Тип статьи: научная
УДК 631.348.46
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-1-108-115

ФОРМАЛИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПРЫСКИВАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ РАСХОДОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Алексей Иванович Купреенко[1], Владимир Васильевич Кузнецов[2], Хафиз Мубариз-оглы Исаев[3], Самир Хафизович Исаев[4]
[1,2,3,4] Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Россия
[1]kupreenkoai@mail.ru, [2]vlg3k@rambler.ru, [3]haf-is@mail.ru, [4]Samir.isaev.94@inbox.ru

Автор ответственный за переписку: Алексей Иванович Купреенко, kupreenkoai@mail.ru
Corresponding author: Alexey Kupreenko, kupreenkoai@mail.ru

Реферат. *Разнообразие природных условий и возделываемых сельскохозяйственных культур, различный уровень окультуренности полей обусловливают различие оптимальных конструктивных параметров и функциональных свойств опрыскивателей для их эффективного использования. Для обоснования оптимальных параметров опрыскивателей применительно к различным условиям используются методы натурного эксперимента, расчётный метод и метод компьютерного моделирования. При компьютерном моделировании обязательно учитываются не только конструктивные, но и динамические характеристики агрегатов. Одним из этапов при компьютерном моделировании функционирования опрыскивающих агрегатов является предварительная формализация нестационарности и нелинейности их статических и динамических свойств. Методом формализации результатов натурного эксперимента получена формула зависимости главного момента инерции опрыскивателя при различном уровне жидкости в ёмкости цилиндрической формы. Для проведения натурного эксперимента предложен оригинальный стенд и методика проведения. Расчётным методом получена математическая зависимость изменения высоты центра масс опрыскивающего агрегата от конструктивных параметров ёмкости и уровня жидкости в ней. Полученные результаты могут быть использованы при Simulink-моделировании функционирования опрыскивающего агрегата и определении его оптимальных параметров для различных условий работы по известной методике.*

Ключевые слова: *опрыскиватель, ёмкость опрыскивателя, центр масс, момент инерции, формализация.*

FORMALIZATION OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF THE SPRAYER IN THE PROCESS OF WORKING FLUID CONSUMPTION

Alexey Kupreenko [1], Vladimir Kuznetsov [2], Khafiz Isaev [3], Samir Isaev [4]
[1,2,3,4]Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia
[1]kupreenkoai@mail.ru, [2]vlg3k@rambler.ru, [3]haf-is@mail.ru, [4]Samir.isaev.94@inbox.ru

Abstract. *The diversity of natural conditions and cultivated crops, the different level of fields cultivation determines the difference in optimal design parameters and functional properties of sprayers for their effective use. Field experiment methods, calculation method and computer simulation method are used to substantiate the optimal parameters of sprayers in relation to various conditions. In computer modeling, not only the structural, but also the dynamic characteristics of the units are necessarily taken into account. One of the stages in computer modeling of the spraying units functioning is the preliminary formalization of non-stationarity and non-linearity of their static and dynamic properties. The formula for the dependence of the main moment of inertia of the sprayer at a different level of liquid in a cylindrical container was obtained by formalizing the results of a full-scale experiment. The original stand and the method of carrying out are proposed for conducting a full-scale experiment. The mathematical*

dependence of the change in the height of the center of mass of the spraying unit on the design parameters of the tank and the liquid level in it was obtained by the calculation method. The results obtained can be used in Simulink modeling of the functioning of the spraying unit and determining its optimal parameters for various operating conditions using a known method.

Keywords: *sprayer, sprayer capacity, center of mass, moment of inertia, formalization.*

Для цитирования: Купреенко А.И., Кузнецов В.В., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Формализация нелинейных характеристик опрыскивателя в процессе расходования рабочей жидкости // Наука в центральной России. 2023. Т. 61, № 1. С. 108-115. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-108-115.

For citation: Kupreenko A., Kuznetsov V., Isaev K., Isaev S. Formalization of nonlinear characteristics of the sprayer in the process of working fluid consumption. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 61(1): 108-115. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-108-115.

Введение. Инновационные технологии возделывания полевых сельскохозяйственных культур включают в себя операцию химической защиты растений с использованием опрыскивающих агрегатов [1]. Широкая номенклатура опрыскивающих агрегатов используется и в сельхозпредприятиях Брянской области [2, 3]. Наличие широкого спектра различий полевых условий работы в различных хозяйствах области, например, мелкоконтурность полей, различный микро и мезорельеф и т. д., разнообразие возделываемых полевых культур, не всегда позволяют эффективно использовать опрыскиватели серийных конструкций. Актуальность приобретает вопрос их дальнейшей оптимизации. В этом направлении коллективом Брянского ГАУ проводится работа не только по совершенствованию конструкций опрыскивателей [4, 5, 6, 7], но и по оптимизации их функциональных свойств.

В свою очередь, современные методы исследования и оптимизации параметров мобильных сельскохозяйственных агрегатов, в частности опрыскивающих, предполагают компьютерное моделирование их движения. При этом обязательно учитываются не только конструктивные, но и динамические характеристики агрегатов, зависящие от массы, моментов инерции, положения центра масс, диссипативных и жесткостных свойств внутренних связей [8].

Одним из этапов при компьютерном моделировании функционирования опрыскивающих агрегатов является формализация нестационарности и нелинейности их статических и динамических свойств. В приложении Simulink к компьютерной программе Manlab 6 [9] имеется библиотека блоков, из которых при моделировании возможно построение схем преобразования входных сигналов в выходные на основе задаваемых оператором математических описаний. Получить такие описания можно расчётным методом или методом формализации результатов натурных экспериментов.

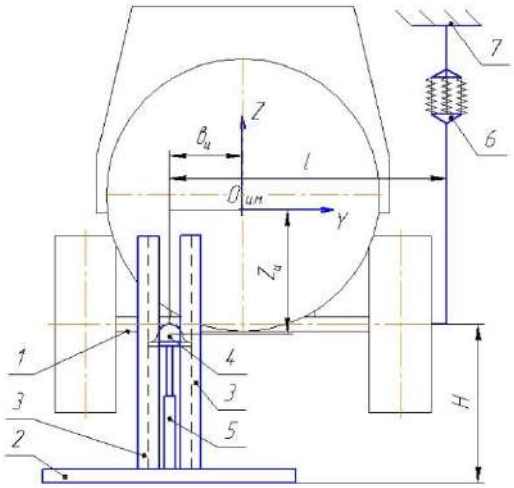
Автором [10] предложены для описания колебания неполно-налитой цистерны сложные математические зависимости, но не указан способ их реализации при моделировании функционирования опрыскивателей.

Материалы и методы. Целью работы явилось формализация изменения высоты центра масс и главного момента инерции опрыскивающего агрегата при расходовании рабочей жидкости в ёмкости.

Исследование проводилось с опрыскивателем? имеющим ёмкость для рабочей жидкости цилиндрической формы. Величину момента инерции I_x опрыскивателя относительно продольной оси агрегата при различном уровне жидкости в ёмкости определяли методом раскачивания на пружинном блоке.

Для исследования был разработан и изготовлен с использованием патента [11] специальный стенд, показанный на рисунке 1.

Раскачивая на пружинном блоке 6 опрыскиватель, установленный рамой 1 на вращающуюся в подшипниках ось 4, по схеме, представленной на рисунке 1, с помощью защищённой патентом [11] измерительной системы и ноутбука осуществляли запись 7 колебаний опрыскивателя в трёх повторностях.



1 – рама опрыскивателя; 2 – основание стенда; 3 – вертикальные стойки; 4 – ось на подшипниковых опорах с датчиком угла поворота на основе компьютерной мыши; 5 – домкрат; 6 – блок пружин; 7 – тележка кран-балки; $в_с$ и $z_с$ – координаты привязки точки опоры опрыскивателя к центру масс опрыскивателя; l – расстояние от точки подвеса опрыскивателя к блоку пружин до оси вращения по горизонтали, м.

Рисунок 1 – Схема установки опрыскивателя на стенд при определении момента инерции I_x.

Момент инерции опрыскивателя относительно оси вращения оси опоры определили по известной формуле (1)

$$I_0 = \frac{T^2 k_{CT}^2 l^2}{4\pi^2}, \quad (1)$$

где: T – период колебаний, с; k_{CT} – коэффициент жёсткости пружинного блока, Н/м;

l – расстояние от точки подвеса опрыскивателя к блоку пружин до оси вращения по горизонтали, м.

Перерасчёт момента инерции I_x относительно главной оси OX выполнили по формуле (2)

$$I_x = I_0 - M(l^2 - в_ц^2 - z_ц^2) \quad (2)$$

Ордината $z_ц$ центра масс опрыскивающего агрегата при различном уровне жидкости в ёмкости меняется. Определить её экспериментально технически сложно, поэтому нами применён расчётный метод.

На первом этапе формализовали зависимость между высотой центра масс ёмкости с жидкостью и временем работы распыливающего устройства опрыскивающего агрегата. Расчётная схема ёмкости цилиндрической формы с жидкостью приведена на рисунке 2.

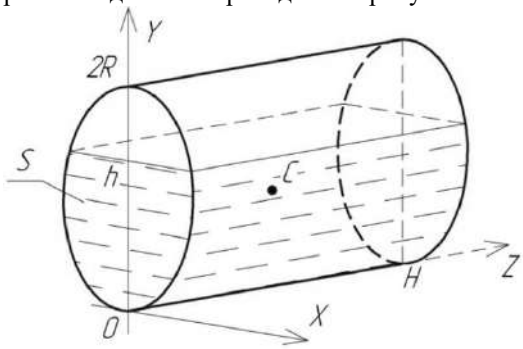


Рисунок 2 – Расчётная схема ёмкости опрыскивателя с жидкостью

Для расчётов приняли следующие обозначения: $m_б$ – масса пустой ёмкости, $m_ж$ – масса находящейся в ёмкости жидкости в произвольный момент времени t, R - ордината y центра масс пустой ёмкости, H - длина ёмкости, $y_ж$ - ордината центра масс находящейся в ёмкости жидкости. На основании схемы центр масс ёмкости с жидкостью имеет координаты C(0; y; H/2)

Таким образом, задача сводится к определению ординаты y_C центра масс ёмкости с жидкостью как двухмассовой системы.

В общем случае ордината центра масс двухмассовой системы определяется по формуле (3)

$$y_C = \frac{m_б \cdot R + m_ж \cdot y_ж}{m_б + m_ж} \tag{3}$$

Найдём $m_ж$ и $y_ж$., для чего выразим массу жидкости в полностью заполненной ёмкости через её геометрические параметры по формуле (4)

$$m = \pi R^2 H \rho \tag{4}$$

Обозначим через S площадь живого сечения ёмкости не полностью заполненной жидкостью в момент времени t.

Найдём площадь S, рисунок 2. Для этого рассмотрим рисунок 3.

Обозначив через S площадь живого сечения ёмкости не полностью заполненной жидкостью в момент времени t, получим

$$m_ж = \frac{S}{\pi R^2} m \tag{5}$$

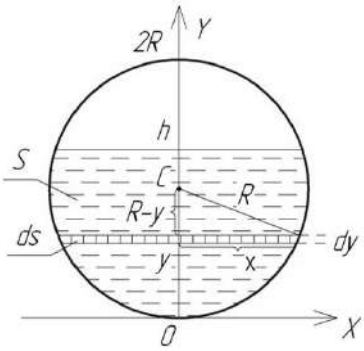


Рисунок 3 – Расчётная схема цилиндрической ёмкости опрыскивателя в поперечном сечении.

Пусть dS – площадь бесконечно узкой горизонтальной полоски шириной dy, находящейся на высоте y от дна ёмкости. Тогда, согласно рисунок 3,

$$dS = 2x dy \tag{6}$$

Учтя, что

$$x = \sqrt{R^2 - (R-y)^2}\,, \tag{7}$$

Получим

$$ds = 2\sqrt{R^2 - (R-y)^2} \cdot dy \tag{8}$$

Тогда вся искомая площадь S, изображённая на рисунке 3, найдётся интегрированием величины dS по формуле (9)

$$S = \sum dS = \int_0^h 2\sqrt{R^2 - (R-y)^2} \cdot dy \tag{9}$$

После преобразований получим формулу (10)

$$S = R^2\left[\frac{\pi}{2} - (1-\frac{h}{R})\sqrt{\frac{h}{R}(2-\frac{h}{R})} - \arcsin(1-\frac{h}{R})\right] \quad (10)$$

Обозначим
$$\frac{h}{R} = \gamma \quad (11)$$

Тогда
$$S = R^2 \cdot f(\gamma) \quad (12)$$

где
$$f(\gamma) = \frac{\pi}{2} - (1-\gamma)\sqrt{\gamma(2-\gamma)} - \arcsin(1-\gamma) \quad (13)$$

С учётом формулы (12) формула (5) примет вид

$$m_{ж} = \frac{f(\gamma)}{\pi} \cdot m \quad (14)$$

Далее найдём ординату $y_{ж}$ поверхности жидкости, налитой в ёмкость, т.е. ординату центра тяжести пластинки S, изображённой на рисунке 3.

$$y_{ж} = \frac{\sum ydS}{\sum dS} = \frac{2\int_0^h y\sqrt{R^2-(R-y)^2}dy}{S} \quad (15)$$

После преобразований получим

$$y_{ж} = \frac{2}{S}(RA - B) \quad (16)$$

где
$$A = \int_{R-h}^{R}\sqrt{R^2-t^2}dt \quad (17)$$

$$B = \int_{R-h}^{R}\sqrt{R^2-t^2}tdt \quad (18)$$

Интеграл (17) после вычисления примет вид

$$A = \frac{R^2}{2}f(\gamma) \quad (19)$$

Вычислим интеграл (18). Учтём при этом, что

$$\int\sqrt{R^2-t^2}\cdot tdt = -\frac{(\sqrt{R^2-t^2})^3}{3} + C$$ - табличный интеграл.

Применим формулу Ньютона – Лейбница и после преобразований получим формулу (20)

$$B = \int_{R-h}^{R}\sqrt{R^2-t^2}tdt = \frac{R^3}{3}(\sqrt{\gamma(2-\gamma)})^3 \quad (20)$$

С учётом формул (19) и (20) формула (16) примет вид

$$y_{ж} = \frac{2}{S}\left[\frac{R^3}{2}f(\gamma) - \frac{R^3}{3}(\sqrt{\gamma(2-\gamma)})^3\right] = R\cdot\frac{3f(\gamma) - 2(\sqrt{\gamma(2-\gamma)})^3}{3f(\gamma)} \quad (21)$$

Введём обозначение

$$P(\gamma) = \frac{3f(\gamma) - 2(\sqrt{\gamma(2-\gamma)})^3}{3f(\gamma)} \quad (22)$$

Тогда
$$y_{ж} = R \cdot P(\gamma) \tag{23}$$

Подставив значения $m_{ж}$ из (14) и $y_{ж}$ из (23) в формулу (3), получим

$$y_C = \frac{m_б R + \frac{f(\gamma)}{\pi} \cdot mR \cdot P(\gamma)}{m_б + \frac{f(\gamma)}{\pi} \cdot m} \tag{24}$$

Отсюда следует, что:

$$\frac{y_C}{R} = \frac{m_б + \frac{1}{\pi} \cdot f(\gamma) \cdot P(\gamma) \cdot m}{m_б + \frac{1}{\pi} f(\gamma) m} \tag{25}$$

Введя безразмерные величины $\frac{y_c}{R} = y_0$ и $\frac{m_б}{m} = m_0$, получим окончательно

$$y_0 = \frac{m_0 + \frac{1}{\pi} \cdot f(\gamma) P(\gamma)}{m_0 + \frac{1}{\pi} \cdot f(\gamma)} \tag{26}$$

Пусть из ёмкости за единицу времени при работе опрыскивающего агрегата расходуется объём жидкости q. При этом уровень жидкости в ёмкости будет понижаться. Найдём зависимость между уровнем жидкости h и временем работы t. За начало отсчёта времени принимаем положение, когда ёмкость заполнена полностью, т. е. $h = 2R$.

Пусть в момент времени t высота жидкости в ёмкости равна h. Тогда за время dt, прошедшее после времени t, высота жидкости уменьшится на некоторую величину dh. Соответствующая элементарная полоска сечения бочки будет иметь площадь

$$ds = -2\sqrt{R^2 - (R-h)^2}\, dh, \tag{27}$$

а соответствующий объём жидкости dV, израсходованный из ёмкости за время dt, будет равен

$$dV = ds \cdot H = -2H\sqrt{R^2 - (R-h)^2}\, dh \tag{28}$$

С другой стороны,

$$dV = q \cdot dt \tag{29}$$

Сравнивая формулы (28) и (29), получим

$$dt = -\frac{2H}{q}\sqrt{R^2 - (R-h)^2}\, dh \tag{30}$$

Интегрируя равенство (30), получим

$$t = -\frac{2H}{q}\int \sqrt{R^2 - (R-h)^2}\, dh \tag{31}$$

Вычислив интеграл, стоящий в правой части формулы (31), получим

$$t = -\frac{2h}{q} \cdot \frac{R^2}{2}\left[f(\gamma) - \frac{\pi}{2} \right] + C \tag{32}$$

Учитывая, что при $t = 0$ уровень жидкости $h=2R$, а согласно (13) $f(2) = \pi$, получим константу интегрирования C.

$$C = \frac{\pi R^2 H}{2q} \tag{33}$$

Подставив значение константы в формулу (32), получим

$$t = \frac{V}{q}\left[1 - \frac{f(\gamma)}{\pi}\right] \tag{34}$$

По формуле (34) для любого заданного значения γ можно найти время t за которое будет достигнут заданный уровень жидкости в ёмкости.

По формуле (3), с учётом (26), для любого заданного значения γ можно найти величину ординаты центра тяжести ёмкости с находящейся в ней в текущий момент времени жидкостью.

$$y_c = y_0 R, \tag{35}$$

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы при Simulink-моделировании функционирования опрыскивающего агрегата и определении его оптимальных параметров для различных условий работы по методике, изложенной в [8].

Список источников

1. В.Е. Ториков, О.В. Мельникова // Научные основы агрономии. СПб., 2020.

2. Материально-техническое обеспечение и инновационное развитие АПК Брянской области / С.А. Бельченко, И.Н. Белоус, В.В. Ковалев, М.П. Наумова, И.Д. Сазонова // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: сб. тр. XII междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2021. С. 388-400.

3. Сычев С.Н., Бельченко С.А., Ториков В.Е., Дронов А.В., Осипов А.А. Развитие АПК Брянской области (2018-2022) / // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. - 2022. - № 5 (93). - С. 3-10.

4. Машина для борьбы с сорняками: пат. 69706. / Рос. Федерация: U1 / Кузнецов Е.В., Ермичев В.А., Кузнецов А.В., Кузнецов В.В.; заявл. 07.24.2007; опубл. 01.10.2008.

5. Машина для борьбы с сорняками в защитной зоне: пат. 74763. / Рос. Федерация: U1 / Кузнецов Е.В., Ермичев В.А., Ожерельев В.Н., Кузнецов А.В., Кузнецов В.В.; заявл. 27.02.2008; опубл. 20.07.2008.

6. Агрегат для возделывания высокостебельных культур: пат. 197380. / Рос. Федерация: U1 / Кузнецов В.В., Случевский А.М., Блохин В.Н.., Евдокименкн С.Н., Сазонов Ф.Ф., Лаптева Н.А.; заявл. 16.12.2019; опубл. 23.04.2020.

7. Опрыскиватель: пат. 2403987 Рос. Федерация: C1/ Ожерельев В.Н., Кузнецов В.В., Ожерельева Н.В., Ожерельева М.В., Кравцова Л.П.; № 2009116067/05; заявл. 27.04.2009; опубл. 20.11.2010.

8. Кузнецов А.В., Кузнецов В.В., Кузнецов Е.В. Исследование штанговых опрыскивателей как динамических систем методом имитационного моделирования // Достижения науки агропромышленному производству: материалы XLIV междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2005. С. 262-267.

9. Simulink: среда создания инженерных приложений / под ред. В.Г. Потёмкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

10. Белогорский В.П. Анализ боковых колебаний неполно налитой цистерны опрыскивателя при случайных возмущающих воздействиях // Повышение эффективности использования автотракторной и сельскохозяйственной техники. Пенза: Изд.-во Пенз. гос. с.-х. акад., 2005. С. 271-274.

11. Стенд для измерения моментов инерции сельскохозяйственных машин: пат. 192272 Рос. Федерация: U1 / Кузнецов В.В., Блохин В.Н., Гринь А.М., Кубышкин А.В., Лаптева Н.А., Адылин И.П.; заявл. 11.03.2019; опубл. 11.09.2019.

References

1. V.E. Torikov, O.V. Mel'nikova // Scientific foundations of agronomy. St. Petersburg, 2020.

2. Development of the agro-industrial complex of the Bryansk region - 2020 / N.M. Belous, S.A. Bel'chenko, V.E. Torikov, I.N. Belous, A.A. Osipov // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2020. No. 6 (82). pp. 3-10.

3. Logistics and innovative development of the agro-industrial complex of the Bryansk region / S.A. Bel'chenko, I.N. Belous, V.V. Kovalev, M.P. Naumova, I.D. Sazonova // Topical issues of economics and agribusiness: Sat. tr. XII int. scientific-practical. conf. Bryansk, 2021, pp. 388-400.

4. Machine for weed control: Pat. 69706. / Ros. Federation: U1 / Kuznetsov E.V., Ermichev V.A., Kuznetsov A.V., Kuznetsov V.V.; dec. 07.24.2007; publ. 01.10.2008.

5. Machine for weed control in the protective zone: Pat. 74763. / Ros. Federation: U1 / Kuznetsov E.V., Ermichev V.A., Ozherel'ev V.N., Kuznetsov A.V., Kuznetsov V.V.; dec. 02/27/2008; publ. 07/20/2008.

6. Unit for cultivation of high-stemmed crops: Pat. 197380. / Ros. Federation: U1 / Kuznetsov V.V., Sluchevsky A.M., Blokhin V.N., Evdokimenko S.N., Sazonov F.F., Lapteva N.A.; dec. 12/16/2019; publ. 04/23/2020.

7. Sprayer: Pat. 2403987 Ros. Federation: C1/ Ozherel'ev V.N., Kuznetsov V.V., Ozherel'eva N.V., Ozherel'eva M.V., Kravtsova L.P.; No. 2009116067/05; dec. 04/27/2009; publ. 11/20/2010.

8. Kuznetsov A.V., Kuznetsov V.V., Kuznetsov E.V. Study of boom sprayers as dynamic systems by simulation // Achievements of science in agro-industrial production: materials of the XLIV Intern. sci.-tech. conf. Part 2. Chelyabinsk: ChGAU Publishing House, 2005. S. 262-267.

9. Simulink: environment for creating engineering applications / ed. V.G. Potemkin. M.: DIALOG-MEPhI, 2003. 496 p.

10. Belogorsky V.P. Analysis of lateral oscillations of an incompletely filled sprayer tank under random disturbances // Improving the efficiency of the use of automotive and agricultural machinery. Penza: Publishing house Penz. state s.-x. Acad., 2005. S. 271-274.

11. Stand for measuring the moments of inertia of agricultural machines: Pat. 192272 Ros. Federation: U1 / Kuznetsov V.V., Blokhin V.N., Grin A.M., Kubyshkin A.V., Lapteva N.A., Adylin I.P.; dec. 03/11/2019; publ. 09/11/2019.

Информация об авторах

А.И. Купреенко – доктор технических наук, профессор; В. В. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент; Х. М. Исаев – кандидат экономических наук, доцент; С.Х. Исаев – старший преподаватель.

Information about the authors

A. Kupreenko - Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Kuznetsov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; K. Isaev – candidate of economic sciences, associate professor; S. Isaev - Senior Lecturer.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 18.01.2023 Принята к публикации (Accepted): 16.02.2023