

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 635.25/26:631.315.2:631.332

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

ДОРОХОВ АЛЕКСЕЙ СЕМЁНОВИЧ, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник¹
dorokhov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

СИБИРЁВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ, д-р техн. наук, старший научный сотрудник¹
sibirev2011@yandex.ru

АКСЕНОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник¹
МОСЯКОВ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ✉, канд. техн. наук, старший преподаватель²
Maks.Mosyakov@yandex.ru✉

¹ Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. В статье представлены аналитические исследования по разработке и обоснованию системы автоматического контроля глубины обработки почвы, разработаны структурная схема и алгоритм линейной системы позиционного управления, а также расчётная схема к формированию алгоритма управления. Определена математическая модель объекта управления регулирования глубины обработки почвы при условии идеального отслеживания траектории точки перемещения подвижных частей приводных механизмов звеньев задающего устройства и штоков исполнительных актуаторов автоматической системы глубины обработки почвы. Система позиционного управления глубины обработки почвы представляет собой механизм регулировки опорного колеса при действующем возмущении на объект управления посредством изменения расстояния между осью вращения колеса энергетического средства привода почвообрабатывающей машины и осью вращения опорных колес машины для обработки почвы. Для определения требуемой точности и режимов применения аппаратных средств в различных фазовых состояниях почвенного слоя выявлен и проанализирован базовый комплект аппаратных средств, отвечающих требованиям управления глубины обработки рабочего органа почвообрабатывающей машины. Комплект включает в себя датчик определения глубины погружения рабочего органа в почвенный слой, микроконтроллер, задающий и контролирующий регулируемое силовое воздействие на почву, то есть вертикальное перемещение штока электроцилиндра и электроцилиндры (линейные актуаторы). Для проверки разработанных алгоритмов функционирования системы автоматического контроля регулирования глубины хода рабочих органов машины для предпосевной обработки почвы необходимо проведение экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

Ключевые слова: обработка почвы, глубина обработки, свекла столовая, влажность, плотность, почва, алгоритм.

Работа выполнена при государственной поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (Конкурс СП-1004.2021.1).

Формат цитирования: Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Аналитическое обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 19-23. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.

© Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А., 2021



ORIGINAL PAPER

ANALYTICAL FEASIBILITY STUDY OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF TILLAGE DEPTH

ALEKSEI S. DOROKHOV, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Professor¹
dorokhov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

ALEKSEI V. SIBIRYOV, DSc (Eng), Senior Researcher¹
sibirev2011@yandex.ru

ALEKSANDR G. AKSENOV, PhD (Eng), Leading Researcher¹

MAKSIM A. MOSYAKOV[✉], PhD (Eng), Senior Lecturer²

Maks.Mosyakov@yandex.ru[✉]

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., Bld. 5

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Abstract. The authors have carried out analytical studies on the development and rationalization of a system for automatic controlling the depth of tillage, a block diagram and an algorithm for a linear positional control system, as well as offered a design scheme to develop a control algorithm. A mathematical model describing the control object that regulates the tillage depth has been determined, provided that the motion trajectory of the moving parts of the driving links and the actuator rods of the automatic system controlling the tillage depth is perfectly traced. A structural diagram of a linear system of positional control of the soil tillage depth has been developed, which is a mechanism for adjusting the support wheel with an acting disturbance on the control object, changing the distance between the O axis of the wheel rotation of the tillage machine power tool and the rotation axis of the support wheels of a soil cultivation machine. A design scheme to develop a control algorithm for changing the tillage depth has been obtained. To determine the required accuracy and modes of using hardware in various phase states of the soil layer, a basic set of hardware was identified and analyzed to ensure that it meets the requirements for controlling the tillage depth of the working elements. They include a sensor for determining the penetration depth of the working element; microcontroller (setting and control of regulated force impact on the soil, i.e. vertical movement of the electric cylinder rod); electric cylinders (linear actuators). To test the developed algorithms for the functioning of the automatic control system for adjusting the travel depth of the working elements for presowing soil cultivation, it is necessary to conduct experimental studies in laboratory and production conditions.

Key words: tillage, tillage depth, table beet, onion, moisture, density, soil, algorithm.

The work was carried out with the State support through the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduate students (Contest SP-1004.2021.1).

For citation: Dorokhov A.S., Sibiryov A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Analytical feasibility study of the automatic control system of tillage depth. *Agricultural Engineering*, 2021; 3 (103): 19-23. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.

Введение. Эффективность работы машинно-технологического комплекса производства овощных культур в большей степени зависит от их конструктивных, режимных, технологических параметров функционирующих элементов, а также от физико-механических свойств взаимодействующего материала и определяется показателями качества выполнения отдельной технологической операции [1-6].

При отсутствии в посевном слое почвы требуемой влаги для прорастания посевного и посадочного материала возникает проблема обоснования оптимальных приёмов обработки почвы в соответствии с агротехническими требованиями.

В перечне агротехнических требований, предъявляемых к подготовленной почве нормативными документами, отражены следующие критерии: равномерность обработки почвы по глубине (не менее 90%); отклонение глубины обработанного слоя (не более ± 1 см); глыбистость (не более 10...15%); максимальная высота оставшихся гребней до 3 см [7, 8]. Следовательно, к предпосевной подготовке почвы под посев мелкосеменных культур (имеющих геометрические параметры семян до 2,0...2,5 мм) – таких, как лук, морковь, свёкла столовые, огурцы и томаты, также предъявляются высокие агротехнические требования. Поверхностный слой почвы должен быть выровненным, с мелкокомковатой структурой.

Цель исследований: разработка и обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы.

Материалы и методы. Анализ исследований многих учёных показывает, что для получения высоких урожаев необходимо учитывать оптимальный диапазон физических показателей почв [8].

При отклонении значений этих величин от оптимальных наблюдается снижение урожайности сельскохозяйственных культур в среднем на 8...15%, а снижение урожайности овощных культур может достигать даже 40%.

На формирование посевного слоя почвы определяющее влияние оказывает конструкция сошниковой группы посевной машины.

Обеспечение показателей качества исследуемого почвенного слоя в установленных интервалах значений при влиянии гранулометрического состава является приоритетной задачей при разработке машин и технологий предпосевной и предпосадочной обработки почв.

Для обеспечения равномерности глубины обработки почвы необходимо определение вероятности нахождения рабочего органа в заглубленном и выглубленном состояниях, соответственно ниже или выше заданных границ поля допуска глубины хода рабочих органов [1]. В связи с этим необходимо владеть информацией о параметрах внешней среды (влажность, твердость, скважность, липкость, гранулометрический состав почвы), возмущающие воздействия которых воспринимаются сигнализирующими устройствами, на сигнал которых откликаются отдельные функционирующие элементы, что приводит к изменению технологических и режимных параметров машинно-технологического комплекса обработки почвы [6].

Определяющее воздействие на продуктивность растений оказывает надлежащее качество обработки почвы, одним из показателей которого является её гранулометрический состав, зависящий в свою очередь от энергоёмкости обработки, а следовательно, и от исходного состояния твердости почвы.

Повышение твердости почвы свыше предельных значений (более 1 МПа для овощных культур) снижает рост корней и увеличивает затраты энергии растений на преодоление сопротивления почвы.

Характер изменения твердости почвы является случайным (рис. 1) [1] и он определяет энергетические затраты выполнения технологического процесса.



Рис. 1. Распределение твердости почвы
Fig. 1. Distribution of soil hardness

Твердость почвы P (H/cm^2) определяет её способность к сопротивлению сжатию. Для восприятия воздействующих на почву различных видов деформаций конструкцией твердомера предусмотрен плунжер. Однако соотношение различных видов деформации в величине твердости является различным.

Благодаря рыхлению почвы при обработке облегчаются проникновение корней в глубокие слои почвы и поглощение ими питательных веществ и влаги.

Проведенные исследования подтверждают обнаруженные ранее закономерности, свидетельствующие о допустимом давлении в твердом состоянии на глинистые и суглинистые почвы в диапазоне $1,5 \dots 2,5 \text{ H}/\text{cm}^2$, $2,5 \dots 4,0 \text{ H}/\text{cm}^2$ соответственно. Допускается нагрузка: супесью сухой – $2,0 \dots 2,5 \text{ H}/\text{cm}^2$, влажной супесью – $1,5 \dots 2,0 \text{ H}/\text{cm}^2$.

Для определения требуемой точности и режимов применения аппаратных средств в различных фазовых состояниях почвенного слоя выявлен и проанализирован базовый комплект аппаратных средств, отвечающих требованиям управления глубиной обработки рабочего органа почвообрабатывающей машины. К их числу следует отнести датчик определения глубины погружения рабочего органа в почвенный слой; микроконтроллер, задающий и контролируемый регулируемое силовое воздействие на почву, то есть вертикальное перемещение штока электроцилиндра) и электроцилиндры (линейные актуаторы).

Задание и контроль глубины обработки ротационного рабочего органа осуществляются автоматически посредством микроконтроллера.

Математическая модель объекта управления регулирования глубины обработки почвы в общем виде может быть представлена уравнением состояния [9]:

$$\dot{\varphi} = H = A\varphi + B\dot{u}, \quad (1)$$

где φ – обобщенная координата (управляемая величина); \dot{u} – управляющее воздействие; A , B – матрицы соответствующих коэффициентов.

Под целью управления понимается решение задачи приближения вектора выходных параметров φ к желаемому результату, то есть вектору φ^1 :

$$\begin{cases} |\varphi - \varphi^1| \rightarrow \min \\ |\varphi - \varphi^1| \leq \varepsilon. \end{cases}, \quad (2)$$

где ε – заданная допустимая погрешность отклонения.

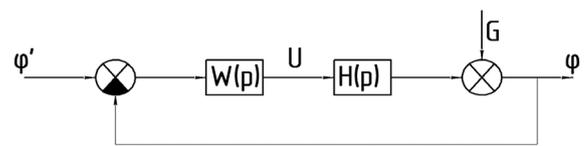


Рис. 2. Структурная схема линейной системы позиционного управления
Fig. 2. Block diagram of the linear positional control system

Объектом управления выступает механизм регулирования глубины обработки, который представляет собой механизм регулировки опорного колеса (рис. 3).

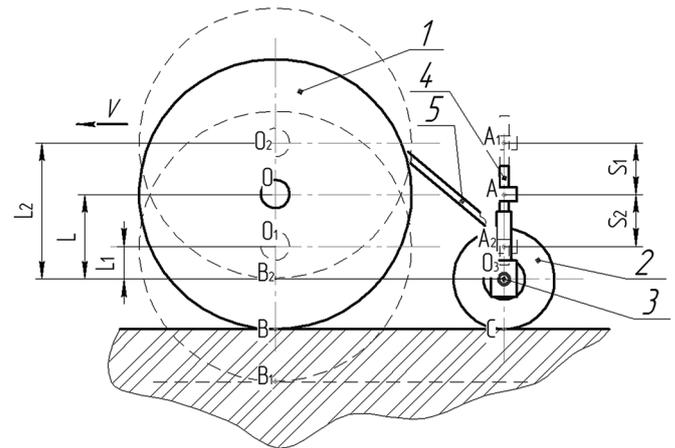


Рис. 3. Автоматическая система контроля регулирования глубины хода рабочих органов:
1 – колесо энергетического средства;
2 – колесо опорное почвообрабатывающей машины;
3 – датчик лазерный; 4 – электроцилиндр;
5 – устройство навесное

Fig. 3. Automatic control system for adjusting the penetration depth of working elements:
1 – wheel of the power plant;
2 – support wheel of the tillage machine; 3 – laser sensor;
4 – electric cylinder; 5 – hinged device

Возмущением (G), действующим на объект управления, является изменение расстояния L между осью O вращения колеса 1 энергетического средства привода почвообрабатывающей машины и осью вращения O_3 опорных колес 2 машины для обработки почвы (рис. 4), то есть изменение расстояния L в большую L_2 или меньшую L_1 сторону компенсируется перемещением штока актуатора из точки A в точку A_2 или A_1 на расстояние S_2 или S_1 соответственно; при выполнении технологического процесса обработки почвы для поддержания профилированной (выровненной) предпосевной/предпосадочной подготовки почвы должно соблюдаться условие:

$$L = OB. \quad (3)$$

Для поддержания данного расстояния между осями вращения колеса 1 энергетического средства и опорными колесами 2 почвообрабатывающей машины шток актуатора 4 перемещается из точки A в точку A_2 или A_1 на расстояние S_2 или S_1 соответственно:

$$\begin{cases} OO_1 = S_1, \\ OO_1 = S_2. \end{cases} \quad (4)$$

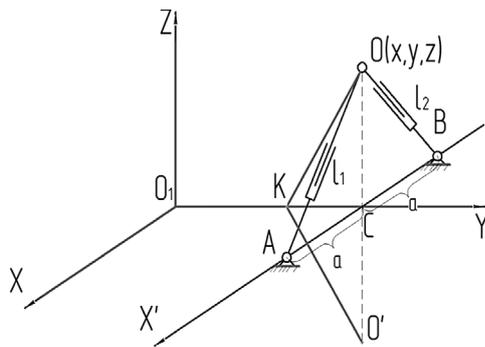


Рис. 4. Расчетная схема к формированию алгоритма управления

Fig. 4. Design scheme used for the development of the control algorithm

Условие идеального отслеживания траектории точки *O* подразумевает, что перемещения подвижных частей приводных механизмов звеньев задающего устройства и штоков исполнительных актуаторов связаны соотношениями [10]:

$$S_{O_M} = S_{O_p} \cdot \lambda^{-1}, \tag{5}$$

где S_{O_M} – перемещение точки *O* актуатора, м; S_{O_p} – перемещение точки *O* задающего устройства (ось вращения колеса энергетического средства), м; λ – масштабный коэффициент.

$$V_{O_M} = V_{M_p} \cdot \lambda^{-1}, \tag{6}$$

где V_{O_M} – скорость точки *O* актуатора, м/с; V_{M_p} – скорость точки *O* задающего устройства, м/с.

Предположим, что актуатор автоматической системы контроля характеризуется геометрическими размерами (рис. 4):

$$\begin{cases} AO = \lambda \cdot l_1, \\ BO = \lambda \cdot l_2, \\ AC = CB = a, \\ OC = c, \\ O_1K = d. \end{cases} \tag{7}$$

Положение точки *O'* можно представить в виде уравнений связи [10]:

$$\begin{cases} l_1^2 = (x_o^2 + y_o^2 + z_o^2), \\ l_2^2 = (x_o + a)^2 + (y_o + a)^2 + z_o^2, \\ l^2 = x_o^2 + (y_o + d)^2 + z_o^2. \end{cases} \tag{8}$$

В теле алгоритма считываются текущие показания датчиков положения штоков исполнительных электроцилиндров φ_{i0} и положения штоков задающего механизма, расстояния *L* между осью *O* вращения колеса *l* энергетического средства привода почвообрабатывающей машины и осью вращения опорного колеса O_3 φ'_{i0} . По этим показаниям

Библиографический список

1. Емельянов П.А., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г. Передвижной почвенный канал // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 6. С. 7-8.
2. Курдюмов В.И., Зыкин Е.С. Теоретическое обоснование силы, требуемой на перемещение катка гребневой

по уравнениям (8) определяются декартовы координаты начальной точки положения груза $O_0(x_0, y_0, z_0)$.

Длины исполнительных звеньев связаны с длинами звеньев задающего механизма масштабным коэффициентом λ , то есть $l_i = \lambda l'_i$ [10]. Затем задаётся приращение координат по дуге траектории $S_i = S_i + V_i \Delta t$, вычисляются текущие значения l_i и происходит обработка движения по траектории [10].

Движение по траектории осуществляется до тех пор, пока текущие значения длин электроцилиндров l_i не достигнут заданного конечного положения l_{ik} .

Алгоритм формирования программы управления линейными актуаторами регулирования глубины хода рабочих органов построен из условия идеального отслеживания траектории O_0O_k (рис. 5).

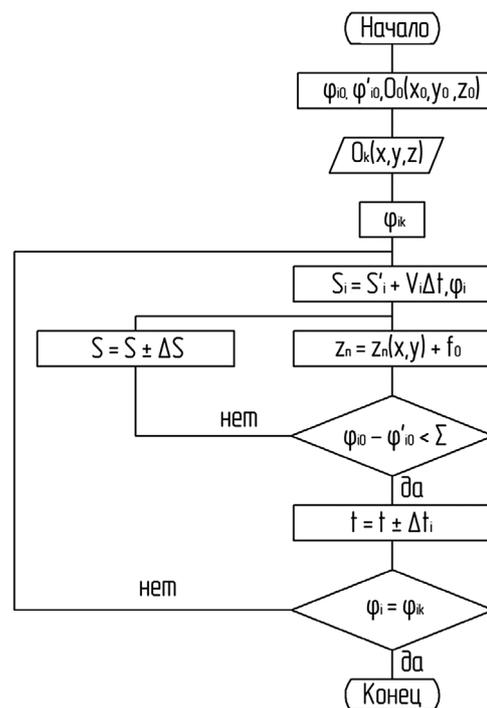


Рис. 5. Алгоритм формирования программы управления линейными актуаторами регулирования глубины хода рабочих органов

Fig. 5. Algorithm for making a control program for linear actuators adjusting the penetration depth of working elements

Выводы

В целях проверки разработанных алгоритмов функционирования системы автоматического контроля регулирования глубины хода рабочих органов машины для предпосевной обработки почвы необходимо проведение экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

References

1. Emelyanov P.A., Sibiriyov A.V., Aksenov A.G. Peredvizhnoy pochvenniy kanal. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2013; 6: 7-8. (In Rus.)
2. Kurdyumov V.I., Zykin E.S. Teoreticheskoe obosnovanie sily, trebuemoy na peremeshcheniye katka grebnevoy seyalki

сеялки // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 3 (39). С. 143-148. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-3-143-147.

3. Курдюмов В.И., Зыкин Е.С., Шаронов И.А. и др. Оптимизация параметров прикапывающего устройства комбинированного посевного агрегата // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 1. С. 34-37.

4. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinsky I.Z. Setting of soil parameters during seedbed preparation of the profiled surfaces by cultivators equipped with by active rollers. *British Journal of Innovation in Science and Technology*, 2016; 1(3): 45-51.

5. Алдошин Н.В. Моделирование качества выполнения механизированных работ // Горячкинские чтения: Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции. 2013. С. 6-13.

6. Алдошин Н.В., Дидмандзе Р.Н. Выбор стратегий качественного выполнения механизированных работ // Международный технико-экономический журнал. 2013. № 5. С. 67-70.

7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 6. С. 6-10.

8. Емельянов П.А., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г. Исследование силовой характеристики дискового заделывающего органа луковой сеялки // Нива Поволжья. 2013. № 1 (26). С. 40-46.

9. Захаров Е.Н., Несмиянов И.А. Системы управления параллельно-последовательными погрузочными манипуляторами // Современная техника и технологии. 2016. № 9 (61). С. 15-21.

10. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. № 14 (1). С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.

[Theoretical study of the force required to move the roller of a ridge seeder]. *Vestnik Ul'yanskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyaystvennoj akademii*, 2017; 3(39): 143-148. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-3-143-147. (In Rus.)

3. Kurdyumov V.I., Zykin E.S., Sharonov I.A. et al. Optimizatsiya parametrov prikatyvayushchego ustroystva kombinirovannogo posevnogo agregata [Optimizing the roller parameters of the combined sowing unit]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2014; 1: 34-37. (In Rus.)

4. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinsky I.Z. Setting of soil parameters during seedbed preparation of the profiled surfaces by cultivators equipped with by active rollers. *British Journal of Innovation in Science and Technology*, 2016; 1(3): 45-51.

5. Aldoshin N.V. Modelirovanie kachestva vypolneniya mekhanizirovannykh rabot [Modeling the quality of performing mechanized operations]. *Goryachkinskie chteniya: Sbornik dokladov 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2013: 6-13. (In Rus.)

6. Aldoshin N.V., Didmanidze O.N. Vybora strategiy kachestvennogo vypolneniya mekhanizirovannykh rabot [Choosing strategies for high-quality performance of mechanized operations]. *International Technical and Economic Journal*, 2013; 5: 7-15. (In Rus.)

7. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. Sistema mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na period do 2020 goda [System of machines and technologies for comprehensive mechanization and automation of agricultural production for the period up to 2020]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2013; 6: 6-10. (In Rus.)

8. Emelyanov P.A., Sibiryov A.V., Aksenov A.G. Issledovanie silovoy kharakteristiki diskovogo zadelyvayushchego organa lukovoy seyalki [Study of the power characteristics of the onion seeder disc-closing implement]. *Niva Povolzhya*, 2013; 1 (26): 40-46. (In Rus.)

9. Zakharov E.N., Nesmiyanov I.A. Sistemy upravleniya parallel'no-posledovatel'nymi pogruzochnymi manipulyatorami [Control systems for parallel-sequential loading manipulators]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, 2016; 9 (61): 15-21. (In Rus.)

10. Starovoitov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M. et al. Tekhnicheskie sistemy tsifrovogo kontrolya kachestva obrabotki pochvy [Technical systems for digital quality control of soil cultivation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2020; 14 (1): 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21. (In Rus.)

Критерии авторства

Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.10.2020

Одобрена после рецензирования 29.04.2021

Принята к публикации 29.04.2021

Contribution

A.S. Dorokhov, A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov, M.A. Mosyakov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.S. Dorokhov, A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov, M.A. Mosyakov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 04.10.2020

Approved after reviewing 29.04.2021

Accepted for publication 29.04.2021