

## Сведения об авторах

*Малюков Сергей Владимирович* – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

*Панявина Екатерина Анатольевна* – доцент кафедры менеджмента и экономики предпринимательства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат экономических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: panyavina-e-a@mail.ru.

*Аксенов Алексей Александрович* – доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: aaa-aksenov@mail.ru.

## Information about authors

*Malyukov Sergey Vladimirovich* – Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

*Panyavina Ekaterina Anatolievna* – Associate Professor of Department of management and Economics entrepreneurship, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Economics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: panyavina-e-a@mail.ru.

*Aksenov Alexey Aleksandrovich* – Associate Professor of Production, Repair and Maintenance of Machinery Department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: aaa-aksenov@mail.ru.

DOI: 10.12737/article\_5c920171c372b2.19385616

УДК 631.31, 004.94

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДИНАМОМЕТРИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ НА ВИРТУАЛЬНОМ СТЕНДЕ

кандидат технических наук **М.Н. Лысыч**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

Статья посвящена исследованию процесса взаимодействия упруго закрепленных почвообрабатывающих рабочих органов и препятствий средствами компьютерных приложений, моделирующих динамику движения 3d-моделей (MDB), созданных в среде САПР. Описывается конструкция виртуального стенда и динамометрического блока, реализованная в среде САПР SolidWorks и приложении для моделирования динамики движения SolidWorks Motion. Виртуальный стенд позволяет одновременно фиксировать все составляющие вектора тягового сопротивления ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ). Как пример использования виртуального стенда приводятся измеренные объемные силовые характеристики процесса преодоления пня секцией модульного дискового культиватора и силы, возникающие на пружине предохранительного механизма. Также для более детального исследования силовых характеристик предохранительного механизма моделировался процесс въезда рабочего органа на препятствие клиновидной формы с плоской контактной поверхностью и постоянным углом подъема. Это дало возможность получить силовые характеристики движения рабочих органов по горизонтальной поверхности препятствий любых допустимых высот за один эксперимент и оценить параметры предохранительного механизма. Данные с участка непосредственного взаимодействия рабочего органа с препятствием были аппроксимированы полиномом второй степени, что позволило рассчитать значения сил при различных высотах препятствия (0, 10, 20, 30, 40 см) и установить их максимумы:

$R_{x_{max}}=1075,22\text{H}$  (высота 10,42см),  $R_{y_{max}}=977,01\text{H}$  (высота 13,75см),  $R_{z_{max}}=3876,45\text{H}$  (высота 12,08см). Полученные с применением виртуального стенда данные могут анализироваться непосредственно в приложении в режиме реального времени, либо выводиться в сторонние программы где происходит их окончательная обработка. В дальнейшем они могут использоваться как для оптимизации конструкций рабочих органов и предохранительных механизмов, так и для достоверной имитации возмущений при моделировании рабочего процесса машинно-тракторного агрегата в целом.

**Ключевые слова:** многотельная динамика, САПР, пространственное динамометрирование, почвообрабатывающие рабочие органы, препятствия, вырубка

### SPATIAL DYNAMOMETRATION OF THE PROCESS OF OBSTACLES OVERCOMING BY WORKING BODIES OF TILLAGE TOOLS ON A VIRTUAL STAND

PhD (Engineering) M.N. Lysych<sup>1</sup>

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",  
Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

The article is devoted to the study of the interaction of elastically fixed tillage working bodies and obstacles by means of computer applications that simulate the dynamics of 3d-models (MDB) movements created in CAD environment. The design of virtual stand and dynamometer block is described, implemented in the environment of CAD SolidWorks and SolidWorks Motion applications for movement dynamics modeling. Virtual stand enables to simultaneously capture all the components of traction resistance vector ( $R_x$ ,  $R_y$ , and  $R_z$ ). The measured volumetric power characteristics of the process of stump overcoming by a section of modular disk cultivator and forces arising on a spring of safety mechanism are given as an example of virtual stand use. Also, the process of working body driving onto a wedge-shaped obstacle with a flat contact surface and a constant angle of lift has been modeled for a more detailed study of power characteristics of safety mechanism. This made it possible to obtain the power characteristics of the movement of the working bodies on the horizontal surface of the obstacles of any allowable heights in one experiment and to evaluate safety mechanism parameters. The data from the site of direct interaction of working body with an obstacle have been approximated by a second-degree polynomial, which made it possible to calculate the values of forces at various heights of the obstacle (0; 10; 20; 30; 40 cm) and establish their maxima:  $R_{x_{max}}=1075.22\text{ H}$  (height 10.42 cm),  $R_{y_{max}}=977.01\text{ H}$  (height 13.75cm),  $R_{z_{max}}=3876.45\text{ H}$  (height 12.08 cm). The data obtained with virtual stand use can be analyzed directly in the application in real time, or output to third-party programs, where their final processing takes place. In the future, they can be used both to optimize the structures of the working bodies and safety mechanisms, and to reliably simulate disturbances in modeling the working process of a machine-tractor unit as a whole.

**Keywords:** multibody dynamics, CAD, spatial dynamometry, tillage working bodies, obstacles, cutting

#### Введение

Для создания работоспособных рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий необходимо в первую очередь исследовать их способность преодолевать различные препятствия. Эти исследования целесообразно осуществлять с максимальным использованием компьютерного имитационного моделирования.

В настоящий момент моделирование взаимодействия почвообрабатывающих рабочих органов с препятствиями рассматривается только в двумерной системе координат [5-7] или трехмерной, но с измерением только тягового сопротивления [1]. Это при-

водит к значительному упрощению геометрии рабочих органов и снижению достоверности и информативности исследований. Существующие исследования объемного взаимодействия почвообрабатывающих рабочих органов относятся к исследованию их взаимодействия с однородной почвой. В этом случае используется либо метод конечных элементов (FEM) [4, 6], либо метод дискретных элементов (DEM) [2, 3, 9]. Однако эти методы не применимы для моделирования динамики многосвязных механизмов. Для этой задачи наиболее подходящим является метод многотельной динамики (MBD), широко используемый,

например, для моделирования движения подвески транспортных средств [8, 10].

### Цель исследования

Создание виртуального стенда для объемного динамометрирования процесса преодоления препятствий рабочими органами почвообрабатывающих орудий.

### Материал и методы исследования

Для объемного динамометрирования процесса преодоления препятствий рабочими органами почвообрабатывающих орудий был создан виртуальный стенд в среде САПР SolidWorks и приложении для моделирования динамики движения SolidWorks Motion (рис. 1).

Стенд состоит из основания 1, направляющей 2, водила 3 и условно обозначенной земли 4. На водило, имеющее возможность прямолинейного движения без трения, устанавливается виртуальный динамометрический блок 5 к которому крепится секция модульного орудия 6 или полностью орудие. В основании устанавливается пень 7 с различным боковым смещением.

Виртуальный динамометрический блок (рис. 2) состоит из направляющей 1 и каретки 2 направления  $R_y$ , направляющей 3 и каретки 4 направления  $R_z$ , направляющей 5 и каретки 6 направления  $R_x$ . Между каждой кареткой и направляющими установлены виртуальные нагрузочные пружины 7 без предварительного натяжения. Жесткость пружин выбирается либо равной жесткости стали, что исключает ее деформации под нагрузками, возникающими при моделировании, либо равной жесткости тракторных навесных устройств для имитации их колебаний.

Для проведения испытаний динамометрический блок жестко соединяется направляющей 1 с водилом с одной стороны, и кареткой 6 с исследуемым орудием с другой. Также жестко соединены между собой каретка 2 и направляющая 3, каретка 4 и направляющая 5. Таким образом конечное звено 6 может перемещаться в трех направлениях  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  относительно начального неподвижного звена 1, при этом его подвижность ограничивается виртуальными пружинами с задаваемой жесткостью.

### Результаты исследования и их обсуждение

Получаемые с использованием виртуального стенда данные могут анализироваться непосредственно в приложении в режиме реального времени, либо выводиться в сторонние программы где происходит их окончательная обработка. Как пример можно привести объемные силовые характеристики процесса преодоления пня высотой 30 см (условная глубина обработки 10 см, угол атаки  $30^\circ$ ) секцией модульного культиватора и силовую характеристику пружины предохранительного механизма (рис. 3), полученные с применением виртуального стенда и динамометрического блока. Проанализируем полученные результаты на трех основных участках: 1 – въезд на препятствие; 2 – движение по горизонтальной поверхности препятствия; 3 – сход с препятствия.

Первый участок. Компонента  $R_x$  достаточно резко возрастает до максимального значения в 11070 Н и также быстро убывает до 600 Н. Компонента  $R_y$  также резко изменяется до  $-14754$  Н из-за встречи тыльной стороны диска с пнем с последующим быстрым падением до  $-147$  Н. Компонента  $R_z$  начинает сначала несколько убывать от  $-1600$  Н (вес секции культиватора) до  $-2660$  Н с последующим быстрым ростом до 2460 Н. Сила на пружине быстро возрастает с 6800 Н (предварительная нагрузка) до 19000 Н. Второй участок. Компонента  $R_x$  колеблется стабилизируется у среднего значения 298 Н. Компонента  $R_y$  имеет среднее значение 384 Н. Компонента  $R_z$  имеет среднее значение 1652 Н. Сила на пружине также стабилизируется, имея среднее значение 18200 Н.

Третий участок. Компонента  $R_x$  в момент контакта стойки с ограничителями начинает колебаться с максимальной амплитудой до 3500 Н быстро стабилизируясь у 0 Н. Компонента  $R_y$  после незначительных колебаний стабилизируется у 0 Н. Компонента  $R_z$  возвращается к значению  $-1600$  Н. Сила на пружине также возвращается к исходному значению в 6800 Н. Значительных колебаний сил не наблюдается за счет использования виртуального демпфера.

Как видно из приведенных данных, полученные при проведении исследований значения, составляющих вектора тягового сопротивления, достаточно сложно поддаются анализу. Это связано с тем что измеряемые силы являются продуктом сложного пространственного взаимодействия препятствия и рабочего органа (например, четырехдисковая культиваторная батареи и цилиндрический пень), а также силового взаимодействия предохранительного механизма. Поэтому для оценки работоспособности виртуального стенда и силовой характеристики предохранительного механизма предлагается проводить эксперимент с использованием препятствия упрощенной клинообразной формы. Длина клина составляет 4м, максимальная высота – 0,4м. В конце клина расположен горизонтальный участок высотой 0,4м. Скорость движения рабочего органа составляет 1 м/с.

На рис. 4 представлен общий вид вирту-

ального испытательного стенда с препятствием клиновидной формы.

Имитационные исследования с применением виртуального стенда позволяют получить составляющие вектора тягового сопротивления  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  и силовые характеристики предохранительного механизма (рис. 5).

Проанализируем более подробно процесс движения рабочего органа по наклонной поверхности клина. Для этого отбросим данные полученные на участке до взаимодействия с препятствием и данные движения по горизонтальному участку препятствия. Затем произведем аппроксимацию результатов силового исследования полиномом второй степени. Это дает нам возможность рассчитать значения сил при различных высотах препятствия, а конкретно при 0, 10, 20, 30, 40см (рис. 6).

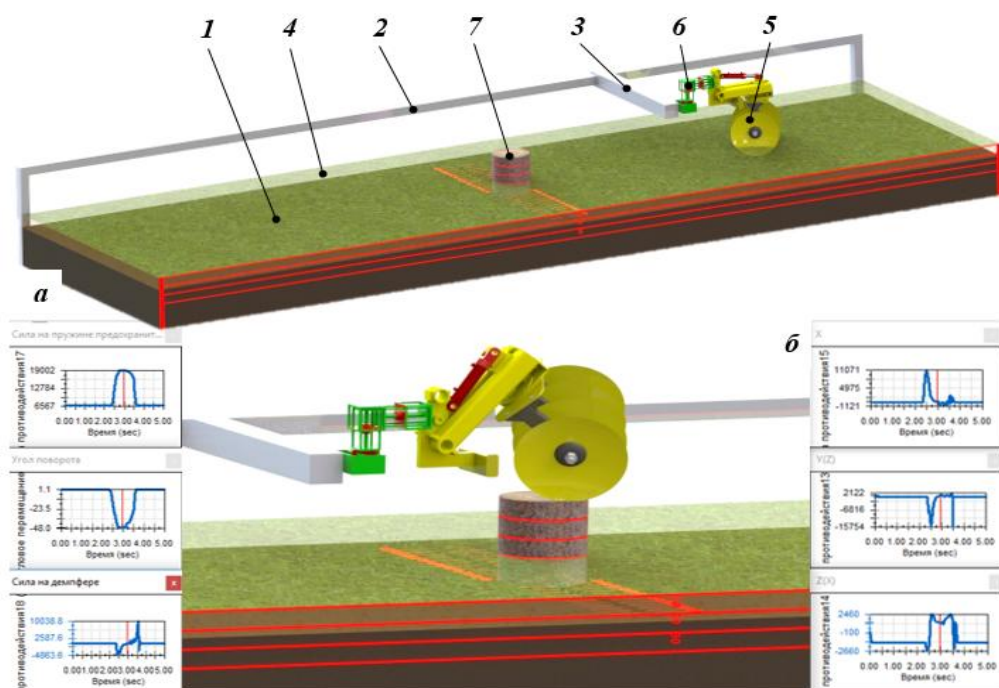


Рис. 1. Виртуальный стенд  
а – общий вид; б – процесс моделирования с отслеживанием ключевых параметров

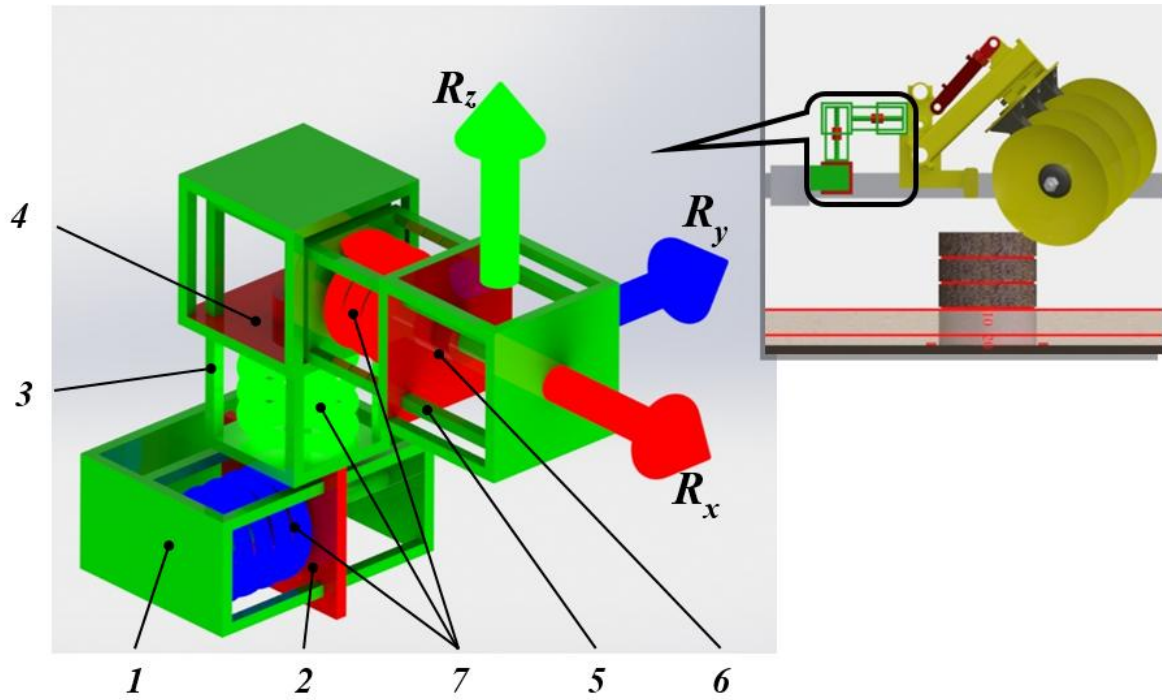


Рис. 2. Виртуальный тензометрический блок

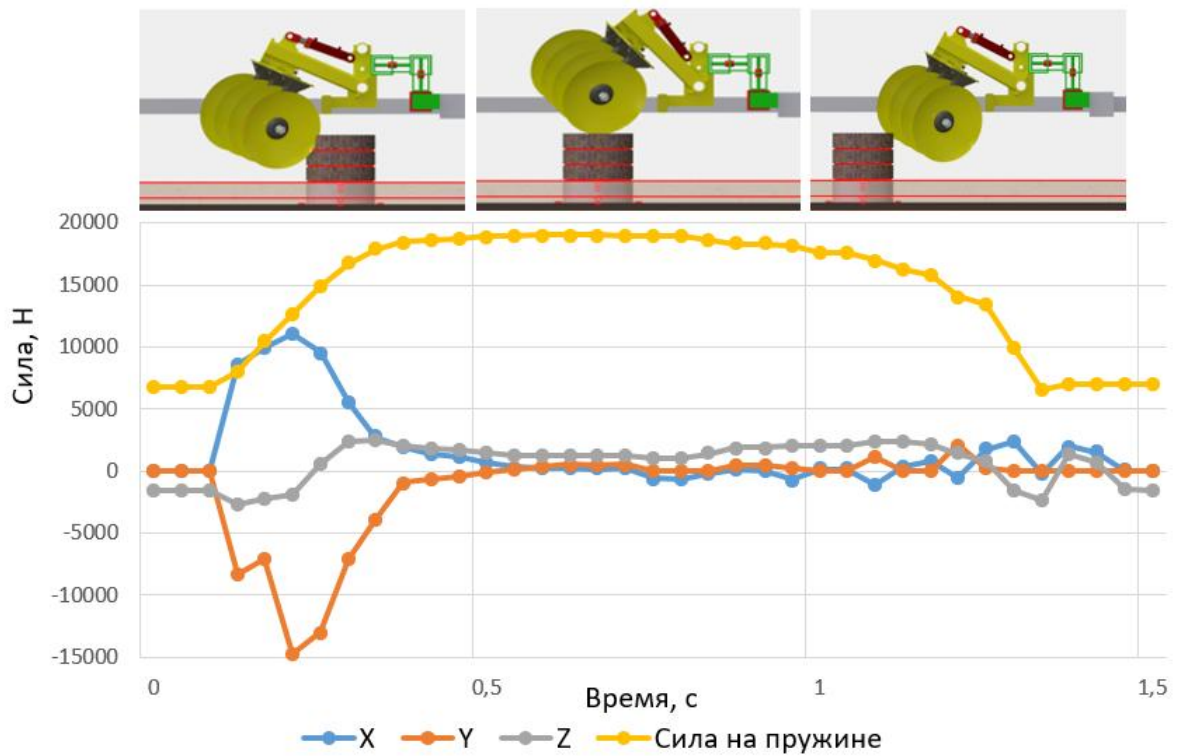


Рис. 3. Объемные силовые характеристики процесса преодоления 30 см пня секцией дискового культиватора при угле атаки батареи 30°

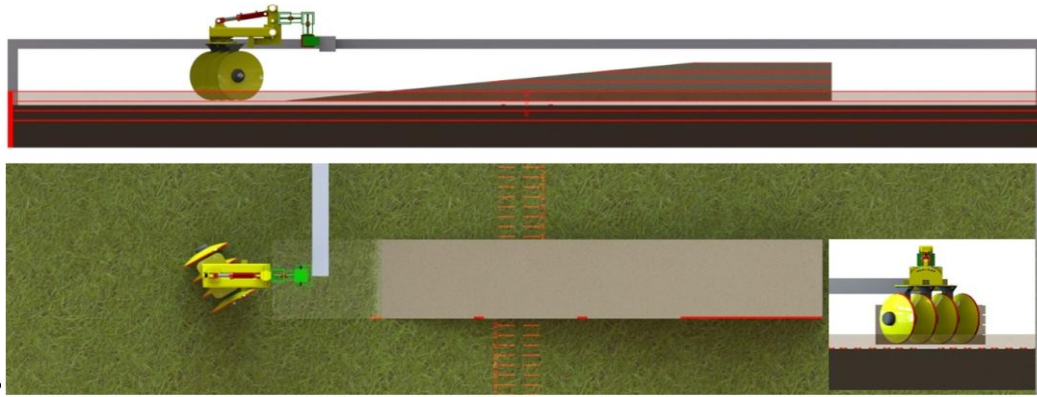


Рис. 4. Виртуальный испытательный стенд с препятствием клиновидной формы

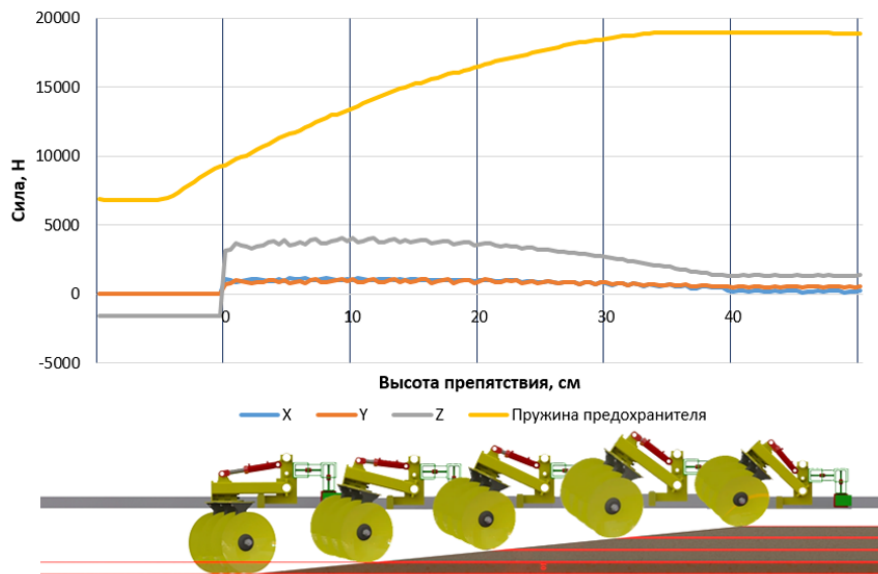


Рис. 5. Результаты виртуального динамометрирования процесса въезда дисковой батареи на препятствие клиновидной формы

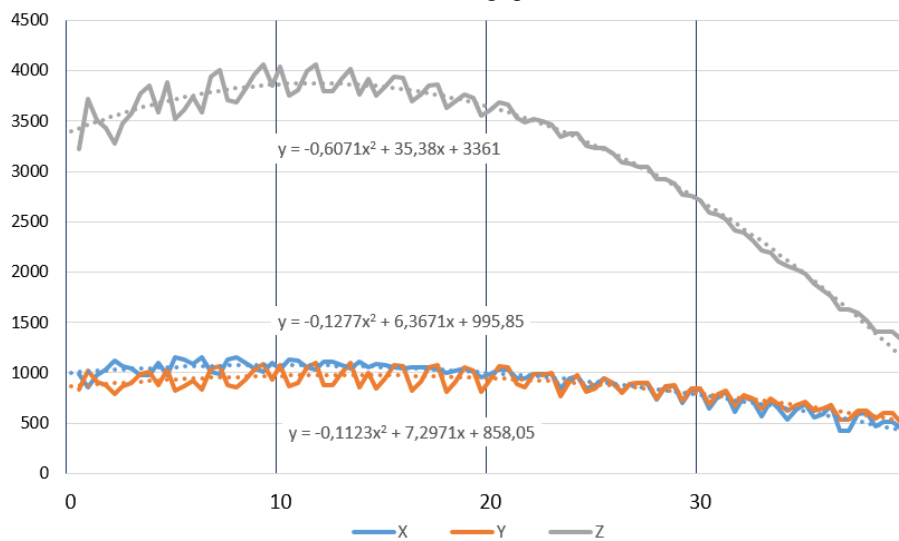


Рис. 6. Аппроксимация результатов силового исследования полиномом второй степени

По результатам аппроксимации получены следующие уравнения:

$$\text{для } R_x - y = -0,1277x^2 + 6,3671x + 995,85,$$

$$\text{для } R_y - y = -0,1123x^2 + 7,2971x + 858,05;$$

$$\text{и для } R_z - y = -0,6071x^2 + 35,38x + 3361.$$

Результаты расчета уравнений с различными высотами препятствий представлены в табл. 1. Дополнительно исследовав максимумы полученных уравнений получаем наибольшие значения составляющих вектора тягового сопротивления для данного предохранительного механизма и рабочего органа (табл. 2).

Анализ полученных данных показывает что на первом участке (высота 0-10 см) наблюдается постепенный рост всех составляющих. В начале второго участка (высота 10-20 см) компоненты достигают своих максимальных значений (табл. 2) после чего начинается плавный спад для  $R_x$  и  $R_y$  компонент и более интенсивное убывание для  $R_z$  компоненты. Данные тенденции сохраняются на участках три и четыре (высота подъема 20-30 и 30-40 см соответственно).

**Выводы.** Применение виртуального стенда для исследования силовых характеристик процесса преодоления препятствий почвообрабатывающими рабочими органами позволяет получить все составляющие вектора тягового сопротивления, а не отдельные его компоненты. При этом возможно достоверное исследование взаимодействия рабочих органов сложной пространственной геометрии с препятствиями любой формы.

Для быстрого исследования силовых характеристик предохранительного механизма можно эффективно использовать препятствия упрощенной клинообразной формы. Это дает возможность получить силовые характеристики движения рабочих органов по горизонтальной поверхности препятствий любых допустимых высот за один эксперимент и оценить параметры предохранительного механизма.

Данные виртуальных экспериментов могут использоваться как для оптимизации конструкций рабочих органов и предохранительных механизмов, так и для достоверной имитации возмущений при моделировании машинно-тракторного агрегата в целом.

Таблица 1

Значения составляющих сил тягового сопротивления при разных высотах пней

Составляющие вектора тягового сопротивления, Н	Высота препятствия, см				
	0	10	20	30	40
$R_x$	995,85	1075,11	1007,25	792,28	430,21
$R_y$	858,50	968,95	950,02	801,73	524,06
$R_z$	3361,00	3860,43	3660,48	2761,15	1162,45

Таблица 2

Максимальные значения составляющих сил тягового сопротивления

Максимальные значения составляющих вектора тягового сопротивления, Н	Высота препятствия, см	Сила, Н
$R_{x\max}$	10,42	1075,22
$R_{y\max}$	13,75	977,01
$R_{z\max}$	12,08	3876,45

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00920.*

## Библиографический список

1. Лысыч, М. Н. Использование САПР для обоснования конструктивных и прочностных параметров почвообрабатывающих орудий / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, П. В. Захаров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4.
2. Chen, Y. A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils [Текст] / Y. Chen, L. J. Munkholm, T. A. Nyord // Soil & Tillage Research. – 2013. – № 126. – С. 34-41.
3. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler / C. Hang [et al.] // Biosystems Engineering. – 2017. – № 168. – С. 73-82.
4. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation / A. Ibrahim [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – № 117. – С. 258-267.
5. Lutchmeea, B. B. S. Design of a partially parallel stump jump using computer-aided design // Thesis Submitted for the degree Master of Applied Science / The University of Adelaide. – Australia. – 1997. – 126 p.
6. Ovsyanko, V. The computer modeling of interaction between share-moulboard surface of plough and soil / V. Ovsyanko, A. Petrovsky // J. Res. Appl. Agric. Eng. – 2014. – vol. 59, № 1. – С. 100-103.
7. Substantiation and evaluation of effectiveness of perspective constructions of forest tractors ancillary equipment / V. I. Posmetyev [et al.] // ARPN J. Eng. Appl. Sci. – 2016. – vol. 11, № 3. – С. 1840-1855.
8. Teixeira, R. R. Multibody Dynamics Simulation of an Electric Bus / R. R. Teixeira, S. R. D. S. Moreira, S. M. O. Tavares // Procedia Engineering. – 2015. – № 114. – С. 470-477.
9. Ucgul, M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge / M. Ucgul, C. Saunders, J. M. Fielke // Biosystems Engineering. – 2018. – № 169. – С. 199-208.
10. Wu, G. Ride comfort evaluation for road vehicle based on rigid-flexible coupling multibody dynamics / G. Wu, G. Fan, J. Guo // Theoretical & Applied Mechanics Letters. – 2013. – № 3. – С. 13004.

## References

1. Lysych M. N., Shabanov M. L., Zaharov P. V. *Ispol'zovanie SAPR dlya obosnovaniya konstruktivnyh i prochnostnyh parametrov pochvoobrabatyvayushchih orudij* [Use CAD for a substantiation constructive and strength parameters of tillage implements]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013. no. 4 (in Russian).
2. Chen Y., Munkholm L. J., Nyord T. A. A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils. *Soil & Tillage Research*. 2013, no. 126, pp. 34-41.
3. Hang C., Gao X., Yuan M., Huang Y. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler/ *Biosyst. Eng.* 2017, no. 168, pp. 73-82.
4. Ibrahim A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Comput. Electron. Agric.* 2015, no. 117, pp. 258-267.
5. Lutchmeea B. B. S. Design of a partially parallel stump jump using computer-aided design. Thesis Submitted for the degree Master of Applied Science. The University of Adelaide. Australia. 1997, 126 p.
6. Ovsyanko V., Petrovsky A. The computer modeling of interaction between share-moulboard surface of plough and soil. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 100-103.
7. Posmetyev V. I., Zelikov V. A., Drapalyuk M. V., Latysheva M. A., Shatalov E. V. Substantiation and evaluation of effectiveness of perspective constructions of forest tractors ancillary equipment. *ARN J. Eng. Appl. Sci.* 2016, vol. 11, no. 3, pp. 1840-1855.



8. Teixeira R. R., Moreira S. R. D. S., Tavares S. M. O. Multibody Dynamics Simulation of an Electric Bus. *Procedia Engineering*. 2015, no. 114, pp. 470–477.

9. Ucgul M., Saunders C., Fielke J. M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge. *Biosyst. Eng.* 2018, vol. 169, pp. 199-208.

10. Wu G., Fan G., Guo J. Ride comfort evaluation for road vehicle based on rigid-flexible coupling multibody dynamics. *Theor. Appl. Mech. Lett.* 2013, no. 3, pp. 13004.

### Сведения об авторе

*Лысыч Михаил Николаевич* – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: miklynea@yandex.ru.

### Information about the author

*Lysych Mikhail Nikolaevich* – Associate professor of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD. (Engineering), Voronezh, Russian Federation; e-mail: miklynea@yandex.ru.