

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Нозим Исмоилович Джабборов¹
Александр Владимирович Сергеев¹
Валерий Андреевич Эвиев²
Нимя Григорьевич Очиров³

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

²Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова

³Северо-Восточный государственный университет

Целью исследования является разработка математической модели функционирования почвообрабатывающих рабочих органов с упругими элементами, которая позволит решить задачу снижения энергоемкости процесса поверхностной обработки почвы путем оптимизации параметров колебаний упругого элемента рабочего органа с последующим обоснованием параметров упругого элемента для заданных условий функционирования. Объектом исследования является система «почва – почвообрабатывающий рабочий орган с упругим элементом». При проведении исследований использовались вероятностные (статистические) методы, которые применяются при исследовании сложных динамических систем. В разработанной математической модели функционирования входные и выходные параметры представлены в виде случайных функций. Основу базового блока модели составляет уравнение динамики упругого колебательного звена, на которое воздействует случайная возмущающая сила. Входным воздействием в модели функционирования является сопротивление почвы. Для оценки сопротивления почвы $P(t)$ используем обобщенный показатель физико-механических свойств почвы в виде твердости $\rho(t)$. Случайный характер входного воздействия вызывает колебания элементов рабочих органов, соединенных со стойкой через упругий элемент. Колебания элементов рабочих органов через обратную связь стремятся изменить величину и свойства входного воздействия. Разработанная математическая модель отражает внутреннюю отрицательную обратную связь по параметрам колебаний, вызывающим изменение тягового сопротивления почвообрабатывающего рабочего органа с упругим элементом в конструкции. При разработке модели принято, что средний угол, дисперсия среднего угла и дисперсия скорости угловых колебаний влияют на изменение средней величины и дисперсии тягового сопротивления рабочего органа. Идентификация параметров модели должна осуществляться по экспериментальным данным с участками стационарных колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, упругое колебательное звено, тяговое сопротивление, параметры колебаний, динамические рабочие органы.

DEVELOPING MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF TILLAGE WORKING BODIES WITH ELASTIC ELEMENTS

Nozim I. Dzhabborov¹
Aleksandr V. Sergeev¹
Valery A. Eviev²
Nimya G. Ochirov³

¹Institute for Engineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM

²Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikov

³North-Eastern state University

The research objective is to develop a mathematical model of functioning of tillage working bodies with elastic elements that would solve the problem of reducing the energy intensity of surface tillage by optimizing the oscillation properties of the elastic element of the working body with subsequent justification of parameters of the elastic element for the given operating conditions. The object of study is the system of soil and tillage working body with

elastic element. The research was performed using the probabilistic (statistical) methods, which are used to study complex dynamic systems. In the developed mathematical model of functioning the input and output parameters are represented as random functions. The basis of the mainframe of the model is the equation of dynamics of the elastic oscillating element, which is affected by an accidental exciting force. The input action in the model of functioning is soil resistance. In order to estimate the soil resistance $P(t)$ the authors use a generalized indicator of physical and mechanical properties of the soil in the form of hardness $\rho(t)$. The accidental nature of input action causes oscillations of the elements of working bodies connected to the pillar through the elastic element. Oscillations of elements of working bodies tend to change the magnitude and properties of the input action through the feedback. The developed mathematical model reflects the internal negative feedback by the oscillation properties, which cause changes in the traction resistance of the tillage working body with an elastic element in its structure. When developing the model the authors assumed that the mean angle, dispersion of the mean angle and angular oscillation velocity dispersion affected the changes in the mean value and dispersion of traction resistance of the working body. Identification of model parameters should be performed according to the experimental data with sites of stationary oscillations.

KEYWORDS: mathematical model, elastic oscillating element, traction resistance, oscillation properties, dynamic working bodies.

Введение

В настоящее время ведутся научные исследования по обоснованию конструктивных параметров почвообрабатывающих рабочих органов, обеспечивающих снижение энергоемкости обработки почвы в различных условиях функционирования [2–14], которые определяются твердостью почвы, глубиной обработки, скоростью перемещения рабочего органа, предшествующей технологической операцией и другими факторами.

При выполнении различных технологических операций на почвообрабатывающий рабочий орган воздействуют входные случайные (в вероятностно-статистическом смысле) возмущения, которые при наличии в конструкции почвообрабатывающих рабочих органов упругих элементов приводят к повышенным колебаниям [5, 10, 12, 14].

Проведенный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что одним из резервов снижения энергоемкости обработки почвы является создание и внедрение почвообрабатывающих рабочих органов и машин с новыми свойствами динамичности, позволяющими автоматически адаптироваться к почвенным условиям. Разработанные в Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ рабочие органы были апробированы в условиях производства и показали снижение тягового сопротивления и, как следствие, снижение затрат энергии на обработку почвы.

Для достижения требуемых показателей качества, регламентируемых энергетическими, агротехнологическими и экологическими требованиями, необходимо переводить сельхозтоваропроизводителей на принципиально новые почвообрабатывающие машины, рабочие органы которых используют прогрессивные принципы воздействия на обрабатываемую среду, одновременно обеспечивая возможность изменения степени воздействия рабочего органа на почву. Необходимым условием создания таких рабочих органов являются фундаментальные теоретические модели взаимодействия рабочего органа с почвой, способные математически описать физическую картину процессов, происходящих в зоне контакта рабочего органа и почвы.

Методика исследования

С целью оптимизации конструктивно-технологических параметров повышения эффективности почвообрабатывающих рабочих органов с упругими элементами возникает необходимость построения математической модели, позволяющей описать процесс их функционирования, решить задачу снижения энергоемкости процесса поверхностной обработки почвы путем оптимизации параметров колебаний упругого элемента рабочего органа с последующим их расчетом для заданных условий функционирования.

При проведении экспериментов использовались вероятностные (статистические) методы, которые применяются при исследовании сложных динамических систем [1].

Входные и выходные параметры в рассматриваемой математической модели функционирования представлены в виде случайных функций.

Из-за отсутствия строгой физической картины взаимодействия колеблющейся части рабочего органа с почвой возникает необходимость использования эмпирических моделей, параметры которых идентифицируются по результатам экспериментов.

Результаты и их обсуждение

Объектом исследования является система «почва – почвообрабатывающий рабочий орган с упругим элементом». При предпосевной обработке почвы в результате взаимодействия рабочего органа с почвой происходит ее рыхление и уничтожение сорняков. На рисунке 1 представлена информационная модель системы «почва – почвообрабатывающий рабочий орган с упругим элементом».

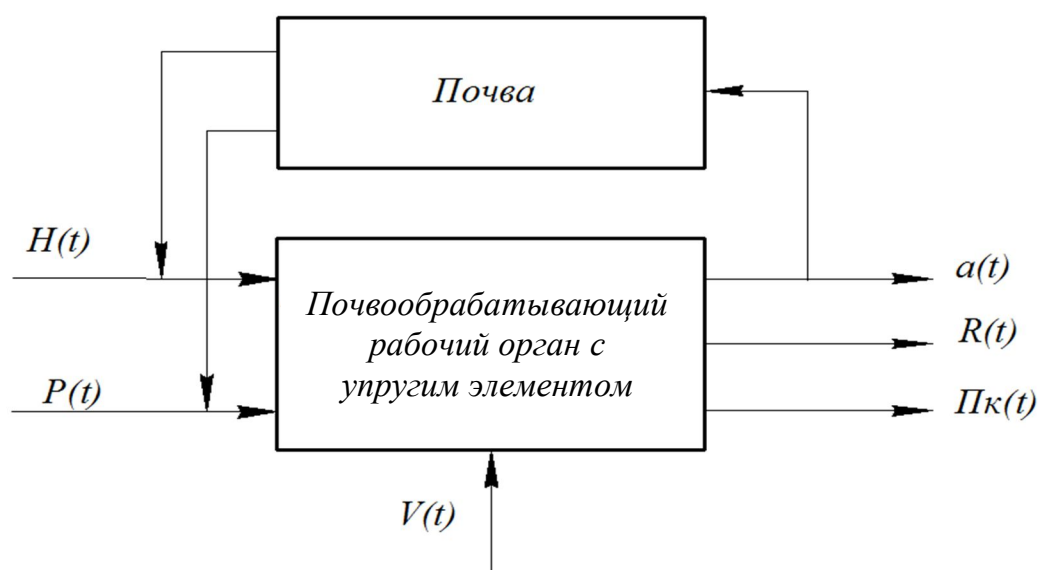


Рис. 1. Информационная модель системы «почва – почвообрабатывающий рабочий орган с упругим элементом»

Входные параметры:

$H(t)$ – глубина обработки почвы, см;

$V(t)$ – скорость перемещения рабочего органа, м/с;

$P(t)$ – сопротивление почвы, МПа.

Выходные параметры:

$a(t)$ – угол отклонения упругого элемента (рис. 2), рад.

$Пк$ – показатель качества обработки почвы.

$R(t)$ – тяговое сопротивление почвообрабатывающего рабочего органа, определяющее в конечном итоге затраты энергии для получения необходимых величин параметра $Пк$ – $Пк^*$.

Показатель качества $Пк$ представляет собой систему минимально допустимых величин показателей качества обработки почвы.

Для оценки сопротивления почвы $P(t)$ используем обобщенный показатель физико-механических свойств почвы в виде твердости $\rho(t)$.

Случайный характер входного воздействия вызывает колебания элементов рабочих органов, соединенных со стойкой через упругий элемент. Колебания элементов рабочих органов через обратную связь стремятся изменить величину и свойства входного воздействия.

Процесс колебаний части рабочего органа, закрепленного через упругий элемент, представлен на рисунке 2.

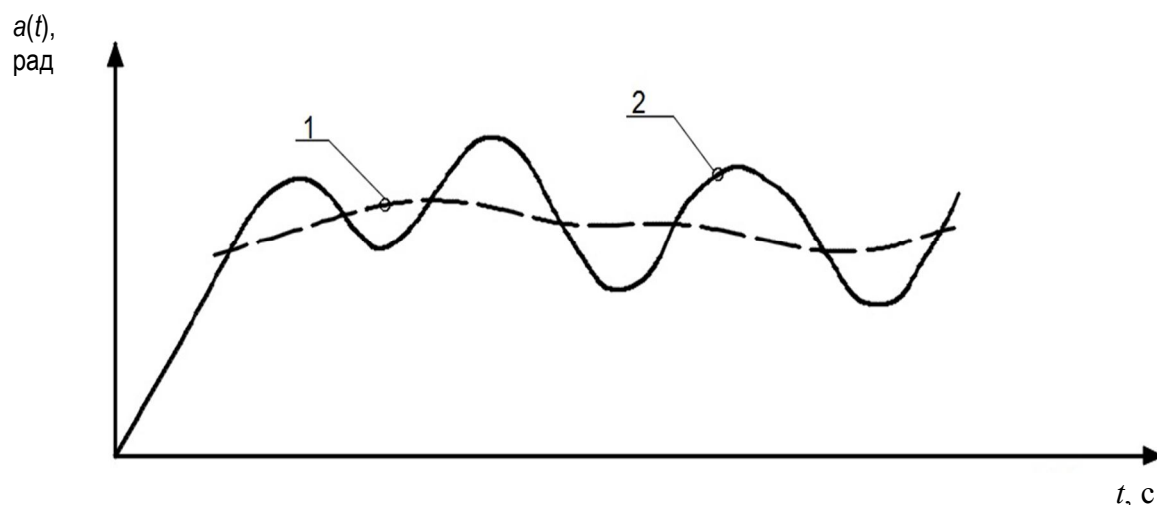


Рис. 2. Процесс колебаний рабочего органа с упругим элементом:
1 – математическое ожидание составляющей угла колебания;
2 – центрированная высокочастотная составляющая колебаний

Примером почвообрабатывающего рабочего органа, в конструкции которого используется упругий элемент, является динамичный рабочий орган. Схема динамичного рабочего органа представлена на рисунке 3.

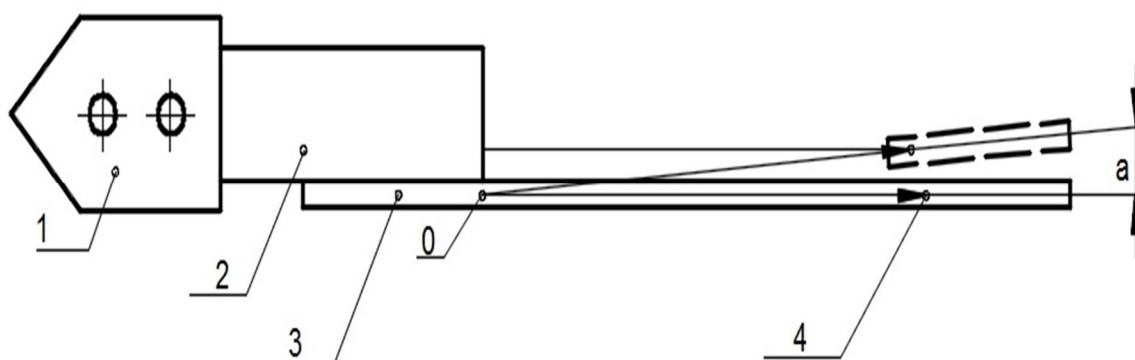


Рис. 3. Схема динамичного рабочего органа для определения параметров колебаний стрелчатой части: 1 – наральник шириной 65 мм; 2 – стойка; 3 – упругий элемент; 4 – точка крепления стрелчатой части

Особенностью такого рабочего органа является то, что его стрелчатая часть прикреплена к стойке через упругий элемент 3. Под воздействием момента случайного возмущающего воздействия стрелчатая часть совершает колебательное движение.

Под воздействием момента сил элемент рабочего органа отклоняется на некоторый угол $\tilde{\alpha}$, и около него совершаются колебания высокой интенсивности $\hat{\alpha}$. Примем, что процессы, вызывающие $\tilde{\alpha}(t)$ и $\hat{\alpha}(t)$, не коррелированы и система линейна.

В качестве основных параметров колебаний будем использовать следующие:

- средний угол отклонения точки крепления стрелчатой части рабочего органа к упругому элементу относительно стойки рабочего органа $\tilde{\alpha}$;
- дисперсия угловых отклонений θ_{11} ;
- дисперсия скорости угловых отклонений θ_{22} .

Средний угол отклонений характеризует направление колебаний, и его влияние на величину сопротивления проявляется через изменение угла крошения и площади активной части рабочего органа.

Дисперсия угловых отклонений является статистическим аналогом квадрата амплитуды колебаний, а дисперсия скорости угловых колебаний – аналогом квадрата угловой скорости колебаний.

Для решения поставленной задачи используем следующую базовую модель процесса:

$$I \cdot \ddot{\alpha}(t) + \eta \dot{\alpha}(t) + C \alpha(t) = M(\alpha, V, \rho, H, t); \quad (1)$$

$$\Delta R(t) = R_{ж}(t) - R_y(t); \quad (2)$$

$$R_{ж}(t) = R(V, \rho, H); \quad (3)$$

$$R_y(t) = R(\tilde{\alpha}, \theta_{11}, \theta_{22}), \quad (4)$$

где $M(\alpha, V, \rho, H, t)$ – момент случайной вынуждающей силы;

I – момент инерции элемента рабочего органа;

C – жесткость упругого элемента;

η – коэффициент демпфирования.

$R_{ж}(t)$ – тяговое сопротивление нединамичного (типового) почвообрабатывающего рабочего органа;

$R_y(t)$ – тяговое сопротивление динамичного почвообрабатывающего рабочего органа.

Уравнение (1) представляет собой функцию, которая описывает динамику изменения угловых колебаний упругого элемента рабочего органа в зависимости от тягового сопротивления и параметров колебаний жестко закрепленной части рабочего органа (стойки). Уравнения (2), (3), (4) являются экспериментальным блоком базовой модели.

При определении дисперсии угловых отклонений θ_{11} и дисперсии скорости угловых отклонений θ_{22} используем принцип суперпозиции и условия некоррелированности входных сигналов, вызывающих $\tilde{\alpha}$ и $\hat{\alpha}$.

Применив метод уравнений моментов и представив ранее полученные зависимости в форме двух уравнений первого порядка, переходим к решению системы уравнений относительно корреляционных моментов выходных переменных:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_{11} = 2 \cdot \theta_{12}; & (5) \\ \dot{\theta}_{12} = \theta_{22} - \alpha_{23} \theta_{11} - \alpha_{22} \theta_{12}; & (6) \\ \theta_{22} = -2\alpha_{23} \theta_{22} - \alpha_{22} \theta_{12} + k^2 Q(t), & (7) \end{cases}$$

$$\text{где } \theta_{11} = M[\alpha(t)^2], \quad \theta_{22} = M\left[\frac{d}{dt} \alpha(t)^2\right], \quad \alpha_{22} = C/I, \quad \alpha_{23} = \eta/I, \quad k = \rho_c/I \quad (8)$$

представляют собой динамические параметры системы;

$Q(t)$ – интенсивность централизованной составляющей силы сопротивления, рад²/с³;

ρ_c – плечо момента сил сопротивления почвы, мм.

$\dot{\theta}_{12}$ и $\ddot{\theta}_{11}$ – соответственно первая и вторая производные параметров колебаний.

Оценка выхода уравнения $\Delta R(t)$ может быть получена после идентификации функции $R_{ж}(t)$, $R_y(t)$, после чего могут быть определены $\tilde{\alpha}(t)$, $\theta_{11}(t)$, $\theta_{22}(t)$.

Для характеристики участков стационарных колебаний указанных функций экспериментально определены их значения.

Для участка установившихся колебаний части почвообрабатывающего рабочего органа, закрепленной через упругий элемент, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{\alpha} = M(\alpha, V, \rho, H, t)/C; \\ \theta_{11} = k^2 \theta / (2\alpha_{22} \cdot \alpha_{23}); \\ \theta_{22} = k^2 \theta / (2\alpha_{23}); \\ \theta_{22} = \alpha_{22} / \theta_{11}; \\ \theta_{12} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Далее оцениваем следующие параметры:

- α_{22} и k – на основе результатов стендовых испытаний;
- $\tilde{\alpha}$, θ_{11} и θ_{22} – по результатам натуральных экспериментов;
- α_{23} – по формуле (8).

Коэффициент демпфирования η можно определить, зная параметры α_{22} и α_{23} , а интенсивность центрированной составляющей силы сопротивления Q , зная параметры α_{22} , α_{23} и θ_{11} .

Заключение

Отличительной особенностью разработанной математической модели является наличие внутренней отрицательной обратной связи по параметрам колебаний, вызывающих изменение тягового сопротивления рабочего органа.

Основу базового блока модели составляет уравнение динамики упругого колебательного звена, на которое воздействует случайная возмущающая сила.

При разработке модели принято, что средний угол, дисперсия среднего угла и дисперсия скорости угловых колебаний влияют на изменение средней величины и дисперсии тягового сопротивления рабочего органа.

Идентификация параметров модели должна осуществляться по экспериментальным данным с участками стационарных колебаний.

Модель функционирования позволяет формализовать целевую функцию для оптимизации параметров колебаний части рабочего органа, закрепленной на стойке через упругий элемент.

Библиографический список

1. Валге А.М. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на STATGRAPHICS и EXCEL / А.М. Валге, Н.И. Джабборов, В.А. Эвиев. – Элиста : Изд-во КалмГУ, 2015. –140 с.
2. Джабборов Н.И. Определение энерготехнологических параметров динамичных почвообрабатывающих агрегатов / Н.И. Джабборов, А.В. Добринов, Г.А. Семенова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4 (49). – С. 252–259.
3. Джабборов Н.И. Оценка тягово-динамических показателей почвообрабатывающих агрегатов / Н.И. Джабборов, Д.А. Максимов, Г.А. Семенова // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – № 93. – С. 53–64.
4. Жилкин В.А. Расчеты на прочность и жесткость элементов сельскохозяйственных машин. Ч. I : учеб. пособие / В.А. Жилкин. – Челябинск : ЧГАУ, 2005. – 427 с.
5. Иванов В.Ю. Исследование математической модели сложной динамической системы рыхлительного агрегата с системой управления положением рабочего органа / В.Ю. Иванов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – № 3 (31). – С. 35–38.

6. Измайлов А.Ю. Автоматизированные информационные технологии в производственных процессах растениеводства / А.Ю. Измайлов, В.К. Хорошенков // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 4. – С. 3–9.
7. Измайлов А.Ю. Интенсивные машинные технологии и техника нового поколения для производства основных групп сельскохозяйственной продукции / А.Ю. Измайлов, Ю.Х. Шогенов // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 7. – С. 2–6.
8. Кленин Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Кленин, В.А. Сакур. – Москва : Колос, 1994. – 751 с.
9. Лурье А.Б. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления / А.Б. Лурье, И.С. Нагорский. – Москва : Колос, 1979. – 312 с.
10. Макаренко А.Н. Обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающих машин с переменными углами рабочих поверхностей / А.Н. Макаренко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 5–3 (10–3). – С. 236–240.
11. Проблемные вопросы повышения энергоэффективности МТА с упруго закрепленными рабочими органами / Д.С. Гапич, В.А. Эвиев, Р.А. Косульников, С.А. Чумаков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1 (49). – С. 312–318.
12. Российская технология обработки почвы и посева на основе собственных конкурентоспособных инновационных машин / Н.К. Мазитов, Я.П. Лобачевски, Р.С. Рахимов и др. // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 7. – С. 68–70.
13. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин : монография / Г.Н. Синеоков. – Москва : Машиностроение, 1965. – 312 с.
14. Старовойтов С.И. Горизонтальная составляющая тягового сопротивления стрелчатой лапы с переменным углом крошения и с трансформированным лезвием / С.И. Старовойтов // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 1 (3). – С. 79–86.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Нозим Исмоилович Джабборов – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории систем моделирования и автоматизированного проектирования технических средств ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, e-mail: nozimjon-59@mail.ru.

Александр Владимирович Сергеев – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, научно-исследовательской лаборатории систем моделирования и автоматизированного проектирования технических средств ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, e-mail: mrsergeev05@gmail.com.

Валерий Андреевич Эвиев – доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета, зав. кафедрой агроинженерии ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова», Россия, г. Элиста, e-mail: aviev@yandex.ru.

Нимья Григорьевич Очиров – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», Россия, г. Магадан, e-mail: nimya80@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 05.10.2019

Дата принятия к печати 25.11.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Nozim I. Dzhaborov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Scientific Researcher, Research Laboratory of Systems Modeling and Computer-Aided Design of Engineering Facilities, Institute for Engineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, St. Petersburg, Tyarlevo, e-mail: nozimjon-59@mail.ru.

Aleksandr V. Sergeev, Candidate of Engineering Sciences, Senior Scientific Researcher, Research Laboratory of Systems Modeling and Computer-Aided Design of Engineering Facilities, Institute for Engineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, St. Petersburg, Tyarlevo, e-mail: mrsergeev05@gmail.com.

Valery A. Eviev, Doctor of Engineering Sciences, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Head of the Dept. of Agricultural Engineering, Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikov, Russia, Elista, e-mail: aviev@yandex.ru.

Nimya G. Ochirov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Automobile Transport, Russia, Magadan, e-mail: nimya80@mail.ru.

Received September 05, 2019

Accepted after revision November 25, 2019