

УДК 631.3.02: 004.358.001.891.57



ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЧВЕННОГО АГРЕГАТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАБОЧИМ ЭЛЕМЕНТОМ МАШИНЫ

КРАВЧУК В.И.,член.-корр. НААН Украины,
докт. техн. наук, профессор,**ДАВЫДЮК В.П.,**

канд. техн. наук

Украинский научно-исследовательский институт прикладных информационных технологий, ул. Инженерная, 5, пгт Дослидницьке,
Васильковский район, Киевская обл., 08654, Украина, e-mail: DVP46@yandex.ua

*Показали, что при выполнении технологических операций сельскохозяйственного производства рабочие элементы машины постоянно или импульсно взаимодействуют с отдельными объектами сырья сложной конфигурации (корне- или клубнеплодами, овощами, фруктами, зерном, почвенными агрегатами). Аналитическое описание такого взаимодействия предполагает представление геометрической конфигурации элементов механической системы математическими функциями. Однако на сегодня не существует универсальных методов описания разнообразных поверхностей ограниченным количеством соотношений, за исключением сферических, цилиндрических или эллипсоидных. Установили принципы исследования характера деформирования элементов механических систем, описанного множеством переменных параметров. Для этого использовали физическую модель почвенной среды, состоящую из почвенных агрегатов сферической конфигурации. Привели принципы численного исследования характера деформирования почвенного агрегата сферической конфигурации под влиянием дискового рабочего элемента почвообрабатывающего орудия при изменении большого количества параметров. Отметили, что исследование систем аналитических моделей второго порядка с переменными коэффициентами в частных производных с множеством входных и выходных параметров может быть эффективно реализовано численными методами с использованием специальных функций *varargin* и *varargout*. Кроме этого, теоретическое значение деформации почвенного агрегата может быть определено численными методами системы *MatLab* с использованием разработанного программного обеспечения. Показали, что предельное значение деформации почвенного агрегата, определенное в лабораторных условиях, следует сравнить с теоретическим и установить необходимые кинематические и конструктивные параметры дискового рабочего элемента и почвообрабатывающего орудия.*

Ключевые слова: *сельхозмашины, механическая система, дисковый рабочий орган, аналитическая модель, множество переменных параметров.*

При выполнении технологических операций сельскохозяйственного производства рабочие элементы машины постоянно или импульсно взаимодействуют с отдельными объектами сырья сложной конфигурации (корне- или клубнеплодами, овощами, фруктами, зерном, почвенными агрегатами). Аналитическое описание такого взаимодействия предполагает представление

конфигурации элементов механической системы математическими функциями. Сегодня не существует универсальных методов описания разнообразных поверхностей ограниченным количеством соотношений, за исключением сферических, цилиндрических или эллипсоидных [1]. Поэтому в зависимости от решаемых задач используют также интерполяционные методы представления по-

верхности любого элемента механической системы по опытным данным ее параметров [2-4].

Цель исследований – определение принципов изучения характера деформирования элементов механических систем, описанного множеством переменных параметров.

Материалы и методы. Наиболее приближенной концепцией почвенной среды принято считать физическую модель, состоящую из почвенных агрегатов сферической конфигурации [5]. Рассмотрим взаимодействие такого агрегата и дискового рабочего элемента почвообрабатывающего орудия, установленного под углом α к направлению движения орудия и под углом β к вертикали (рис. 1). Почвенный агрегат при действии дискового рабочего элемента и земного притяжения приобретает ускорение. При этом частицы почвы, которые движутся быстрее, взаимодействуют с другими, более медленными, которые непрерывно изменяют свою форму и определяют напряженное состояние и деформацию почвенного агрегата.

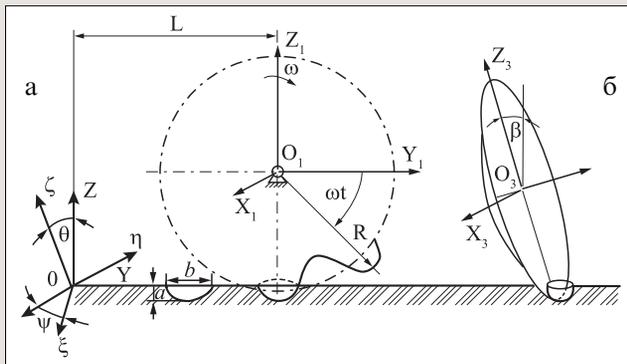
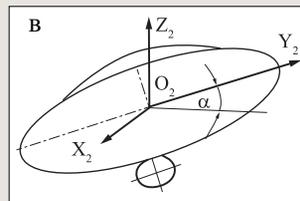


Рис. 1. Схема расположения дискового рабочего органа почвообрабатывающего орудия:

а – вид со стороны оси;

б – вид сбоку; в – вид сверху;

ωt – угол вращения дискового рабочего элемента; α, β – углы Крылова



Схему расположенная дискового рабочего органа на оси почвообрабатывающего орудия (рис. 1) поместим в неинерциальную систему координат $O_1\xi\eta\zeta$ (систему, широко распространенную в теории гироскопов). При этом оси $O_1\xi, O_1\eta, O_1\zeta$ совместим с главными осями инерции. Кроме того, ось $O_1\xi$ направим по линии узлов, то есть по линии пересечения плоскостей $\zeta O_1\xi$ и $ZO_1\xi$. В центре инерции O_1 (рис. 2а) разместим также инерциальную систему координат O_1XYZ так, чтобы ось O_1X была параллельна, а ось O_1Z – перпендикулярна поверхности поля. Символом θ обозначим угол, об-

разованный плоскостями $ZO_1\xi$ и $\zeta O_1\xi$ и ψ – угол между плоскостями ZO_1X и $ZO_1\xi$.

При таком размещении систем отсчета углы θ и ψ будут определять положение неинерциальной системы координат $O_1\xi\eta\zeta$ относительно инерциальной O_1XYZ . Угол собственного вращения φ почвенного агрегата в системе отсчета $O_1\xi\eta\zeta$ отсутствует, поскольку относительно оси $O_1\zeta$ вращается лишь почвенный агрегат.

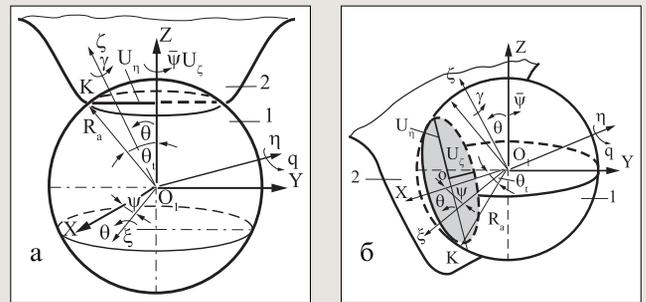


Рис. 2. Схема деформирования почвенного агрегата дисковым рабочим органом:

а – деформирование почвенного агрегата дисковым рабочим элементом; б – боковое деформирование; 1, 2 – почвенный агрегат и дисковый рабочий элемент; U_η, U_ζ, R – компоненты деформации почвенного агрегата по осям $O_1\eta, O_1\zeta$ и его радиус; $O_1XYZ, O_1\xi\eta\zeta$ – инерциальная и неинерциальная системы координат; θ, ψ – углы Эйлера; p, q, r – компоненты угловой скорости вращения почвенного агрегата

Предположим, что под действием дискового рабочего элемента деформирование почвенного агрегата происходит как в плоскости ZO_1Y , так и в плоскостях ZO_1X и XO_1Y . Аналитическое описание такой деформации представим системами уравнений [6].

В направлении оси $O_1\xi$:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & [-2\dot{\theta}\dot{U}_\zeta/U_\zeta - \dot{\theta}^2(ctg\dot{\theta}t - tg\dot{\theta}t + R_a \sin \dot{\theta}t / 2U_\zeta) - \\ & - R\dot{\omega} \sin \omega t \sin \alpha \sin \beta tg \dot{\theta}t / 2U_\zeta - \\ & - R\omega^2 \cos \omega t \sin \alpha \sin \beta tg \dot{\theta}t / 2U_\zeta + \\ & + \ddot{L} \sin \alpha \sin \beta tg \dot{\theta}t / 2U_\zeta - \\ & - g \sin \beta tg \dot{\theta}t / 2U_\zeta] / (1 + R_a \sin \dot{\theta}t tg \dot{\theta}t / 2U_\zeta); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{U}_\zeta = & -2\ddot{\theta}ctg\dot{\theta}tU_\zeta - 2\dot{\theta}^2U_\zeta(\cos^2 \dot{\theta}t - 1) - \\ & - 4\dot{\theta}U_\zeta ctg \dot{\theta}t - R\dot{\omega} \sin \omega t \sin \alpha \sin \beta - R\omega^2 \times \\ & \times \cos \omega t \sin \alpha \sin \beta + \ddot{L} \sin \alpha \sin \beta - g \sin \beta; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega} = & [-\ddot{\theta}(2ctg \dot{\theta}tU_\zeta - R_a \sin \dot{\theta}t) - \dot{\theta}^2[2U_\zeta(ctg^2 \dot{\theta}t - 1) - \\ & - R_a \cos \dot{\theta}t] - 4\dot{\theta}U_\zeta ctg \dot{\theta}t - R\omega^2 \cos \omega t \sin \alpha \sin \beta + \\ & + \ddot{L} \sin \alpha \sin \beta - g \sin \beta] / R \sin \omega t \sin \alpha \sin \beta; \end{aligned} \quad (1)$$

где $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение деформации почвенного агрегата, c^{-2} ;

\ddot{U}_ζ – поступательное ускорение деформации почвенного агрегата, $mm \cdot c^{-2}$;

$\dot{\omega}$ – угловое ускорение вращения дискового рабочего элемента, $rad \cdot c^{-2}$;

\ddot{L} – поступательное ускорение движения орудий, $mm \cdot c^{-2}$.

В направлении оси $O_1\eta$:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & [-2\dot{\theta}\dot{U}_\zeta / U_\zeta - \dot{\theta}^2 (ctg\dot{\theta}t - tg\dot{\theta}t + R_a \sin \dot{\theta}t / 2U_\zeta) - \\ & - R\dot{\omega} \sin \omega t \cos \alpha tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta - R\omega^2 \cos \omega t \cos \alpha tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta + \\ & + \ddot{L} \cos \alpha tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta] / (1 + R_a \sin \dot{\theta}t tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta); \\ \ddot{U}_\zeta = & -2\ddot{\theta}ctg\dot{\theta}tU_\zeta - 2\dot{\theta}^2 U_\zeta (ctg^2\dot{\theta}t - 1) - \\ & - 4\dot{\theta}\dot{U}_\zeta ctg\dot{\theta}t - R\dot{\omega} \sin \omega t \cos \alpha - \\ & - R\omega^2 \cos \omega t \cos \alpha + \ddot{L} \cos \alpha; \\ \dot{\omega} = & [-\ddot{\theta}(2ctg\dot{\theta}tU_\zeta - R_a \sin \dot{\theta}t) - \\ & - \dot{\theta}^2 [2U_\zeta (ctg^2\dot{\theta}t - 1) - R_a \cos \dot{\theta}t] - \\ & - 4\dot{\theta}\dot{U}_\zeta ctg\dot{\theta}t - R\omega^2 \cos \omega t \cos \alpha + \\ & + \ddot{L} \cos \alpha] / R \sin \omega t \cos \alpha; \\ \ddot{L} = & [\ddot{\theta}(2ctg\dot{\theta}tU_\zeta + R_a \sin \dot{\theta}t) + \\ & + \dot{\theta}^2 [2U_\zeta (ctg^2\dot{\theta}t - 1) + R_a \cos \dot{\theta}t] + \\ & + 4\dot{\theta}\dot{U}_\zeta ctg\dot{\theta}t + R\dot{\omega} \sin \omega t \cos \alpha + \\ & + R\omega^2 \cos \omega t \cos \alpha] / \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

В направлении оси $O_1\zeta$:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & [-2\dot{\theta}\dot{U}_\zeta / U_\zeta - \dot{\theta}^2 (ctg\dot{\theta}t - tg\dot{\theta}t + R_a \sin \dot{\theta}t / 2U_\zeta) + \\ & + R\dot{\omega} \cos \omega t \cos \beta tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta - R\omega^2 \sin \omega t \cos \beta tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta - \\ & - g \cos \beta tg\dot{\theta}t / U_\zeta] / (1 + R_a \sin \dot{\theta}t tg\dot{\theta}t / 2U_\zeta); \\ \ddot{U}_\zeta = & -2\ddot{\theta}ctg\dot{\theta}tU_\zeta - 2\dot{\theta}^2 U_\zeta (ctg^2\dot{\theta}t - 1) - \\ & - 4\dot{\theta}\dot{U}_\zeta ctg\dot{\theta}t + R\dot{\omega} \cos \omega t \cos \beta - R\omega^2 \times \\ & \times \sin \omega t \cos \beta - g \cos \beta; \\ \dot{\omega} = & [\ddot{\theta}(2ctg\dot{\theta}tU_\zeta + R_a \sin \dot{\theta}t) + \\ & + \dot{\theta}^2 [2U_\zeta (ctg^2\dot{\theta}t - 1) + R_a \cos \dot{\theta}t] + \\ & + 4\dot{\theta}\dot{U}_\zeta ctg\dot{\theta}t + R\omega^2 \sin \omega t \cos \beta + \\ & + g \cos \beta] / R \cos \omega t \cos \beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты и обсуждение. Исследовать характер взаимодействия элементов механической системы с использованием элементарных функций или квадратур невозможно, поскольку система аналитических моделей (1)-(3) относится ко второму по-

рядку с переменными коэффициентами в частных производных.

В связи с этим воспользуемся численными методами с привлечением программного обеспечения системы *MatLab* [7, 8] по алгоритму:

– привести дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных к системе уравнений первого порядка [7, 9];

– разработать на языке *MatLab* программное обеспечение с использованием системы уравнений первого порядка;

– выбрать необходимую программу расчета в системе *MatLab*;

– провести коррекцию программного обеспечения;

– осуществить визуализацию результатов и их анализ.

Поскольку деформирование почвенного агрегата происходит с изменением множества параметров, то декларирование массива памяти по методу, приведенному в [2, 3], невозможно. Поэтому для исследования систем, подобных (1)-(3), разработаем файл-программу, в которой предварительно модернизируем файл-функцию, обозначив ее определенным дескриптором [7, 8]. Сущность модернизации состоит в том, что в программном обеспечении мы продекларировали один элемент массива памяти, в который занесли переменные по списку, определенному специальными функциями *varargin* и *varargout*.

С помощью разработанного программного обеспечения мы получили графические зависимости (рис. 3-5), результаты анализа которых свидетельствуют, что во время движения почвообрабатывающего орудия со скоростью 3,3 м/с деформирование почвенного агрегата радиусом 100 мм рабочим органом с диском радиуса 600 мм, установленным под углом 40° к направлению движения агрегата и под углом 18° к вертикали (рис. 1), характеризуется образованием по направлению оси $O_1\zeta$ волны напряженности, амплитуда которой за 0,0018 с достигает 2,47 мм. При этом скорость деформирования составляет 2,3 м/с (рис. 3а). Через 0,004 с деформирование почвенного агрегата переходит в стационарный режим.

В течение 0,017 с величина деформации достигает 10,8 мм (рис. 3а), при этом скорость деформирования составляет 4,0 м/с (рис. 3б). Одновременно угол деформации увеличивается до 0,96 рад (рис. 3в), а угловая скорость достигает 189,3° рад/с (рис. 3г).

Кроме того, одновременное деформирование почвенного агрегата по направлению осей $O_1\eta$ и $O_1\zeta$ характеризуется увеличением деформации, которая на протяжении 0,017 с при скорости дефор-

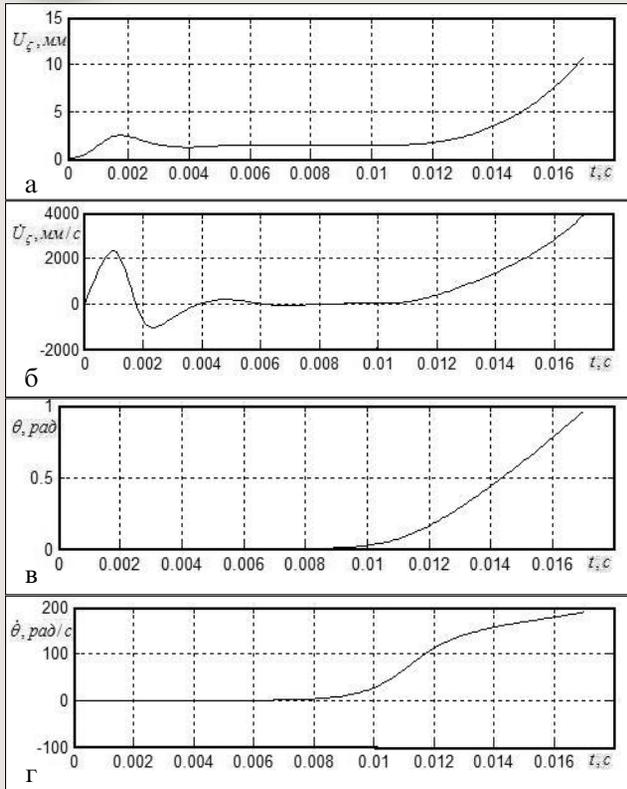


Рис. 3. Характер деформирования почвенного агрегата по оси O_1z : а – перемещение; б – скорость; в – угловой параметр; г – угловая скорость

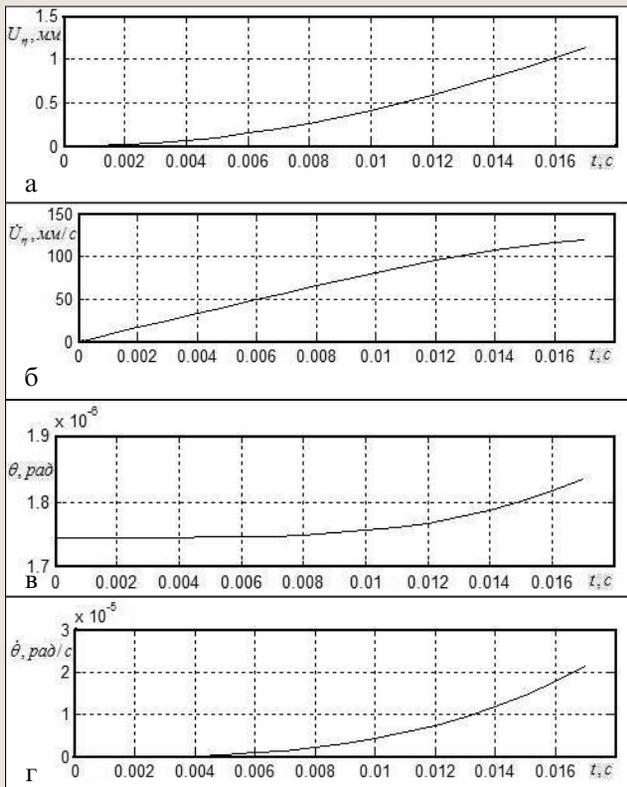


Рис. 4. Характер деформирования почвенного агрегата по оси $O_1\eta$: а – перемещение; б – скорость; в – угловой параметр; г – угловая скорость

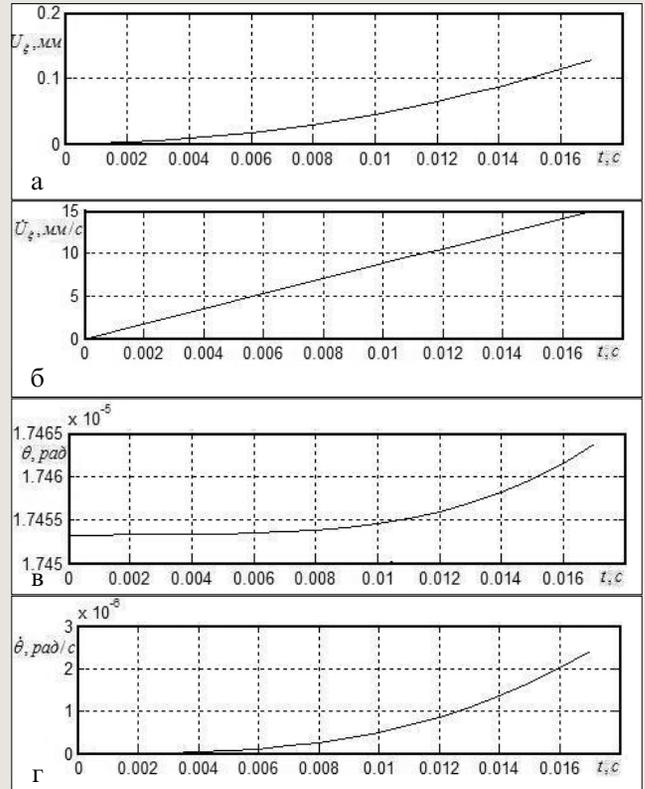


Рис. 5. Характер деформирования почвенного агрегата по оси O_1z : а – перемещение; б – скорость; в – угловой параметр; г – угловая скорость

мирования 0,12 и 0,015 м/с (рис. 4б; 5б), соответственно, составляет 1,1 и 0,13 мм (рис. 4а; 5а). При этом угловые параметры имеют шестой порядок малости (рис. 4в, 4г, 5в, 5г). Увеличение продолжительности действия дискового рабочего элемента на почвенный агрегат по направлению осей $O_1\eta$ и O_1z на протяжении 0,3 с и 0,1 с обуславливает волну напряженности, амплитуда которой составляет 2,47 мм.

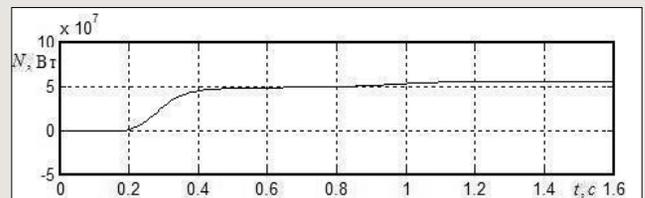


Рис. 6. Изменение мощности деформирования почвенного агрегата

Дальнейшее увеличение кинематических параметров движения почвообрабатывающего орудия и дискового рабочего органа обуславливает рост деформации почвенного агрегата, которое стремится к бесконечности. При этом характер деформирования подобен диаграмме растяжения образца из пластичного материала [10] и с течением времени не изменяется. Мощность деформирования

почвенного агрегата за 0,6 с достигает 50 Вт (рис. 6).

Выводы

1. Исследование систем аналитических моделей второго порядка с переменными коэффициентами в частных производных с множеством входных и выходных параметров может быть эффективно реализовано численными методами с использованием специальных функций *varargin* и *varargout*.
2. Теоретическое значение деформации почвен-

ного агрегата может быть определено численными методами системы *MatLab* с применением разработанного программного обеспечения.

3. Предельное значение деформации почвенного агрегата, определенное в лабораторных условиях, необходимо сравнить с теоретическим и установить необходимые кинематические и конструктивные параметры дискового рабочего органа и почвообрабатывающего орудия.

Литература

1. Бугров Я.С., Никольский С.М. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. Учебное пособие. М.: Наука, 1984. – 190 с.
2. Роджерс Д. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
3. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 504 с.
4. Алберг Дж., Нильсон Э., Уоли Дж. Теория сплайнов и ее приложения: Пер. с англ. – М.: Наука, 1971. – 282 с.
5. Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3 т. – М.: Колос, 1965, 1968. – Т. 1. – 720 с.; Т. 2. – 459 с.
6. Кравчук В.И., Давидюк В.П. До формализа-

ції взаємодії робочого елемента машини та об'єкта сировини сільськогосподарського виробництва // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. наук. праць УкрНДІПВТ. – Дослідницьке, 2013. – С. 55.

7. Ануфриев И.К. Самоучитель Matlab 5/3/6.x. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 736 с.
8. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP 1/7 Simulink 5/6. Основы применения. Серия. – М.: СОЛОН – Пресс, 2005. – 800 с.
9. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. – М.: Наука, 1972. – Т. 1. – 452 с.; Т. 2. – 572 с.
10. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.

PRINCIPLES OF RESEARCH OF SOIL PED DEFORMATION AT INTERACTION WITH MACHINE WORKING ELEMENT

V.I. Kravchuk, V.P. Davydyuk

Ukrainian Research Institute of Information Technologies with Applications, Inzhenernaya St., 5, set. Doslidnitskoe, Vasil'kov district, Kiev region, 08654, Ukraine, e-mail: DVP46@yandex.ua

*Working elements of machines constantly or pulsewise interact with some of objects in raw materials with a difficult configuration (a root or tuber crops, vegetables, fruit, grain, soil peds) when performing technological operations in agricultural production. Expression of mechanical system by mathematical functions is needed to describe analytical such interaction. However, there are no universal methods of the description of various surfaces limited by quantity of ratios, except for spherical, cylindrical or ellipsoidal. The authors established the principles of research of deformation behavior of elements of mechanical systems described by a set of variable parameters. Physical model of the soil consisting of spherical peds was used for this purpose. The authors gave the principles of numerical research of deformation behavior of a spherical soil ped under the influence of a disk working element of the soil-cultivating tool at change of a high number of parameters. Research of systems of analytical models of the second order with variable coefficients in partial derivatives with a set of input and output parameters can be effectively realized by numerical methods with use of the special *varargin* and *varargout* functions. Besides, theoretical value of deformation of the soil ped can be determined by numerical methods of *MatLab* system with use of the developed software. It is necessary to compare the limit value of deformation of the soil ped defined in laboratory conditions with theoretical one and to establish required kinematic and design data of a disk working element and the soil-cultivating tool.*

Keywords: Agricultural machines; Mechanical system; Disk working element; Analytical model; Variable parameter set.

References

1. Bugrov Ya.S., Nikol'skiy S.M. *Elementy lineynoy algebrы i analiticheskoy geometrii* [Elements of linear algebra and analytical geometry]. Uchebnoe posobie. Moscow: Nauka, 1984. 190 pp. (Russian).
2. Rodgers, David F. *Matematicheskie osnovy mashinnoy grafiki* [Mathematical Elements for Computer Graphics]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 240 pp. (Russian).
3. Rodgers, David F. *Algoritmicheskie osnovy mashinnoy grafiki* [Procedural Elements for Computer Graphics]. Moscow: Mir, 1989. 504 pp. (Russian).
4. Ahlberg, J., Nilson, E.N., Walsh, J.L. *The theory of splines and their applications*. Moscow: Nauka, 1971. 282 pp. (Russian).
5. Goryachkin V.P. *Sobranie sochineniy: V 3 t.* [Collected works in 3 volumes]. Moscow: Kolos, 1965, 1968. T. 1. 720 pp.; T. 2. 459 pp. (Russian).
6. Kravchuk V.I., Davidiyuk V.P. *Do formalizatsii vzaemodii robochogo elementa mashini ta ob'ekta sirovini sil's'kogospodars'kogo virobnitstva. Tekhniko–tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoi tekhniki i tekhnologii dlya sil's'kogo gospodarstva Ukraini: Zb. nauk. prats' UkrNDIPVT. – Doslidnits'ke, 2013. pp. 55 (Ukrainian).*
7. Anufriev I.K. *Samouchitel' Matlab 5/3/6.x* [Self-teacher Matlab 5/3/6.x]. SPb.: BkhV-Peterburg. 2004. 736 pp. (Russian).
8. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/5 SP 1/7 Simulink 5/6. Osnovy primeneniya. Seriya* [MATLAB 6/5 SP 1/7 Simulink 5/6. Principles of application. Series]. Moscow: SOLON-Press, 2005. 800 pp. (Russian).
9. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischislenie* [Differential and integral calculus]. Moscow: Nauka, 1972. V. 1. 452 pp.; V. 2. 572 pp. (Russian).
10. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1976. 608 pp. (Russian).



Сделано в РОССИИ

