

РАЗРАБОТКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ НАВЕСКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

Ушаков А.Е., Египко С.В.

*Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова, филиал
Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск*

Ключевые слова: почвообрабатывающие машины, измерительные инструменты и комплексы, методы измерения тяговых усилий, тензометрические конструкции, исследование рабочих органов, полевые испытания. **Аннотация.** В статье проведен анализ существующих способов и оборудования для тензометрических испытаний мелиоративной техники, предложено универсальное решение способное в полной мере удовлетворить предъявляемые требования к точности и функционалу измерительной системы. В работе использованы современные и классические методики научных исследований, направленные на измерение тензометрических усилий при проведении лабораторных и полевых испытаний мелиоративной техники. Учтены материалы научных исследований, проведенных на кафедре Машины природообустройства Новочеркасского инженерно-мелиоративного института им. А.К. Кортунова. При разработке использовались методы параметрического моделирования в современных САПР программах, таких как Компас 3D и Autodesk Inventor, тензометрическая система была настроена при помощи языка программирования Arduino, основанного на C/C++, и библиотекой AVR Libc, все это позволило получить гибкую настройку выходных данных. В результате анализа существующих методов и конструкций для измерения тензометрических усилий при разработке мелиоративной техники были установлены значительные их недостатки, предложена собственная конструкция, основанная на промежуточном устройстве соединяющая навеску трактора и мелиоративное орудие, которая способная измерять усилия в разных плоскостях и имеющая возможность блокировки отдельных ее участков. При испытании разработанной тензометрической навески погрешность измерений не превышала 8% при передаче данных по Wi-Fi, что значительно упростило проведение эксперимента в полевых условиях. Возможность блокировки отдельных тензометрических элементов позволила проводить более точную настройку измерительной системы согласно плану исследования.

DEVELOPMENT OF A STRAIN GAUGE ATTACHMENT FOR FIELD TESTING OF RECLAMATION MACHINES

Ushakov A.E., Egipko S.V.

*Novocherkassk engineering and reclamation Institute n.a. A.K. Kortunov
of the Don State Agrarian University, Novocherkassk*

Keywords: soil-cultivating machines, measuring tools and complexes, methods for measuring traction forces, strain gauge structures, research of working parts, field tests.

Abstract. The article analyzes the existing methods and equipment for strain testing of reclamation equipment, offers a universal solution that can fully meet the requirements for accuracy and functionality of the measuring system. The work uses modern and classical methods of scientific research aimed at measuring strain-measuring forces during laboratory and field tests of reclamation equipment. The materials of scientific research conducted at the Department of Environmental Management Machines of the Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. K. Kortunov are taken into account. During the development, parametric modeling methods were used in modern CAD programs such as Compass 3D and Autodesk Inventor, the strain gauge system was configured using the Arduino programming language based on C /C++ and the AVR Libc library, all this allowed for flexible adjustment of output data. As a result of the analysis of existing methods and structures for measuring strain-measuring forces in the development of reclamation equipment, their significant shortcomings were identified, their own design was proposed, based on an intermediate device connecting the tractor hitch and the reclamation tool, which is capable of measuring forces in different planes and having the ability to block individual sections of it. When testing the developed strain gauge, the measurement error did not exceed 8% when transmitting data over WI-FI, which greatly simplified the experiment in the field. The possibility of blocking individual strain gauge elements allowed for more precise adjustment of the measuring system according to the study plan.

Введение. Достаточно большая часть сельскохозяйственных угодий Ростовской области подвержена влиянию негативных природных факторов. Обширные территории нуждаются в защите от воздействия ветровой и водной эрозии. Площадь данных земель составляет свыше 697 тыс. га. [1]. Применение на указанных территориях культуртехнической мелиорации, включающей в себя комплексы мероприятий, таких как рыхление, первичная обработка почвы, мелиорация солонцов и другие, направлено на улучшение состояния почвы и снижение влияния негативных факторов [2]. Следует отметить, что для выполнения большей части операций по обработке почвы необходима современная мелиоративная и сельскохозяйственная техника. Для первичной обработки почв подверженных двум видам эрозии используют почвообрабатывающие машины, такие как глубокорыхлители или плуги чизельного типа, способные вести работу на глубине 30-60 см. [3]. Рабочие органы данных орудий должны быть выполнены из специализированных материалов, способных выдержать высокие нагрузки, а также повышенный износ. При разработке данной почвообрабатывающей техники обязательными этапами являются проведение лабораторных исследований и полевых испытаний. Большое значение при их реализации имеет тензометрирование в процессе проектирования и эксплуатации. Измерение сил, передаваемых от тяговой машины на рабочие органы орудия, и сил сопротивления воздействию со стороны обрабатываемой среды позволит подобрать необходимую мощность для агрегируемой машины, установить нормы выработки и расхода горючего и выбрать режим эксплуатации. Развитие мелиоративных мероприятий в России ставит высокие стандарты для тяговых испытаний почвообрабатывающих машин и как следствие ведет к новым разработкам в области тензометрии.

В настоящий момент, учитывая беспрецедентные санкции, многие научно-исследовательские центры и машинно-испытательные станции сталкиваются с проблемой получения необходимой измерительной аппаратуры. Измерительное оборудование – это критически важный компонент исследований, поскольку оно используется для проведения точных измерений и оценки производительности различных технологий. Многие компании, которые ранее поставляли эту технику, больше не могут работать с российскими организациями. Несмотря на эти сложности, научно-исследовательские центры и машинно-испытательные станции продолжают искать альтернативные способы получения необходимого оборудования. Некоторые организации рассматривают возможность разработки собственных измерительных инструментов и комплексов, которые были бы менее зависимы от импортных компонентов. Таким образом, актуальным является работа по исследованию и разработке оборудования для работы в данной области.

Материалы и методы исследований. Рассмотрение процесса тензометрических измерений базируется на анализе существующих конструкций и методов измерения усилий на навесном оборудовании. Известны как минимум 2 метода измерений тяговых усилий рабочих органов машин – при помощи дополнительной конструкции «посредника» [4,5] или использования клеящихся тензорезисторов [6], тензоэффект которых можно описать известным уравнением:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_{\text{тенз}} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где ΔR – приращение электрического сопротивления тензорезистора; R – электрическое сопротивление тензорезистора; $k_{\text{тенз}}$ – чувствительность тензорезистора; ε – относительная деформация.

Существует большое количество установок, рассчитанных на частные случаи, рассмотрев которые, мы пришли к выводу, что все они обладают значительными недостатками.

Целью исследования являлось определение недостатков существующих конструкций и методов динамометрических испытаний разрабатываемых машин для проведения мелиоративных работ и предложения по их устранению.

При исследовании тяговых усилий при помощи клеящихся тензорезисторов разработчик тратит значительное время на тарировку всех элементов, так же температурные коэффициенты расширения материала исследуемой детали и проволоки должны быть приблизительно равными иначе температурные колебания могут вызывать высокие погрешности при измерении. Крепление на рабочих органах почвообрабатывающих машин, клеящихся измерительных элементов требует внесения дополнительных изменений в их конструкцию, что в свою очередь усложняет их производство и введет к некоторому отклонению измеряемых показателей. Типы тензорезисторов представлены на рисунке 1 [7, 8].

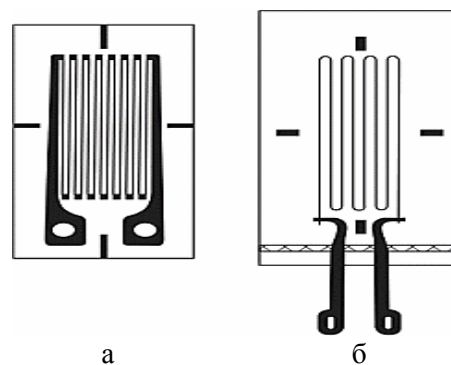


Рис. 1. Типы тензорезисторов: фольговый с решеткой из металлической фольги (а); проволочный тензометр (б)

Стоит так же отметить, что сам процесс установки датчиков и настройки процесса измерений является процессом достаточно трудоемким и требует определенных знаний и умений, не связанных непосредственно с конструированием и исследованием техники.

Так же весомый недостаток данного метода измерения тяговых усилий – это невозможность применения его многократно, так как сплавы тензорезисторов подвержены агрессивному воздействию окружающей среды и достаточно быстро приходят в негодность из-за окисления.

Другой метод измерения тяговых усилий рабочих органов почвообрабатывающей техники построен на промежуточной конструкции, находящейся между механизмом навески тяговой машины и самим орудием (рис. 2) [9].

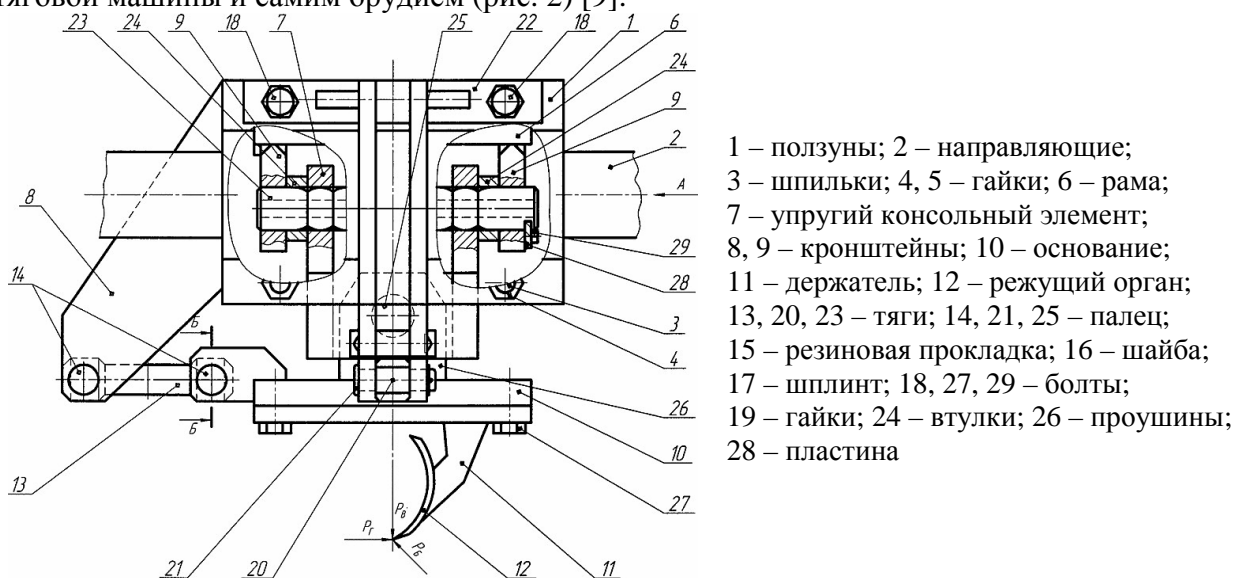


Рис. 2. Стенд для измерения сопротивления грунтов и снежно-ледяных образований резанию

Такая конструкция, как правило, содержит тяги для передачи вертикальных, горизонтальных и боковых усилий. Для применения данного метода известен стенд авторов Желукевича Рышарда Борисовича, Лысянникова Алексея Васильевича и других.

Стенд представляет собой жестко закреплённый рабочий орган, шарнирно связанный с рамой и горизонтальными тягами, на которых установлены тензодатчики. Недостатком данной конструкции является невозможность определить результирующую силу и сложность конструкции. Кроме того, на данном стенде невозможно испытать реальную модель рабочего оборудования или прототип без адаптации его креплений.

Известен патент автора Бабаева Тимура Казбековича – «Тензометрическая навеска для измерения сопротивления грунтов копанию» (рис. 3). Описанное оборудование позволяет

измерять тяговые усилия в полевых условиях, присоединяясь к раме почвообрабатывающей техники. Измерение проходит в трёх составляющих точках результирующе силы сопротивления и позволяет определять вектора сил в вертикальном и горизонтальном положении.

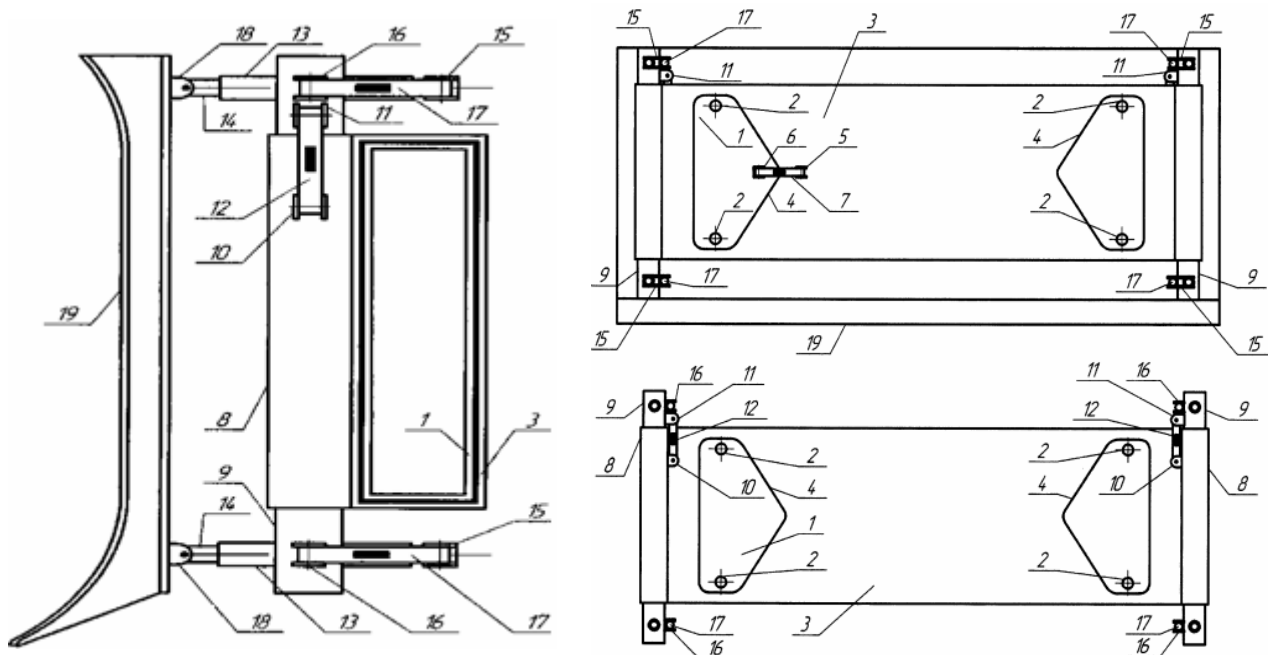


Рис. 3. Тензометрическая навеска для измерения сопротивления грунтов копанию:
 1, 8, 13 – направляющие профиля; 2 – отверстия; 3 – боковая тяга; 4 – прорезы;
 5, 6, 10, 11, 15, 16, 18 – проушины; 7, 12, 17 – тензозвено; 9 – вертикальная тяга;
 14 – горизонтальная тяга; 19 – рабочий орган

К недостаткам данной конструкции можно отнести использование тензозвеньев, которые подвержены окислению, так же необходимость отслеживания нулевых значений, которые возникают от веса тензометрической навески, необходимость дополнительных расчетов от проводящего эксперимент оператора.

В других работах [10] рассмотрены навески подобной конструкции, однако большая часть из них могут измерять только горизонтальную составляющую с достаточной точностью, а такие как боковые и вертикальные составляющие не измеряются с достаточной точностью, что так же отмечают авторы Лысыч М.Н, Шабанов М.Л, Купряшкин В.Ф. и другие [11].

Результаты. Проведя анализ существующих конструкций и методов испытаний по тензометрированию разрабатываемых машин для выполнения мелиоративных работ и учтя их недостатки, нами было предложено техническое решение в виде промежуточного оборудования для системы трехточечной тензонавески (рис. 4).

Его конструкция представляет собой промежуточное устройство, состоящее из четырех рамок с различными степенями свободы. Рамка 1 крепится непосредственно к навеске трактора по трехточечной схеме. Рамка 2 соединена с рамкой 1 посредством четырех направляющих 5, таким образом, имеет возможность передвижения по направляющим в продольном направлении, при этом ограничена двумя тензодатчиками 6, связывающими рамки 1 и 2 между собой. Датчики 6 в процессе испытаний работают на растяжение и позволяют определять тяговое сопротивление орудия путем суммирования их показаний:

$$F_{\text{сопр}} = F_1 + F_2, \quad (2)$$

где F_1, F_2 – соответственно усилия на первом и втором тензодатчиках.

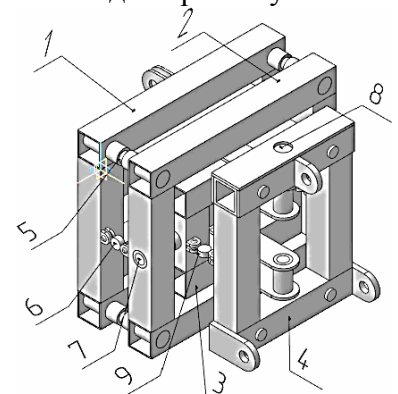


Рис. 4. Разработанная тензометрическая навеска

Рамка 3 является поворотной на двух осях 7, ее расположение прямо внутри рамки 2 позволяет сократить габариты измерительного оборудования. Ограничение поворота рамки осуществляется установкой пары тензодатчиков, связывающих рамку 3 с перемычками на рамке 1. Такая система позволяет снимать нормальные усилия на рабочих органах по отношению к обрабатываемой поверхности путем преобразования момента силы на одном из срабатывающих датчиков. При ее определении необходимо учитывать массу рабочего оборудования G_{po} :

$$F_{выгл} = \frac{F_{д1} + l_1}{l_2} + G_{po}, \quad (3)$$

где $F_{д1}$ – усилие на первом тензодатчике; l_1, l_2 – плечи.

$$F_{загл} = \frac{F_{д2} + l_1}{l_2} + G_{po}, \quad (4)$$

где $F_{д2}$ – усилие на втором тензодатчике.

Поскольку в процессе работы рабочего оборудования возможно возникновение усилий, способствующих уводу орудия в сторону, то при проведении тензометрирования необходимо учитывать и эту составляющую. Рамка 4, имеющая так же поворотную конструкцию на вертикальных осях 8 с ограничением поворота тензодатчиками 9, позволяет определить усилие, способствующее смещению рабочего оборудования вправо F_n или влево F_l относительно направления движения машины:

$$F_n = \frac{F_{д3} + l_3}{l_4}, \quad (5)$$

где $F_{д3}$ – усилие на третьем тензодатчике; l_3, l_4 – плечи.

$$F_l = \frac{F_{д4} + l_3}{l_4}, \quad (6)$$

где $F_{д4}$ – усилие на четвертом тензодатчике.

Кроме того, в случае необходимости работы с определенными усилиями возможно блокирование отдельных рамок, что позволит производить замеры в направлении, обусловленном необходимостью исследований.

Установка присоединяется к навеске трактора в точках «Т» и к местам крепления орудия «Н» (рис. 5).

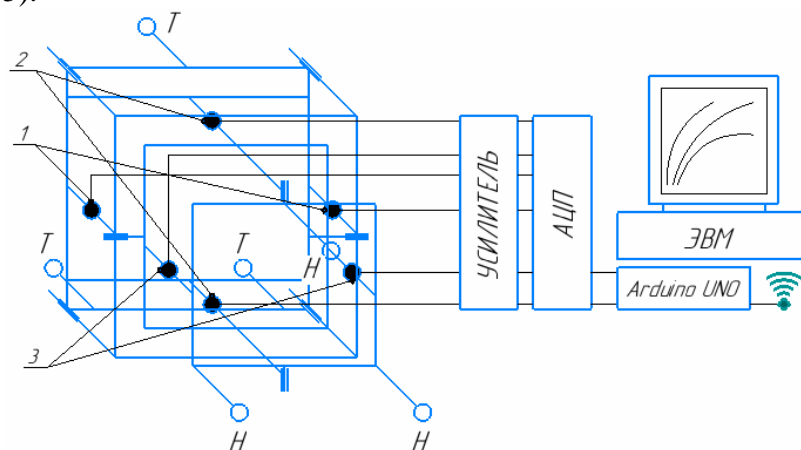


Рис. 5. Схема подключения тензометрической навески

Тензометрическая составляющая предложенной установки состоит из 6-ти S-образных тензодатчиков 1, 2, 3 грузоподъемностью до 2 тонн DEE-2T подключённых через усилитель к аналого-цифровому преобразователю hx-711. Для обработки и передачи данных АЦП подключается к плате Arduino UNO точками GND и 5V, а контакты DT и SCK к

точкам А1 и А0 разъёма ANALOG IN и при помощи USB или Wi-Fi данные передаются в ноутбук. При соответствующей настройке системы данные сразу попадают в Microsoft Excel или Statistica и оператор может проводить необходимую обработку.

Для оценки работоспособности предложенной конструкции была изготовлена ее модель с перечнем определенных свойств (рис. 6):

- возможность параллельного съема данных с 3-ех тензодатчиков;
- реализован программный код, способный выдавать уже, отчищенные и просуммированные данные в ньютонах с нескольких тензодатчиков с одинаковой номинальной чувствительностью $2 \pm 0,003 \text{ мВ/В}$;
- возможность блокирования отдельных элементов;
- возможность перемещения по направлению рамы.

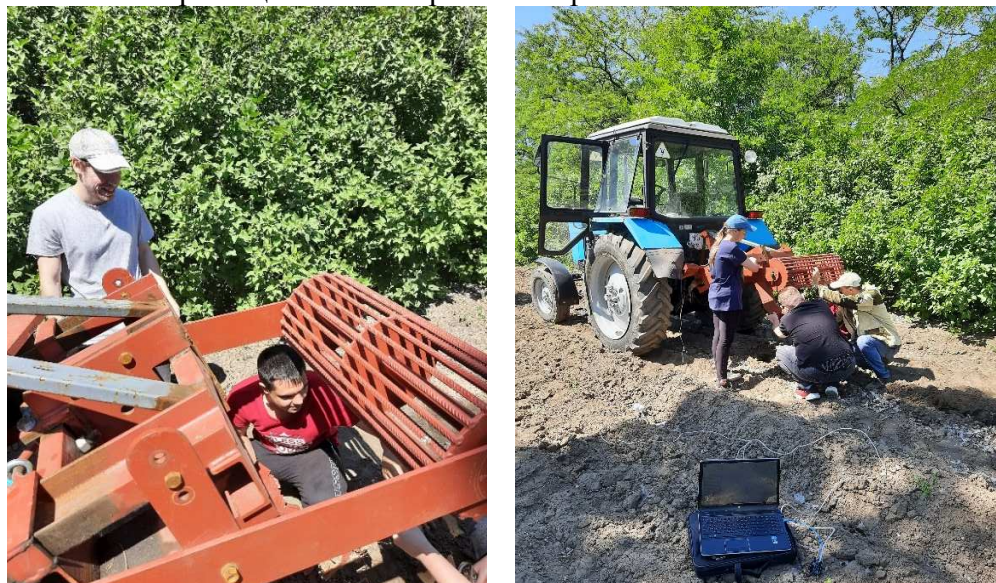


Рис. 6. Испытание тензонавески на тракторе МТЗ-80 с моделью рабочего органа рыхлителя

Проведение полевых исследований для оценки работоспособности тензометрической навески в контексте измерения усилий на рабочих органах является важным этапом при разработке и оптимизации конструкций сельскохозяйственной техники. В нашем случае, основная задача заключалась в обработке и анализе данных, полученных от нескольких тензодатчиков, что позволило получить более точную и объективную оценку силовых параметров. Тензонавеска тестировалась в рамках исследования рабочих органов рыхлителей.

Интервал измерений (рис. 7, 8), настраиваемый в зависимости от специфики испытаний, и составляет от 0,1 до 5 секунд, что позволяет получить достоверные и точные результаты. После обработки данных оператор может графически представить большой массив информации для более наглядного представления результатов.

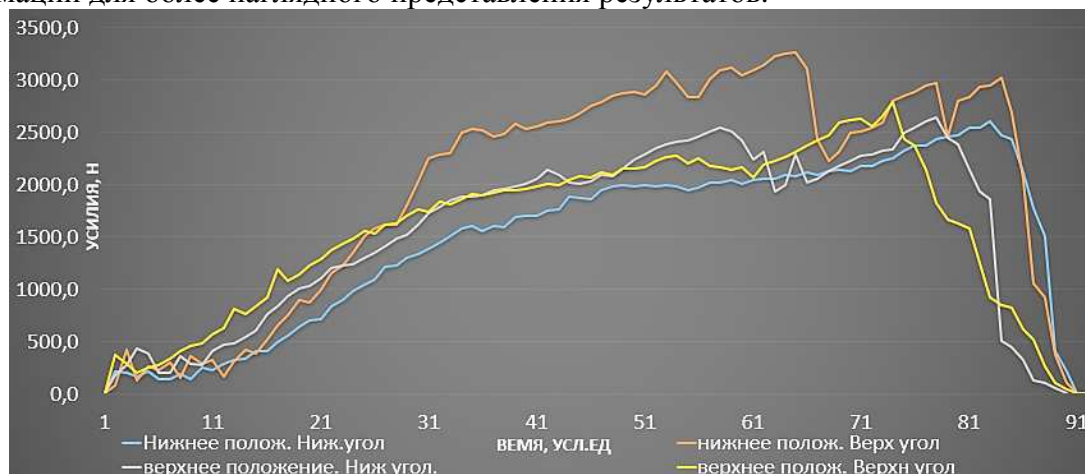


Рис. 7. Данные, полученные с тензометрической навески и обработанные в Microsoft Excel

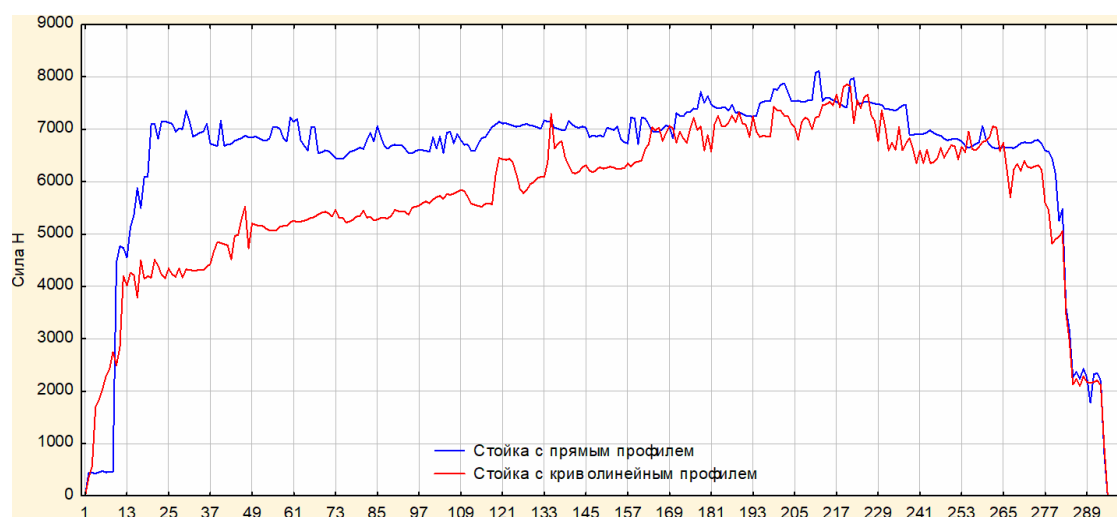


Рис. 8. Данные, полученные с тензометрической навески и обработанные в Statistica

Одной из ключевых особенностей предложенного технического решения является его универсальность, которая позволяет применять тензонавеску для измерения усилий на рабочих органах различных типов сельскохозяйственной техники с использованием тракторов до тягового класса 1,4 тс. Возможность передачи данных по Wi-Fi значительно упрощает процесс получения данных в полевых условиях и снижает время на их обработку, что важно при выполнении исследовательских работ.

Заключение. При проектировании сельскохозяйственных машин необходимо проводить тензометрические испытания. От их точности зависит дальнейшее качество производства работ и металлоёмкость разрабатываемой техники [12, 13]. Предложенная нами тензометрическая навеска позволяет проводить замеры в вертикальной и горизонтальной плоскостях в двух направлениях – направлении движения машины и перпендикулярном ему (увод орудия в сторону), с погрешностью до 8%. Тензонавеска имеет универсальное крепление. Используя блокировку элементов измерения, позволяет осуществлять более тонкие настройки снятия необходимых усилий, а возможность беспроводной передачи данных облегчает испытание спроектированного оборудования в полевых условиях. Полученные данные могут быть учтены при моделировании процессов взаимодействия рабочих органов со средой. Так же использование относительно доступных и дешевых компонентов тензометрической системы снижает стоимость проведения экспериментов.

Финансирование и благодарности. Исследование проводилось при поддержке и финансировании Фонда содействия инноваций в рамках договора "Старт-1" Договор 4290ГС1/70521 от 15.11.2021 Вн. код 0070521 заявка (С1-106429).

Список литературы

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 г. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 404 с.
2. Сухомлинова Н.Б, Чешев А.С. Эколого-мелиоративные мероприятия в районах с развитой эрозией почв // Экономика и экология территориальных образований. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 35-45.
3. Пыхтин И.Г., Гостев А.В. Современные проблемы применения различных систем и способов основной обработки почвы // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 1. – С. 3-6.
4. Патент № 2704881 РФ. Тензометрическая навеска для измерения сопротивления грунтов копанию / Т.К. Бабаев. – Заявка № 2019101338 от 17.01.2019; опубл. 31.10.2019, Бюл. №31.
5. Патент № 2498245 РФ. Установка для объемного тензометрирования / И.М. Бартнев, М.Н. Лысыч, И.Е. Донцов. – Заявка № 2012118290/28 от 03.05.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.
6. Паначев И.А, Черезов А.А. К методике экспериментальных исследований нагруженности элементов конструкций экскаваторов-мехлопат // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 1(95). – С. 19-23.
7. Конурун Д.В., Пичков С.Н, Шишулин Д.Н. Оценка влияния температурного воздействия на показания приклеиваемых тензорезисторов для испытаний при 300°C // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3(110). – С. 214-218.

8. Осипов Ю.В., Кошелев А.Е. Современные способы определения деформационных свойств горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 68-75. – DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.
9. Патент № 2461809 РФ. Стенд для измерения сопротивления грунтов и снежно-ледяных образований резанию / Р.Б. Желукевич, А.В. Лысянников, Ю.Ф. Кайзер, В.А. Ганжа. – Заявка № 2011119793/28 от 17.05.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. №26.
10. Лысыч М.Н. Шабанов М.Л., Захаров П.В. Обзор конструкций тензометрических установок для изучения силовых параметров рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 6.
11. Купряшкин В.Ф., Уланов А.С., Наумкин Н.И. Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 400-415. – DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.400-415.
12. Косулников Р.А., Карсаков А.А., Фомин С.Д., Назаров Е.А. Метод повышения точности измерения тягового сопротивления в навесном устройстве трактора // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1(49). – С. 326-333. – DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-326-333.
13. Федоренко В.Ф., Таркинский В.Е., Мишууров Н.П., Трубицын Н.В. Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 127-142. – DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101.127-142.

References

1. Report on the state and use of agricultural lands of the Russian Federation in 2019 – Moscow: FSBI "Rosinformagrotech", 2021. – 404 p.
2. Sukhomlinova N.B., Cheshev A.S. Ecological and reclamation measures in areas with developed soil erosion // Economics and ecology of territorial entities. 2019, vol. 3, no. 1, pp. 35-45.
3. Pykhtin I.G., Gostev A.V. Modern problems of application of various systems and methods of basic tillage // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2012, no. 1, pp. 3-6.
4. Patent No. 2704881 RU. Strain gauge for measuring soil resistance to digging / T.K. Babaev. – Appl. No. 2019101338 dated 17.01.2019; publ. 31.10.2019, Bul. No. 31.
5. Patent No. 2498245 of the Russian Federation. Installation for volumetric strain measurement / I.M. Bartenev, M.N. Lysykh, I.E. Dontsov. – Appl. No. 2012118290/28 dated 03.05.2012; publ. 10.11.2013, Bul. No. 31.
6. Panachev I.A., Cherezov A.A. To the methodology of experimental studies of the loading of structural elements of excavators-mechlopat // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2013, no. 1(95), pp. 19-23.
7. Konurin D.V., Pichkov S.N., Shishulin D.N. Assessment of the effect of temperature exposure on the readings of glued strain gages for testing at 300°C // Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. 2015, no. 3(110), pp. 214-218.
8. Osipov Yu.V., Koshelev A.E. Modern methods for determining the deformation properties of rocks // Mining information and analytical bulletin. 2017, no. 11, pp. 68-75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.
9. Patent No. 2461809 RU. Stand for measuring the resistance of soils and snow-ice formations to cutting / R.B. Zhelukevich, A.V. Lysyannikov, Yu.F. Kaiser, V.A. Ganzha. – Appl. No. 2011119793/28 dated 05.17.2011; publ. 09.20.2012, Bul. No. 26.
10. Lysykh M.N. Shabanov M.L., Zakharov P.V. Review of designs of strain-gauge installations for studying the power parameters of working bodies of tillage tools // Modern problems of science and education. 2015, no. 1-1, p. 6.
11. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I. Substantiation of the design of a dynamometric module for the study of a ploughshare-dump plough of a motor-block and its practical approbation using reverse engineering technologies // Bulletin of the Mordovian University. 2018, vol. 28, no. 3, pp. 400-415. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.400-415.
12. Kosulnikov R.A., Karsakov A.A., Fomin S.D., Nazarov E.A. Method of increasing the accuracy of measuring traction resistance in a tractor attachment // News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education. 2018, no. 1(49), pp. 326-333. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-326-333.
13. Fedorenko V.F., Tarkivsky V.E., Mishurov N.P., Trubitsyn N.V. Digital data processing methods for evaluating tractor traction // Engineering technologies and systems. 2021, vol. 31, no. 1, pp. 127-142. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101.127-142.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Ушаков Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший преподаватель	Ushakov Alexander Evgenievich – candidate of technical sciences, senior lecturer
Египко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Egipko Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor
sashka-ushakov@mail.ru	

Получена 05.10.2023