Задача Коши для вырожденного дифференциального уравнения второго порядка в банаховом пространстве. Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2023; 4: 70-80. DOI: 10.26456/vtprmk665.

References

1. Vedishhev, S. M., Zavrazhnov, A. I., Proxorov, A. V., Kzhiyaxmetova, A. A. Opredelenie racional'nogo kolichestva vitkov shnekovogo smesitelya s aktivny'm kanalom obratnogo xoda [Determination of the rational number of turns of a screw mixer with an active return channel]. Nauka v central'noj Rossii = Science in central Russia. 2022; 3 (57): 14-23. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48728600>.

2. Vedishhev, S. M., Kazhiyaxmetova, A. A., Braliev, M. K., Umbetkaliev, A. N. Opredelenie poleznogo ob`ema shnekovogo smesitelya rassy`pny`x kombikormov. [Determination of the useful volume of the screw mixer of loose compound feeds]. Nauka i obrazovanie = Science and education. 2022; 3-3 (68): 275-289. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54158356>

3. Zavrazhnov A.I., Vedishhev, S. M., Braliev M.K., Kzhiyaxmetova, A. A. Issledovanie vliyaniya konstruktivno-rezhimny`x parametrov smesitelya na ego pokazateli. [Investigation of the influence of the design and operating parameters of the mixer on its performance]. Nauka i obrazovanie = Science and Education. 2021; 2: 65-72. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44276474>

4. Shabaev, O. E., Nechepaev V. G., Zinchenko P. P. Justification of the rational structure and parameters of shearers with small diameter augers. Bulletin of Donetsk National Technical University. 2021. 1: 20-28. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47145989>

5. Borisova, M. V., Novikov V.V., Konovalov V.V. Analiticheskoe opisanie pokazatelej raboty` smesitelya sy`puchix materialov s vintovy`mi lopastyami. [Analytical description of the performance indicators of a mixer of bulk materials with screw blades]. Izvestiya Samarskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii = Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2019; 1: 69-78. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37100648>

6. Borisova M. V., Titov A. Yu., Novikov V. V., Konovalov V. V. Regressionnaya model` proizvodi-tel`nosti oporozhneniya tixoxodnogo smesitelya. [Regression model of low-speed mixer emptying performance]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2019; 2(50): 103-108. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-103-109.

7. Yablonev A. L., Guseva A. M. Opredelenie e`nergoemkosti processa formovaniya kuskovogo torfa. [Determination of the energy intensity of the lump peat forming process]. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Texnicheskie nauki = Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. 2019; 1 (1): 36-45. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39562643>

8. Pavlov, P. I., Dzyuban, I. L., Vezirov, A. O. Obosnovanie parametrov shnekovogo pogruzchika-smesitelya organomineral'nogo komposta. [Substantiation of the parameters of the screw loader mixer of organomineral compost]. Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vy'sshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet imeni V.P. Goryachkina" = Bulletin of the Federal State Educational Institution of higher professional education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2019; 6 (94): 4-9. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-6-4-9.

9. Razhabov, I. Ya., Agzamov, M. M., Karimova, M. M. Teoreticheskij analiz opredeleniya potrebyaemoj moshhnosti v shnekovoj chasti ochistitelya xlopka. [Theoretical analysis of determining the power consumption in the screw part of a cotton cleaner]. Endless Light in Science. 2023; 2-2: 251-260. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50483669>

10. Xasanov I.S., Kuchkarov Zh.Zh., Rafailovna U.F. Sovremennye instrumental'nye sistemy, informacionnye tehnologii i innovacii. [Modern tool systems, information technologies and innovations]. Sbornik nauchny'x trudov XV-oy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 19-20 marta 2020 goda = Collection of scientific papers of the xvth International Scientific and Practical Conference on March 19-20, 2020. 2020; 321-325. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42627223>

11. Xasanov, I. S., Xikmatov, P. G., Olimov, X. X., Yanukov, N. V., Kamilov, A. I. Eksperimental'nye rezul'taty ustanovlenny'x shnekov pered kovshom planirovshhika. [Experimental results of installed augers in front of the planner bucket]. Aktual'nye voprosy sover-shenstvovaniya tehnologii proizvodstva i pererabotki produkcii sel'skogo khozyajstva = Current issues of improving the technology of production and processing of agricultural products. 2021; 23: 715-719. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48314937>

12. Abramov, O. V., Abramova, I. N., Lazukin, V. V. Perspektivnaya konstrukciya snegoochistitelya. [Perspective snowplow design]. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. Sbornik trudov po materialam IX Mezhdunarodnogo konkursa nauchno-issledovatel'skix rabot. Ufa: FGKVOU VO «Voennyj uchebno-nauchnyj centr Voenno-vozdushny'x sil «Voenno-vozdushnaya akademiya imeni professora N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina» = Collection of works based on the materials of the IX International Competition of scientific research papers.. Ufa: Federal State Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin". 2022; 21-26. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49485930>

13. Vasil'ev, S. A., Zaty'lkov, N. I. Teoreticheskie predposylki dlya realizacii konturnoj obrabotki pochvy sklonovy'x zemel' aktivny'm shnekovy'm orudiem. [Theoretical prerequisites for the implementation of contour tillage of sloping lands with an active screw tool]. Prirodoobustrojstvo = Nature management. 2019; 3: 54-61. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-3-54-61.

14. Pozdnyakov, A. K. Obzor kinematicheskix i dinamicheskix xarakteristik shnekovogo rabocheho organa gruntometa-polosoprokladyvatelya na virtual'nom stende v lesny'x usloviyax. [Review of the kinematic and dynamic characteristics of the screw working body of a strip-laying grunt on a virtual stand in forest conditions]. Mexanika i mashinostroenie. Nauka i praktika. Materialy mezhdnarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg: Individualnyj predprinimatel' Zhukova Elena Valer'evna = Mechanics and mechanical engineering. Science and practice. Materials of the international scientific and practical conference. St. Petersburg: Individual entrepreneur Zhukova Elena Valeryevna. 2022; 111-112. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50075270>

15. Pozdnyakov A.K. Imitacionnaya model' ochistki grunta ot napochvennogo pokrova shnekovy'm barabanom lesopozharnogo gruntometa- polosoprokladyvatelya. [An imitation model of soil purification from ground cover by a screw drum of a forest fire grunt-strip-laying machine]. V sbornike: povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy Vos'moj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdnarodny'm uchastiem = In the collection: improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. 2022; 155-156. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49563490>

16. Gnusov, M. A. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnodar, March 04, 2020 / Krasnodar Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnodar, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52066. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.

17. Gnusov M.A., Drapalyuk M.V., Lisich M.N. Modeling of layout schemes of tillage machine-tractor units based on articulated load-bearing machines. IOP Conference Series "Materials Science and Engineering", Krasnoyarsk, Russia, July 31, 2020. Krasnoyarsk branch of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations for Science and Technology. Volume 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – page 32023. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032023 .

18. Gnusov M. A., Lisich M.N., Druchinin D. Yu. Volumetric dynamometric installations for laboratory and field tests of tillage equipment. Physical Journal: Conference series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St. Petersburg, 03-06 March 2021. Volume 1889. – Krasnoyarsk: VGD Publishing House, LLC, 2021. – p. 52047. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

19. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Bukhtoyarov L. D. Electromechanical stand for the process of throwing soil with a cutter-thrasher. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnodar, Russia, July 29-31, 2021. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 1181. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12023. – DOI 10.1088/1757-899X/1181/1/012023.

20. Malyukov S. V., Stupnikov D. S., Sharov A.V., Stupnikov A. S. Multifactorial optimization of the parameters of the milling working body of a forest fire ground-sweeping machine. Forestry Journal. – 2019. – № 3 (35). – Pp. 172-179. – Bibliogr.: pp. 177-179 (14 titles). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/16 .

21. Popikov P. I., Pozdnyakov A. K., Uskov V. I., Lysych M. N., Gnusov M. A. Mathematical modeling of removal of ground cover by screw working bodies of a forest fire ground-sweeping machine. Forestry Journal. – 2021. – Vol. 11. – № 3 (43). – Pp. 140-151. – Bibliogr.: pp. 147-150 (16 titles). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>

22. Malyukov S.V., Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Shavkov M.V., Pozdnyakov E.V., Petkov A.F. Method of particle dynamics: modeling of a combined tillage tool used in reforestation and forest protection. Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023; 245: 215-234. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234

23. Sekerin I.M., Eritsov A.M., Krektunov A.A., Zalesov S.V. An effective way to extinguish peat fires in winter. News of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023;(245):23-35. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.23-35>

24. Uskov V.I. Zadacha Koshi dlya v' rozhdennogo differencial'nogo uravneniya vtorogo poryadka v banaxovom prostranstve. [The Cauchy problem for a degenerate second-order differential equation in a Banach space]. Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika = Vestnik TvGU. Series: Applied Mathematics. 2023; 4: 70-80. DOI: 10.26456/vtpmk665.

Сведения об авторах

Попиков Пётр Иванович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

✉ *Зленко Андрей Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0009-0004-1090-6874>, e-mail: 89686763952@mail.ru.

Петков Александр Федорович – кандидат технических наук, инженер, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-6348-8931>.

Попиков Виктор Петрович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра ландшафтной архитектуры и почвоведения, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: vpopikov75@gmail.com.

Усков Владимир Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра высшей математики, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-9662>, e-mail: vum1@yandex.ru.

Боровиков Роман Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>, e-mail: borovikov_roman@mail.ru.

Information about the authors

Pyotr I. Popikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

✉ *Andrey V. Zlenko* – graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0009-0004-1090-6874>, e-mail: 89686763952@mail.ru.

Alexander F. Petkov – Candidate of Technical Sciences, engineer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-6348-8931>.

Viktor P. Popikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Landscape Architecture and Soil Science, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: vpopikov75@gmail.com.

Vladimir I. Uskov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Higher Mathematics, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-9662>, e-mail: vum1@yandex.ru.

Roman G. Borovikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>, e-mail: borovikov_roman@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author