

# УСТАНОВКА ДЛЯ ОБЪЕМНОГО ДИНАМОМЕТРИРОВАНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

## INSTALLATION FOR THREE-DIMENSIONAL DYNAMIC MEASUREMENT OF THE TILLING TOOLS AND THE RESULTS OF ITS USE

**И.Е. Донцов**, к.т.н.

**М.Н. Лысыч**, к.т.н.

Воронежский государственный лесотехнический  
университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия,  
vglta@vglta.vrn.ru

**I.E. Dontsov**, PhD in Engineering

**M.N. Lysych**, PhD in Engineering

Federal State Budget Education Institution of Higher Education  
«Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation,  
vglta@vglta.vrn.ru

Для эффективной работы лесных и сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин и орудий важно иметь информацию о силовых параметрах почвообрабатывающих рабочих органов. Цель исследований – разработать устройство, способное дать представление об изменении силовых параметров рабочих органов во всех трех плоскостях проекций для неустановившегося движения машинно-тракторного агрегата. За основу взята модель силового взаимодействия почвообрабатывающих орудий с почвой, предложенная проф. Л.В. Гячевым. Статья посвящена изучению силовых параметров пассивных, активных и ротационных почвообрабатывающих рабочих органов. Разработана установка для измерения силовых параметров почвообрабатывающих рабочих органов в трех плоскостях проекций. Установка для определения силовых параметров рабочих органов включает следующие основные элементы: почвенный канал, тяговую тележку с 3-точечным навесным устройством, тензометрическое навесное оборудование и устройства для преобразования электрического сигнала и регистрации измеряемых величин. Датчики включают: датчики усилий в тягах навески и датчики угловых перемещений рабочего органа. Электрические сигналы с датчиков подают на модуль аналогового ввода. Затем сигналы подают на преобразователь интерфейса. Далее сигналы обрабатывают на ЭВМ. В ходе эксперимента рабочий орган устанавливают в различные положения по отношению к основному (прямолинейному) движению, регистрируют параметры, характеризующие его координаты (факторы) и усилия в тягах навесного оборудования (отклики). Затем вычисляют характеристики главного вектора и главного момента, равнодействующей сил взаимодействия рабочих органов с почвой. Результаты нескольких измерений аппроксимируют кривой, в наибольшей степени соответствующей характеру взаимодействия. Полученные данные используют при изучении устойчивости, колебаний и динамики неустановившегося движения почвообрабатывающих орудий и машинно-тракторных агрегатов.

**Ключевые слова:** почва, рабочий орган, силовое взаимодействие, динамика, устойчивость, колебания.

For effective work of forestry and agricultural tilling equipment it is important to have information about the power parameters of tilling tool. The purpose of the research is to develop a device that can give an idea about changing the power parameters of tillage tool in all three planes of projections for the unsteady motion of the tractor with a tillage tool. This method is based on the model of force interaction of tillage implements with the soil, suggested by Professor L.V. Gyachev. The article is devoted to the study of power parameters of passive, active, and rotational tilling tool. A setup was designed to measure power parameters of tillage tool in three planes of projections. The installation to determine the power parameters of the tillage tool includes the following basic elements: soil channel, traction trolley, attachments and devices for converting of electrical signal and recording of the measured values. The sensors include: force sensors in linkage bars and sensors of working body movement. Electrical signals from sensors are served on an analog input module. Then the signals are supplied to the inverter interface. Next, the signals are processed on a computer. In the experiment, the tillage tool is set in various positions relative to the main (straight) movement, recorded are the parameters characterizing the coordinates (function arguments) and forces in the linkage (functions). Then the characteristics of the main force vector and main torque of the forces resultant of tillage tool interaction with soil are calculated. The results of several measurements are approximated by the curve most appropriate to the nature of the interaction. The obtained data are used in the study of stability, oscillations and dynamics of non-steady motion of tillers and tractor units.

**Keywords:** soil, tillage tool, force interaction, the dynamics, stability, fluctuations.

## Введение

Изучение силовых параметров рабочих органов является важным для дальнейшей эффективной работы почвообрабатывающих машин и орудий. Многочисленные исследования [1–11] в этом направлении либо неполны (измеряют только тяговое сопротивление), либо недостаточно точны, что затрудняет их использование в изучении динамики неустановившегося движения машин, орудий и машинно-тракторных агрегатов (МТА).

## Цель исследований

Разработать устройство, способное дать представление об изменении силовых параметрах рабочих органов во всех трех плоскостях проекций для неустановившегося движения МТА.

## Материалы и методы исследований

Установка [6] для определения силовых параметров рабочих органов (рис. 1) включает следующие основные элементы: почвенный канал 1, тяговую тележку 2 с 3-точечным навесным устройством, тензометрическое навесное оборудование 3 и устройства 4 для преобразования электрического сигнала и регистрации измеряемых величин.

Тензометрическое оборудование жестко прикреплено к навесному устройству тяговой тележки. Оборудование включает следующие

основные элементы (рис. 2): две рамки 1 и 2, соединенные между собой при помощи трех параллельных тяг 3 и трех тяг-раскосов 4 с шаровыми шарнирами 5. Тензодатчики 6 вмонтированы в тяги 3 и 4. Из-за наличия шаровых шарниров 5 на концах тяг 3 и 4, они (тяги) воспринимают только осевые нагрузки, блокируя, однако, все шесть степеней свободы механизма. Исследуемый рабочий орган через кронштейн 7 крепится к свободной рамке 2. Кронштейн 7 позволяет поворачивать и фиксировать рабочий орган в продольно-вертикальной (датчик 8) и горизонтальной (датчик 9) плоскостях на угол  $\pm 45^\circ$ .

Для измерения усилий в тягах 3 использованы тензодатчики ZF 500, максимальная нагрузка – 500 кГ, нормативная точность измерений – 0,01 %; в тягах 4 – тензодатчики S100, максимальная нагрузка – 100 кГ, нормативная точность – 0,01% (класс точности С по ГОСТ 30129-96). Тарирование (растяжение и сжатие) датчиков осуществлялось на нагрузочной машине. На каждой ступени нагружения снималось 50 значений через каждые 25 миллисекунд. По этим данным рассчитывалось среднее значение. В интервале 0–30 кг потребовалась наиболее точная тарировка, которая производилась аналогичным образом, но с использованием эталонных грузов, с шагом нагружения 5 кГ. По результатам тарирования

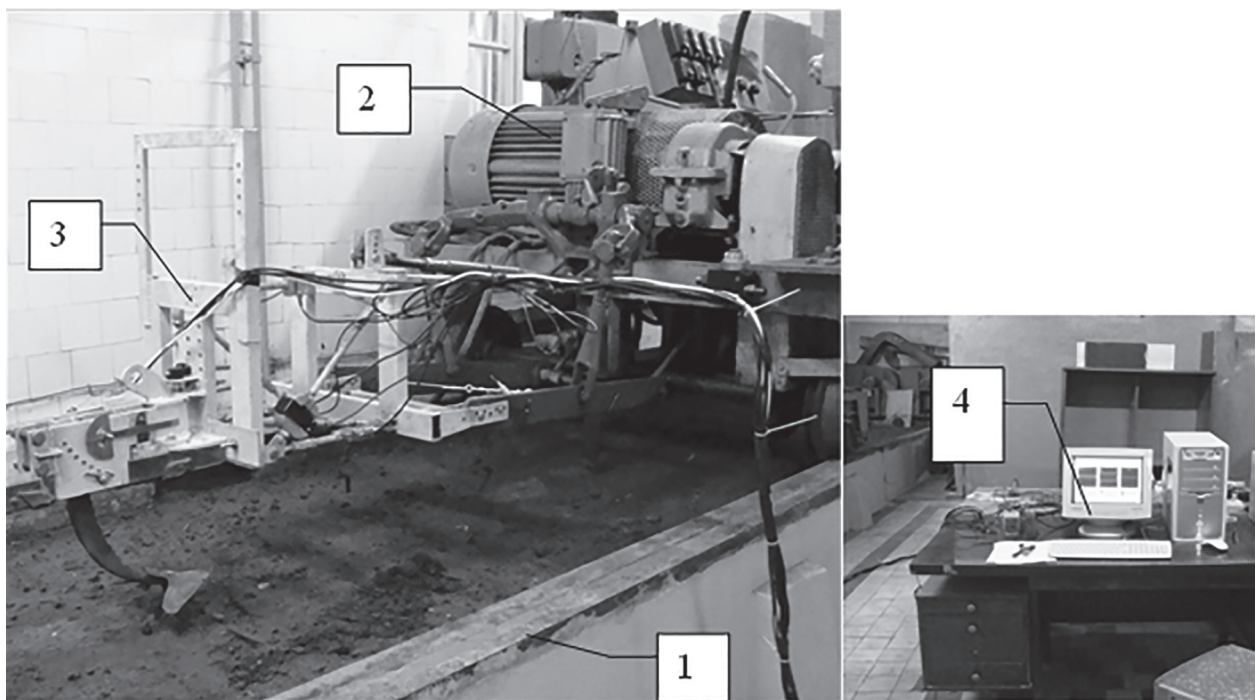


Рис. 1. Лабораторная установка

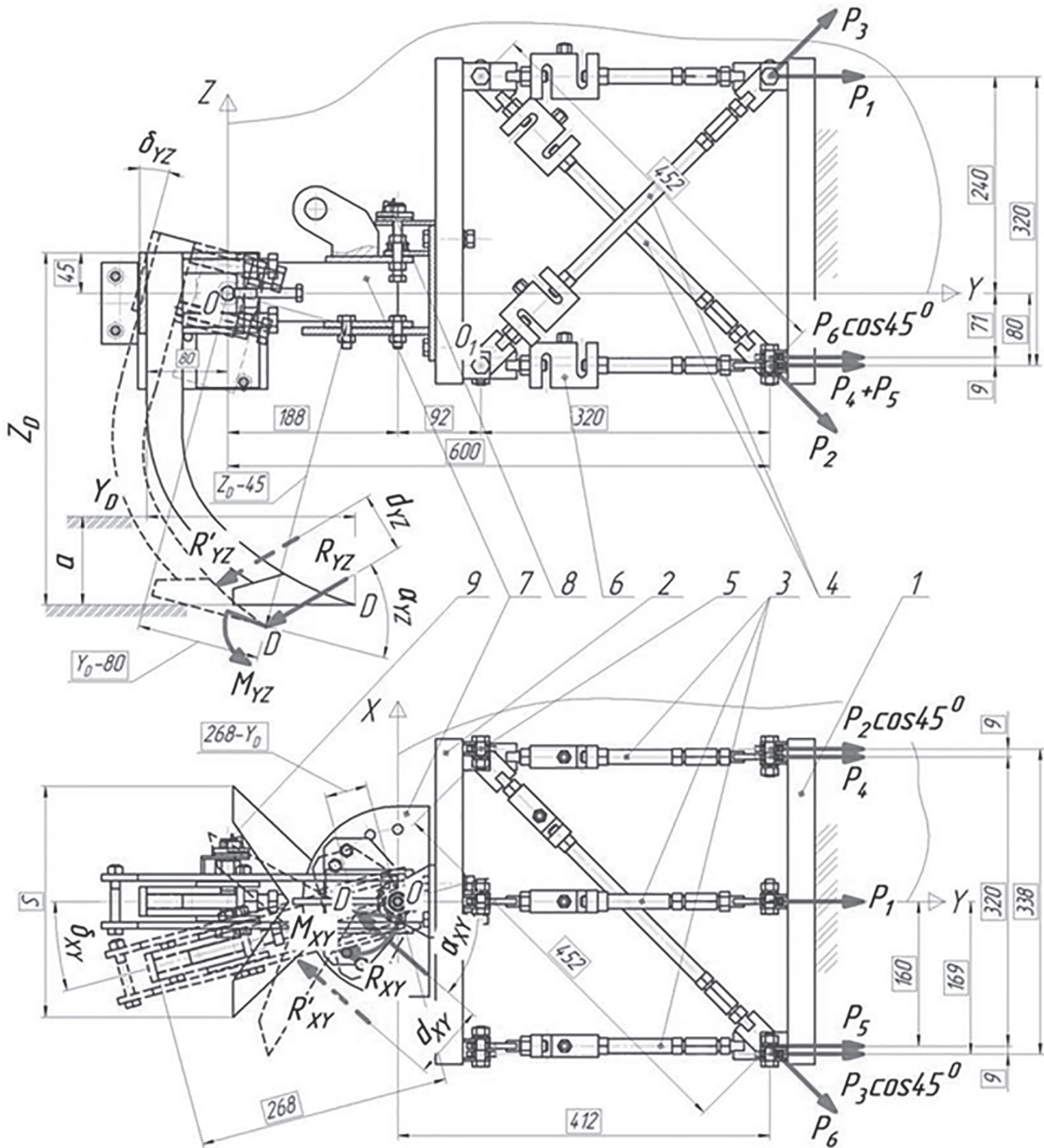


Рис. 2. Тензометрическое оборудование (схема нагружения)

фактическая точность датчиков установлена в пределах 0,005 %.

Для измерения углов поворота рабочего органа установлены механические датчики. Точность прямых измерений составляет  $\pm 0,5^\circ$ . Глубину обработки задают позиционно с помощью гидравлической навесной системы тяговой тележки относительно условной средней линии поверхности почвы. Точность измерений составляет  $\pm 5$  мм. Замечено, что при изменении температуры окружающей среды

на 2–3 °С точность измерений может снижаться на 0,005 %. Поэтому контроль точности измерений следует производить не реже, чем 1 раз в сутки, особенно при заметном изменении температуры окружающей среды.

Схема подключения измерительного оборудования и устройств, преобразующих электрический сигнал, показана на рисунке 3. Получаемые с датчиков электрические сигналы подаются на модуль аналогового ввода (ADAM-4017-D2), затем – на преобразова-

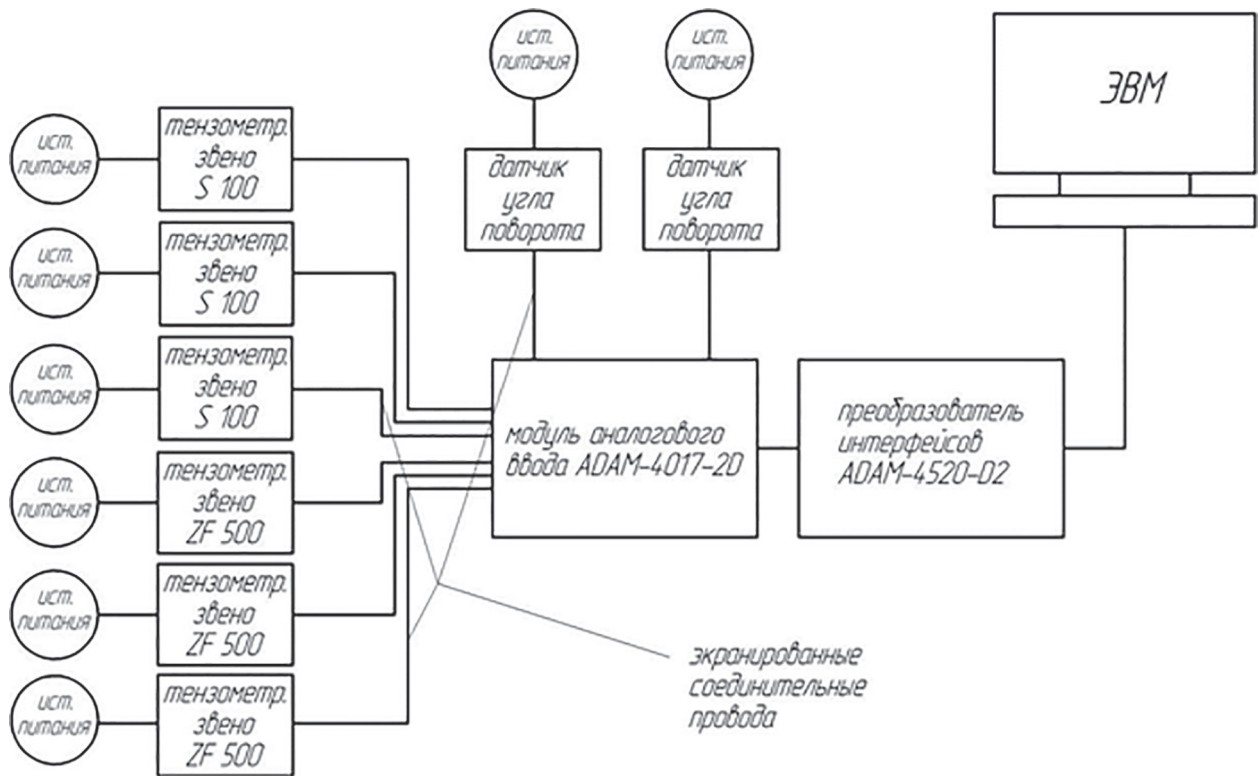


Рис. 3. Тензометрическое оборудование (схема функциональная)

тель интерфейса RS-232 в RS422/RS-485C32 (ADAM-4520-D2) и далее обрабатываются ЭВМ посредством приложения GeniDAQ [6].

В каждом опыте регистрируют следующие величины (рис. 2): усилия  $P_1, \dots, P_6$  в тензометрических тягах (отклики),  $H$ ; углы  $\alpha_{XY}$  и  $\alpha_{YZ}$  установки рабочего органа в горизонтальной  $XY$  и продольно-вертикальной  $YZ$  плоскостях, рад; а также глубину  $a$  (мм) обработки почвы (варьируемые параметры – факторы). Углы  $\alpha_{XY}$  и  $\alpha_{XZ}$  между осью рабочего органа и направлением движения задают до проведения опыта, соответствующим образом закрепляя рабочий орган на оси подвеса навесного оборудования. До проведения опыта регистрируют начальное натяжение тяг  $P_{1,0}, \dots, P_{6,0}$  от силы тяжести навесного оборудования и рабочего органа. В дальнейших расчетах эти значения вычитают из значений, получаемых во время рабочего хода:  $P_1 - P_{1,0}, \dots, P_6 - P_{6,0}$ .

Для фиксированных значений варьируемых параметров из уравнений равновесия сил в проекциях на оси координат находим параметры главного вектора, главного момента и равнодействующей сил взаимодействия рабочего органа с почвой. В продольно-вертикальной плоскости  $YZ$  они имеют вид:

$$R_{YZ} = \sqrt{(\sum Y)^2 + (\sum Z)^2}; \alpha_{YZ} = \delta_{YZ} + \alpha'_{YZ};$$

$$M_{YZ} = M_{1,YZ} + M_{2,YZ}; \frac{d_{YZ}}{l_0} = \frac{M_{YZ}}{R_{YZ} \cdot l_0}, \quad (1)$$

где  $\sum Y = P_1 + P_4 + P_5 + (P_2 + P_3 + P_6) \cdot \cos 45^\circ;$

$$\sum Z = (-P_2 + P_3) \cdot \cos 45^\circ;$$

$$M_{1,YZ} = R_{YZ} \cdot [(z_D - 45) \cdot \cos \alpha_{YZ} + (y_D - 80) \cdot \sin \alpha_{YZ}];$$

$$M_{2,YZ} = P_1 \cdot 240 - (P_4 + P_5) \cdot 80 + [P_2 \cdot (600 - 80) + P_3 \cdot (240 - 600) - P_6 \cdot 71] \cdot \cos 45^\circ;$$

$$\alpha'_{YZ} = \arctg \left( \frac{\sum Z}{\sum Y} \right).$$

В горизонтальной плоскости  $XY$ :

$$R_{XY} = \sqrt{(\sum X)^2 + (\sum Y)^2};$$

$$\alpha_{XY} = \delta_{XY} + \alpha'_{XY}; M_{XY} = -(M_{1,XY} + M_{2,XY});$$

$$\frac{d_{XY}}{l_0} = \frac{M_{XY}}{R_{XY} \cdot l_0}, \quad (2)$$

где  $\sum Y = P_1 + P_4 + P_5 + (P_2 + P_3 + P_6) \cdot \cos 45^\circ;$

$$\sum X = P_6 \cdot \cos 45^\circ;$$

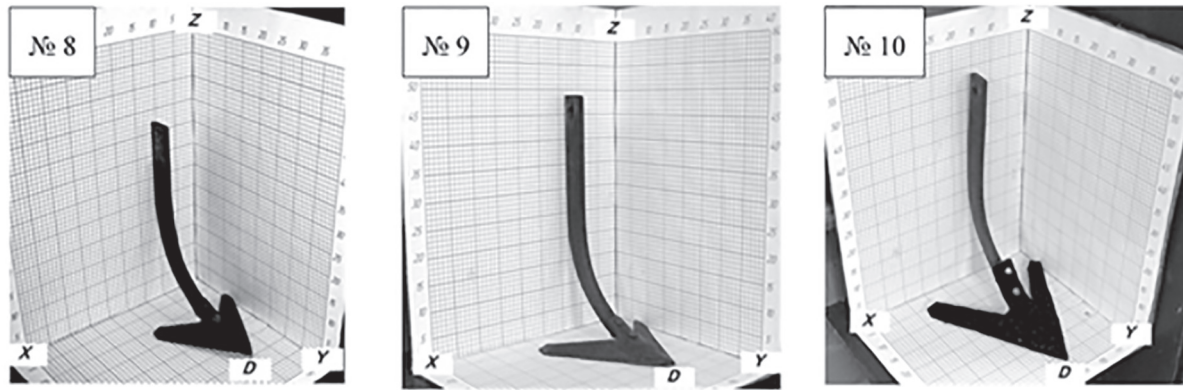


Рис. 4. Стрельчатые лапы

$$M_{1.XY} = R_{XY} \cdot [(268 - x_D) \cdot \sin \alpha_{XY} + y_D \cdot \cos \alpha_{XY}];$$

$$M_{2.XY} = (P_4 - P_5) \cdot 160 + [(P_2 - P_3) \cdot 169 - P_6 \cdot (412 - 160)] \cdot \cos 45^\circ;$$

$$\alpha'_{XY} = \arctg \left( \frac{\sum X}{\sum Y} \right).$$

Кроме того, в формулах (1) и (2) обозначено:  $R_{YZ}$  и  $R_{XY}$  – модуль главного вектора (равнодействующей  $R'_{YZ}$  и  $R'_{XY}$ ) сил, Н;  $M_{YZ}$  и  $M_{XY}$  – главный момент сил относительно точки приведения (т. D), Н·мм;  $\alpha_{YZ}$  и  $\alpha_{XY}$  – угол между главным вектором (равнодействующей) сил и продольной осью движения, рад;  $d_{YZ}$  и  $d_{XY}$  – смещение равнодействующей сил от точки приведения, мм. Индексы в написании параметров говорят о том, что параметры находятся,

соответственно, либо в плоскости YZ, либо XY. Параметры  $x_D$ ,  $y_D$  и  $z_D$  характеризуют координаты выбранного положения точки приведения сил, мм;  $l_o$  – длина рабочего органа, мм.

Таким образом, исходя из точности прямых измерений точность косвенных измерений, определенная на основании закона накопления средних погрешностей, для модуля главного вектора (равнодействующей) сил сопротивления составляет  $\pm 0,650$  Н, угла его поворота относительно продольной оси рабочего органа –  $\pm 0,85^\circ$ , смещения равнодействующей от точки приведения –  $\pm 12,5$  мм.

### Результаты и обсуждение

На описанной лабораторной установке постоянно ведется работа по изучению силовых параметров рабочих органов различных типов

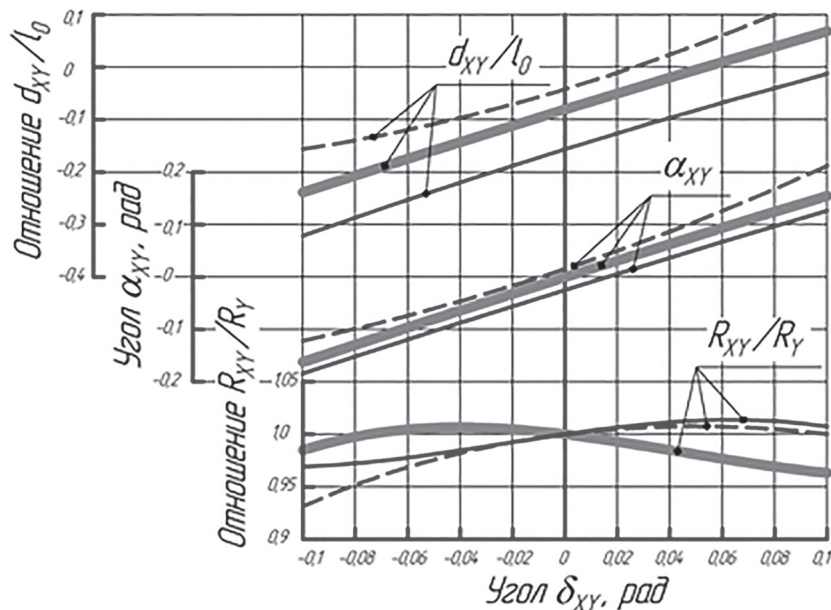


Рис. 5. Графики силовых параметров стрельчатых лап: штриховая линия – лапа № 8; основная – № 9; жирная – № 10

и форм (пассивные, ротационные, дисковые и др.). Показать в одной статье результаты всех исследованных рабочих органов невозможно. Представим, на наш взгляд, наиболее интересную их часть.

На лабораторной установке была проверена гипотеза о подобии силовых параметров на уменьшенных (увеличенных) моделях рабочих органов. Для этого отобраны три, серийно выпускаемые, стрелчатые культиваторные лапы (инвентарные № 8–10) с различными масштабными коэффициентами (рис. 4).

Опыты проводились в закрытом помещении при комнатной температуре и нормальной влажности воздуха. Тип почвы в почвенном канале – супесь мелкокомковатая, твердость в исследуемом горизонте 16–18 кПа, влажность 12–14 %.

Для установления зависимости между силовыми параметрами исследуемых рабочих органов использованы средние значения расчетных коэффициентов корреляции. Они оказались в пределах 0,95–0,97. Расчетное и табличное значения  $t$ -критерия Стьюдента при этом равны:  $t_{\text{расч}} = 13,7 - 17,4$ ;  $t_{\text{табл}} = 3,85$  при  $q = 0,001$ , здесь  $q$  – уровень значимости. Это позволяет принять гипотезу о наличии линейной статистической связи между силовыми параметрами геометрически подобных рабочих органов. О корреляции можно также судить визуально (рис. 5), сравнивая графики силовых параметров стрелчатых лап (инв. № 9 и 10). Функции приведены к безразмерному виду. Как видим, отличия незначительны ( $\max \pm 4\%$ ).

### Выводы

Из-за больших или, наоборот, слишком малых размеров рабочих органов допускается использование геометрически подобных моделей. Одинаковыми для таких рабочих органов являются безразмерные части уравнений регрессии силовых параметров. Для получения натурального значения модуля главного вектора (равнодействующей) сил сопротивления нужно его безразмерную часть в уравнении регрессии, описывающем изменения упомянутого вектора в пространстве, умножить на тяговое сопротивление ( $R_y$ ) рабочего органа при номинальной глубине обработки. Тяговое сопротивление, в данном случае, можно получить осевым (вдоль оси  $Y$ ) динамометрированием. Для тех же целей допускается использование  $n$ -одинаковых рабочих органов. В этом

случае суммарное значение модуля главного вектора (равнодействующей) сил сопротивления нужно разделить на  $n$  одинаковых рабочих органов.

### Литература

1. Бартенев И.М., Кургалин С.Д., Туровский Я.А., Лысыч М.Н. Перспективная конструкция многофункционального культиватора для склонов с автоматической биометрически корректируемой системой контроля поперечной устойчивости // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 2 (18). С. 158-165. DOI: 10.12737/111990.
2. Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Туровский Я.А. Исследование автоматизированного привода управления ручными гидрораспределителями манипулятора // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (26). С. 194-201. DOI: 10.12737/23457.
3. Донцов И.Е. Устойчивость движения МТА с орудиями фронтальной или задней навески // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 9. С. 31–34.
4. Донцов И.Е. Устойчивость движения комбинированных МТА с фронтальными и задними навесными орудиями // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2009. № 12. С. 20–22.
5. Донцов И.Е. Устройства для повышения устойчивости движения комбинированных машинно-тракторных агрегатов // Вестник КрасГАУ. 2009. № 1. С. 113–117.
6. Бартенев И.М., Лысыч М.Н., Донцов И.Е. Установка для объемного тензометрирования: пат. 2498245 РФ; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.
7. Gee-Clough D., McAllister M., Pearso G., Evernden D.W. The empirical prediction of tractor–implement field performance // Journal of Terramechanics. 1987. № 15. P. 81–94.
8. Glancey J.L., Upadhyaya S.K., Chancellor W.J., Rumsey J.W. Prediction of agricultural implement draught using an instrumented analog tillage tool // Soil and Tillage Research. 1996. № 37. P. 47–65.
9. Musil J., Červinka J. Measuring of pulling resistance in machinery with passive working organs // Res. Agr. Eng. 2007. № 53(2). P. 47–53.
10. Kheiralla A.F., Yahya A., Zohadie M., Ishak W. Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia // Soil and Tillage Research. 2004. № 78. P. 21–34.
11. Onwualu A.P., Watts K.C. Draft and vertical forces obtained from dynamics soil cutting by plane tillage tools // Soil and Tillage Research. 1998. № 48. P. 239–253.

## References

1. Bartenev I.M., Kurgalin S.D., Turovskiy Ya.A., Lysych M.N. Perspective design of a multifunctional cultivator for slopes with automatic biometrically correctable lateral stability control system. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2015, v. 5, no. 2 (18), pp. 158–165 (in Russ.). DOI: 10.12737/2111990.
2. Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Turovskiy Ya.A. Research of automated control of manual control valves of manipulator. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2016, v. 6, no. 4 (26), pp. 194–201 (in Russ.). DOI: 10.12737/23457.
3. Dontsov I.E. Stability of motion of machine-tractor unit with implements of front or rear attachment. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*, 2008, no. 9, pp. 31–34 (in Russ.).
4. Dontsov I.E. Stability of motion of combined machine-tractor units with front and rear mounted implements. *Traktory i sel'skokhozyajstvennyye mashiny*, 2009, no. 12, pp. 20–22 (in Russ.).
5. Dontsov I.E. Devices for increasing of stability of motion of combined machine and tractor units. *Vestnik KrasGAU*, 2009, no. 1, pp. 113–117 (in Russ.).
6. Patent RU 2498245, MPK G01L 5/13. Installation for volumetric strain gauging. Bartenev I.M., Lysych M.N., Dontsov I.E. (RF). *Byulleten*, no. 31.
7. Gee-Clough D., McAllister M., Pearso G., Evernden D.W. The empirical prediction of tractor–implement field performance. *Journal of Terramechanics*, 1987, no. 15, pp. 81–94.
8. Glancey J.L., Upadhyaya S.K., Chancellor W.J., Rumsey J.W. Prediction of agricultural implement draught using an instrumented analog tillage tool. *Soil and Tillage Research*, 1996, no. 37, pp. 47–65.
9. Musil J, Červinka J. Measuring of pulling resistance in machinery with passive working organs. *Res. Agr. Eng*, 2007, no. 53(2), pp. 47–53.
10. Kheiralla A.F., Yahya A., Zohadie M., Ishak W. Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research*, 2004, no. 78, pp. 21–34.
11. Onwualu A.P., Watts K.C. Draft and vertical forces obtained from dynamics soil cutting by plane tillage tools. *Soil and Tillage Research*, 1998, no. 48, pp. 239–253.