

*На правах рукописи*

**Трубицын Николай Владимирович**

Разработка метода и средства определения твердости почвы

**Специальность 05.20.01 – «Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном научном учреждении «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ») - Новокубанский филиал (КубНИИТиМ)

**Научный руководитель** член-корреспондент Россельхозакадемии,  
доктор технических наук, профессор  
**Федоренко Вячеслав Филиппович**

**Официальные оппоненты:** академик РАСХН,  
доктор технических наук, профессор  
**Краснощеков Николай Васильевич**  
  
Кандидат технических наук, профессор  
**Киселев Сергей Николаевич**

**Ведущая организация** Всероссийский научно-исследовательский  
институт механизации сельского хозяйства  
Российской академии сельскохозяйственных  
наук (ВИМ)

Защита диссертации состоится 16 сентября 2010 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 006.034.01 Государственного научного учреждения “Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка” (ГНУ ГОСНИТИ) по адресу: 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ГОСНИТИ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. и опубликован на сайте <http://www.gosniti.ru> 9 августа 2010 г.

**Ученый секретарь**  
диссертационного совета

**Соловьев Р.Ю.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Важной технологической характеристикой поля, оказывающей механическое сопротивление развивающейся корневой системе растений, влияющей на всхожесть семян и развитие растений, определяющей водный, воздушный и тепловой режим почвы является твердость почвы. Получение достоверных информационных сведений о твердости почвы имеет особое значение потому, что на уплотнение почвы значительное влияние оказывают многократные проходы по полю тракторов, комбайнов и другой мобильной современной техники. Функционирование такой техники приводит к распылению верхнего и уплотнению нижнего слоев почвы, отрицательно влияет на ее плодородие, снижает урожайность с.-х. культур.

В настоящее время для измерения твердости почвы применяются твердомеры ручного принципа действия. Использование таких твердомеров связано с трудоемкостью проведения работ и получением достоверных результатов измерений при проведении мониторинга характеристик поля в системе точного земледелия.

Таким образом, существует актуальная задача совершенствования методов и средств измерения твердости почвы.

Работа выполнена в соответствии с тематическими планами НИР «РосНИИТиМ» и ФГНУ «Росинформагротех» по госбюджетной тематике 2008 – 2009 г.г.

**Цель исследования** – разработка метода и средства измерения твердости почвы для получения достоверных информационных сведений при проведении испытаний сельскохозяйственной техники и при производстве растениеводческой продукции сельхозпроизводителями.

**Объект исследования** – технологический процесс погружения плунжера в почву для измерения ее твердости.

**Предмет исследования** – закономерности взаимодействия плунжеров с почвой для определения ее твердости по величине создаваемой силы сопротивления.

**Методика исследований.** Состоит в обосновании и разработке конструкции мобильного электромеханического измерителя твердости почвы и проведении теоретических, лабораторных и производственных исследований.

**Научная новизна.** Состоит в разработке метода измерения твердости почвы, который исключает влияние изменяющейся скорости погружения плунжера и, для его реализации, сконструирован прибор.

Новизна технического решения подтверждена патентом РФ № 78574 «Устройство для измерения твердости почвы».

**Практическая значимость и реализация исследований.** Результаты научных исследований послужили основой для разработки метода измерения твердости почвы и электронного твердомера почвы, применение которых на зональных машиноиспытательных станциях при испытаниях сельскохозяйст-

венной техники по ГОСТ 20915-75 и СТО АИСТ 4.1-2004, позволит повысить точность проводимых измерений, обеспечить снижение трудоемкости проведения измерений и повышении оперативности получения результатов. Электронный твердомер почвы ИП271 и методика измерения твердости почвы внедрены в ГНУ СКС ВИМ Россельхозакадемии.

**Апробация.** Основные результаты исследований по работе докладывались на 4-й международной научно-практической конференции «Информационные технологии, системы и приборы АПК» АГРОИНФО-2009, 7-й международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 статьи и патент РФ № 78574 на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, общих выводов и приложения. Диссертация изложена на 132с., содержит 14 табл., 61 рис., 50 с. Приложений. Список используемой литературы включает 144 наименования.

**Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.**

1. Метод измерения твердости почвы, исключаящий влияние человеческого фактора на получаемые результаты.
2. Технологическая схема измерителя твердости почвы.
3. Техническое средство для измерения твердости почвы, позволяющее автоматизировать процесс измерения и регистрации результатов ИП271.
4. Результаты экспериментальных исследований измерения твердости почвы твердомером ИП271.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе «Состояние вопроса, цель и задачи исследований»** показана важность определения твердости материалов, в том числе и почвы, представлены существующие методы и средства измерения твердости почвы, а также выявлены недостатки существующих методов и средств, определено перспективное направление на устранение этих недостатков и на создание новых методики и технического средства измерения твердости почвы.

Анализ существующих методов и средств измерения твердости почвы, позволил классифицировать их по способу перемещения плунжера в почве.

1. Перемещение плунжера при помощи падающего груза (Метод Кунце, метод ДОРНИИ и др.).
2. Перемещение плунжера при помощи рукоятки и шестерни (Твердомер Ревякина, твердомер ВИСХОМ, твердомер ИП232 и др.).

3. Перемещение плунжера путем вдавливания (Зонд Гетке, твердомер Eijkelkamp P-1.50 и P-1.52, пенетрометр ПГ-1 и др.)

Рабочими органами в конструкциях рассмотренных твердомеров являются шток с плунжером. Длина штока эквивалентна глубине погружения плунжера в почву и определяется агротехническими требованиями. По форме плунжеры бывают цилиндрические, шарообразные (на сдавливание), в виде трехгранного клина и конические с различными углами при вершине (на расклинивание).

Для различной твердости почвы применяют плунжеры с соответствующей площадью поперечного их сечения  $1 \text{ см}^2$ ;  $2 \text{ см}^2$ ;  $2,8 \text{ см}^2$  и более.

Для определения силы сопротивления проникновению в почву используются параметры плунжера (конуса) и коэффициенты, а при использовании силоизмерительных пружин - постоянные пружин.

Показателем твердости может служить глубина погружения плунжера от одного удара груза в  $1 \text{ кг}\cdot\text{м}$ . Твердость почвы при расклинивающим сопротивлением или сдавливании выражают в кПа, а также – удельной работой (в  $\text{кг}/\text{см}^2$ ), характеризующей величину сопротивления. В случае работы с цилиндрическим плунжером расчет средней твердости почвы может производиться как отношение действующей силы (массы) к вытесненному объему.

Перечисленные выше твердомеры относятся к конструкциям ручного принципа действия, что обуславливает трудоемкость и ограниченность их использования при проведении мониторинга твердости почвы на всей площади поля для системы точного земледелия.

Кроме того, необходима тарировка пружин твердомеров и периодическое построение тарировочных кривых, так как жесткость пружин не постоянна. Процесс построения кривых твердомера, использование их при обработке данных, снятых при измерении и вычислении твердости почвы, и получение информации связано с большим объемом ручной работы.

По результату проведенного анализа была поставлена цель - разработать метод и техническое средство для измерения твердости почвы, использующее в своей конструкции современные средства автоматизации и компьютерной техники и исключаяющее влияние оператора на получаемые результаты измерений.

**Во втором разделе «Теоретические исследования»** дано теоретическое обоснование влияния скорости погружения плунжера при определении твердости почвы.

Для построения исходной расчетной модели взаимодействия реальных физических тел в простейшем одномерном случае обратимся к рисунку 1.

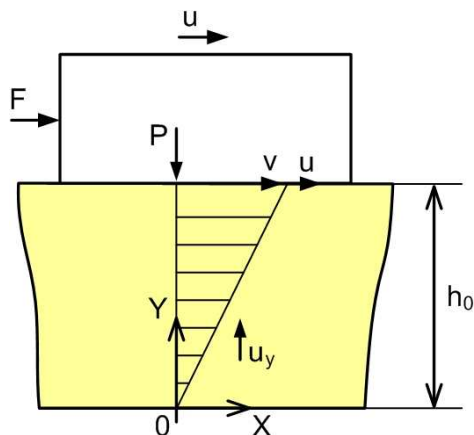


Рисунок 1 - Схема «течения» граничного слоя при скольжении тела по деформируемой опоре (грунту)

Трение скольжения (рис. 1) сопровождается сдвигом частиц грунта со скоростью  $v$ , меньшей скорости  $u$  тела. Напряжения сжатия и сдвига грунта определяются по величине потребной толкающей силы  $F$ , отнесенной к характерной площади  $s$  деформатора. Перемещение частиц грунта распространяется на некоторую конечную глубину  $h_0$ , называемую граничным или контактным слоем. Изменение скорости частиц по высоте слоя показано на рисунке 1 заштрихованными фигурами, и в первом приближении может быть принято линейным.

Задача состоит в том, чтобы описать процессы трения на базе известных фундаментальных законов деформирования тел, в частности, грунта при сжатии и сдвиге: закона Гука, характеризующего упругое поведение твердых тел в пределах малых величин деформаций, и закона Ньютона, описывающего вязкое течение реальных жидкостей. Так как в любых реальных телах оба эти свойства - упругость и вязкость - в большей или меньшей мере проявляются совместно, то для этого в расчетную модель трения помимо фрикционного элемента, характеризующего «чистое» или идеальное внешнее трение (сила  $\Pi$ ), обусловленное вертикальной нагрузкой  $P$  на контакте, необходимо ввести также упругий (пружинный)  $K$  и вязкий (гидравлический демпфирующий)  $A$  элементы и определять силу трения как алгебраическую сумму трех составляющих (рисунок 2).

Такая модель называется вязкоупругопластической, поскольку элемент трения характеризует особый вид деформирования тел — пластическое течение, при котором сила сопротивления сохраняет постоянную величину.

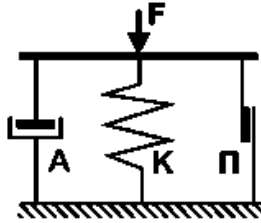


Рисунок 2 - Вязкоупругопластическая модель деформирования реальных тел

Термин «упругость» здесь не следует понимать буквально, поскольку деформации большинства реальных тел полностью не восстанавливаются и не являются упругими в строгом смысле этого слова. В механике сплошных или деформируемых сред, в частности, в механике грунта этот термин широко используется для описания закона линейной деформируемости (квазиупругости) реальных тел в пределах ограниченных величин деформаций.

Закон Гука для твердых тел определяет пропорциональность квазиупругих сил относительному изменению объема тел или относительной их деформации; коэффициент пропорциональности  $K$ , называемый модулем упругости или жесткостью, характеризует напряженность деформируемого тела. Закон Ньютона для реальных жидкостей определяет пропорциональность вязких сил градиенту скорости частиц в граничном слое. Коэффициент пропорциональности  $A$  называют коэффициентом вязкости ньютоновской жидкости. Примем далее во внимание, что абсолютная величина объемной деформации  $\Delta V$  грунта за малый промежуток времени  $\Delta t$ , задающий малую величину относительной деформации, пропорциональна скорости  $u$  деформирования  $\Delta V = su\Delta t$ ; а полный объем  $V$  грунта, вовлекаемого в процесс деформирования за то же время, — скорости  $c$  распространения деформаций в среде  $V = sc\Delta t$ . Тогда величина относительной деформации грунта при качении колеса определится как отношение указанных скоростей:

$$\Delta V/V = \beta = u/c \leq 1,0. \quad (1)$$

Для скользящего тела полный объем  $V$  грунта, подвергаемого сдвигу за малый промежуток времени, пропорционален скорости  $u$  скольжения, а абсолютная величина объемной деформации  $\Delta V$  — скорости  $v$  частиц грунта. Поэтому относительную деформацию сдвига можно определить соотношением:

$$\Delta V/V = \gamma = v/u \leq 1,0. \quad (2)$$

Таким образом, вязкоупругопластическая модель позволяет составить следующие два интегральных уравнения деформирования тел — при сжатии и сдвиге соответственно:

$$F = \Pi + K\beta - Adu/dy, \quad (3a)$$

$$F = \Pi + K\gamma - Adv/dy. \quad (3б)$$

В них знак минус перед последним слагаемым учитывает разгружающее свойство текущего граничного слоя, обусловленное одинаковым направ-

лением действия внешней силы  $F$  и вязкой составляющей силы сопротивления движению (рисунок 1).

С учетом соотношения (2) для случая линейного распределения скоростей частиц в граничном слое:  $du/dy \approx u/h_0$ ,  $dv/dy \approx v/h_0$  — получим приближенную форму уравнений деформирования:

$$F \approx \Pi + K\beta - au, \quad (4)$$

$$F \approx \Pi + K\gamma - a\gamma u, \quad (5)$$

$$a = A/h_0 \quad (6)$$

$a$  — коэффициент объемной вязкости или просто вязкость граничного слоя. Для констант  $A$ ,  $K$  и  $\Pi$  в обоих случаях здесь приняты одинаковые обозначения, но необходимо иметь в виду, что характеризуют они разные процессы и по величине могут быть различными.

При скольжении твердого тела по опорной поверхности с постоянной скоростью (стационарный режим трения, рисунок 1) сила сопротивления движению постоянна. Иными словами, процесс сдвига грунта происходит при постоянной рассеиваемой мощности

$$dW/dt = \Omega = const. \quad (7)$$

Это дает право заменить в уравнении (5) скорость скольжения тела на отношение мощности к толкающей силе. В этом и состоит упомянутая выше подстановка, которая приводит к квадратному алгебраическому уравнению деформирования граничного слоя:

$$F^2 - (\Pi + K\gamma)F + a\gamma\Omega = 0. \quad (8)$$

Оно имеет два действительных корня:

$$F_{1,2} = \frac{(\Pi + K\gamma)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\Pi + K\gamma)^2}{4} - a\gamma\Omega}, \quad (9)$$

которые графически представлены на рисунке 3 в функции деформации  $\gamma = v/u$  для условия  $\Omega = const$ . При этом графики (рисунке 3, *a*) отвечают вязкопластическому характеру сдвига, наблюдаемому при отсутствии упругих свойств контакта ( $K = 0$ ), и представляют собой комбинацию прямой 1 и параболы 2 с горизонтальной осью; предельная сила сдвига  $F_{пр}$  (при  $\gamma \rightarrow \infty$ ) в этом случае равна половине пластической составляющей («чистого» трения).

Графики (рис. 3, *б*) характеризуют вязкоупругий режим сдвига ( $\Pi = 0$ ) и определяются комбинацией прямой 1 и гиперболы 2 с горизонтальной осью и асимптотой 3; здесь величина «пика» или «горба» в два раза превышает предельное значение функции.



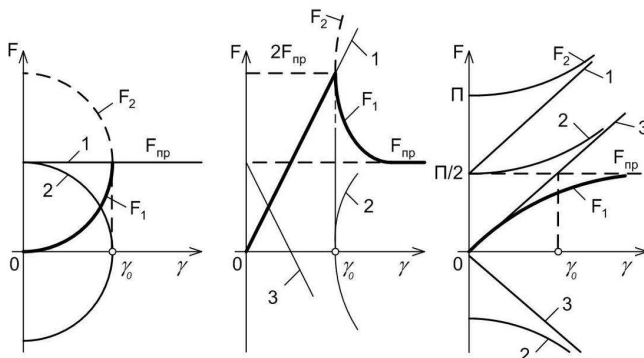


Рисунок 3 - Зависимость силы трения скольжения от относительной деформации для вязкопластического (а), вязкоупругого(б) и вязкоупругопластического (в) граничного слоя ( $\gamma_0$  – предварительное смещение тела)

Графики (рисунок 3, в) отражают общий случай, при котором существенны все три составляющие трения, и представляют собой комбинацию прямой 1 и гиперболы 2 с вертикальной осью и асимптотой 3, задаваемой уравнением

$$F_{ac} = -\frac{(\Pi + K\gamma)}{2} + \frac{a\Omega}{K} \quad (10)$$

Предельная сила трения в этом случае определяется соотношением

$$F_{np} = \frac{a\Omega}{K} \leq \frac{\Pi}{2}, \quad (11)$$

которое входит в уравнение асимптоты. Она тем больше, чем значительнее вязкость и меньше жесткость граничного слоя, но не может превышать половину пластической составляющей, в противном случае подкоренное выражение в (9) становится отрицательным. Функциям  $F_1(\gamma)$  отвечают отрицательные значения радикала в соотношении (9) и жирные линии графиков, функциям  $F_2(\gamma)$  — положительные значения радикала и пунктирные линии графиков.

Многочисленные опыты по трению твердых поверхностей и испытанию образцов грунта на сдвиг показывают, что в природе реализуются только представленные на рисунке 3 зависимости типа  $F_1(\gamma)$ . Второй корень уравнения (9) реализуется при мощности, равной нулю, и утверждает простую истину: сила трения покоя равна пластической составляющей или силе «чистого» внешнего трения. Причем оказывается, что острый «пик» кривой сдвига  $F_1(\gamma)$ , наблюдаемый при малом давлении на контакте (идеальный вязкоупругий контакт), сглаживается по мере повышения нормального давления и при вязкоупругопластическом контакте полностью исчезает.

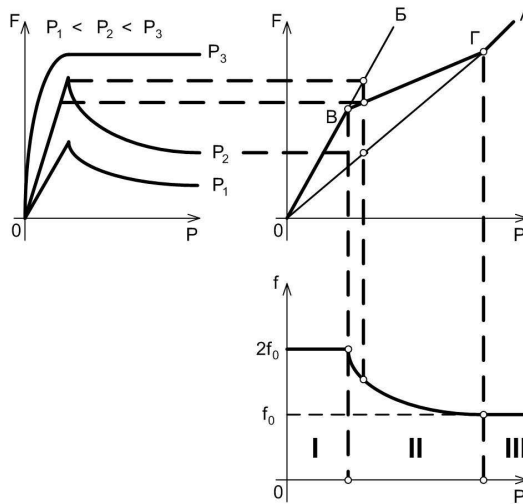


Рисунок 4 - Характеристики сдвига граничного слоя и обусловленные ими законы трения Амонтона (зоны I и III) и Кулона (зона II)

Это обстоятельство отражено на рисунке 4 слева и в полной мере согласуется с полученным здесь теоретическим результатом. Справа показано перестроение этих кривых в кривые зависимости силы или коэффициента трения  $f = F/P$  от нормального давления на контакте. Прямая  $OA$  задает изменение «предельных значений силы трения, прямая  $OB$  показывает изменение «пиковых» значений силы для идеального вязкоупругого контакта. В промежутке между этими прямыми, на линии  $BG$  располагаются сглаженные «пики» кривых сдвига.

Таким образом, максимальные (табличные) значения силы трения задаются ломаной жирной линией  $OBGA$  и образуют на поле нижнего графика три характерные зоны: две зоны Амонтона (зоны I низкого и III высокого давления), характеризующиеся постоянством коэффициента трения, и одну зону Кулона (зона II среднего давления), в которой при увеличении нормального давления на контакте коэффициент трения уменьшается по гиперболическому закону. Эта картина отличается от известной, предложенной И.В. Крагельским, наличием зоны низкого давления с максимальным значением коэффициента трения, в два раза превышающим минимальное  $f_0$ .

Скорость  $v$  частиц в потоке граничного слоя (рисунке 1) не может превышать величину  $u$  скорости скольжения тела. При малых значениях  $u$  величина  $v$  того же порядка, при больших из-за наличия инерционных сил в граничном слое может существенно от нее отличаться. Таким образом, при изменении скорости скольжения в диапазоне  $u = 0 \dots \infty$  отношение  $v/u$  может изменяться в пределах от единицы до нуля. Полагая это отношение непре-

рывной и монотонной функцией параметра  $u$ , приходим к следующему ее выражению:

$$\frac{v}{u} = e^{-\delta u} \quad (12)$$

Здесь показатель  $\delta$  характеризует степень инерционного запаздывания граничного слоя от скользящего тела. При  $\delta = 0$  никакого запаздывания нет,  $v = u$ , граничный слой «прилипает» к поверхности скользящего тела, что характерно для идеально вязкого граничного слоя — жидкости, газа. При сухом и граничном трении, когда в граничном слое преобладают относительно тяжелые металлические или другие частицы ( $\delta \neq 0$ ), может наблюдаться его запаздывание, тем большее, чем выше скорость скольжения тела.

Решая последнее соотношение совместно с (5), получаем следующую зависимость силы трения от скорости скольжения тела:

$$F(u) = \Pi, \quad (13)$$

при  $u = 0$ ;

$$F(u) = (K - au)^{-\delta u}, \quad (14)$$

при  $u \neq 0$ .

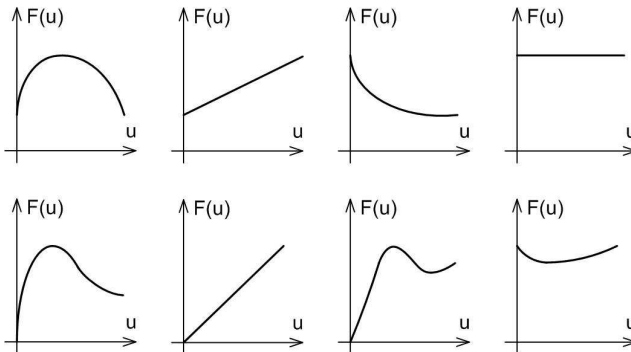


Рисунок 5 - Скоростные характеристики силы трения скольжения твердых тел

В зависимости от конкретных значений параметров  $K$ ,  $a$  и  $\delta$  при увеличении скорости скольжения функция  $F(u)$  может непрерывно возрастать, непрерывно убывать, иметь минимум или максимум (рисунок 5). Тем самым она способна описать все многообразие скоростных характеристик трения, встречающихся в инженерной практике.

Проведенные теоретические исследования показали, что скорость погружения плунжера будет оказывать влияние на сопротивление проникновению плунжера в почву.

Для возможности сопоставления результатов определения твердости почвы необходимо обеспечивать одинаковую скорость погружения плунжера в почву.

**В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований»** приводится предлагаемая программа работ по проведению экспериментальных исследований которая направлена на проверку достоверности теоретических исследований, разработку методики и средств определения твердости почвы.

Первый этап – подготовительная работа:

- определение методики проведения эксперимента;
- определение состава необходимого стендового оборудования;
- определение технических средств для проведения экспериментов;
- определение состава поверенных измерительных средств, для обеспечения необходимой точности и достоверности получаемых экспериментальных данных;
- определение численного состава исполнителей.

Второй этап – проведение экспериментальных исследований:

- проведение технической экспертизы стендового оборудования;
- проверка условий проведения испытаний;
- проверка метрологических показателей стендового оборудования;
- проведение экспериментальных исследований.

Третий этап – обработка полученных результатов:

- систематизация полученных результатов;
- классификация;
- проведение анализа.

В качестве оборудования для определения твердости почвы предлагается использовать разработанный в Новокубанском филиале ФГНУ «Росинформагротех» мобильный электронный твердомер почвы ИП271.

Для измерителя твердости почвы ИП 271 основными требованиями являлись механизация и автоматизация технологического процесса определения твердости почвы, обеспечивающего равномерность погружения плунжера в почву на глубину не менее 400мм при нагрузке на плунжер в пределах от 20 до 70 кг/см<sup>2</sup>. Структурная схема ИП271 представлена на рисунке 6, где 1 – датчик верхнего положения плунжера; 2 – датчик нижнего положения плунжера; 3 – датчик перемещения плунжера (инкрементальный энкодер); 4 – тензометрический датчик; 5 – блок питания электронного измерителя твердости почвы; 6 – интегральный аналого-цифровой преобразователь; 7 – жидкокристаллический дисплей; 8 – микрокомпьютер с программой и энергонезависимой памятью; 9 – клавиатура; 10 – аккумуляторная батарея; 11 – мотор-редуктор; 12 – аварийный концевой выключатель.

Перед проведением лабораторных экспериментальных исследований была проведена калибровка твердомера ИП271. Для калибровки тензочанала использовался калибровочный стенд ИП272 с набором поверенных гирь. Для калибровки датчика перемещения используется поверенная рулетка РЗ-10.

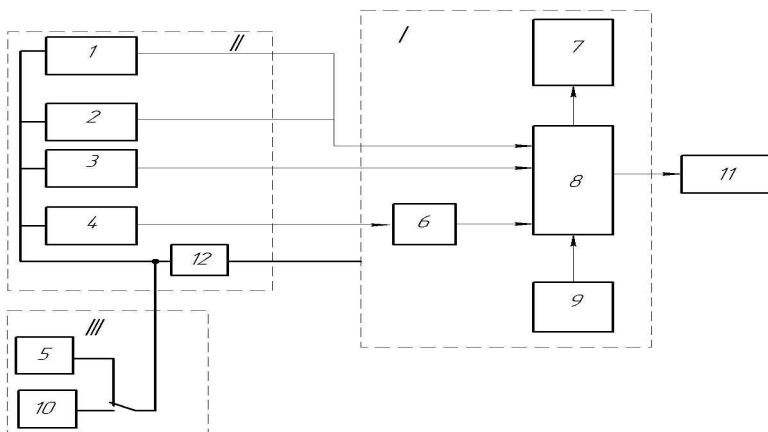


Рисунок 6 - Структурная схема измерителя твердости почвы

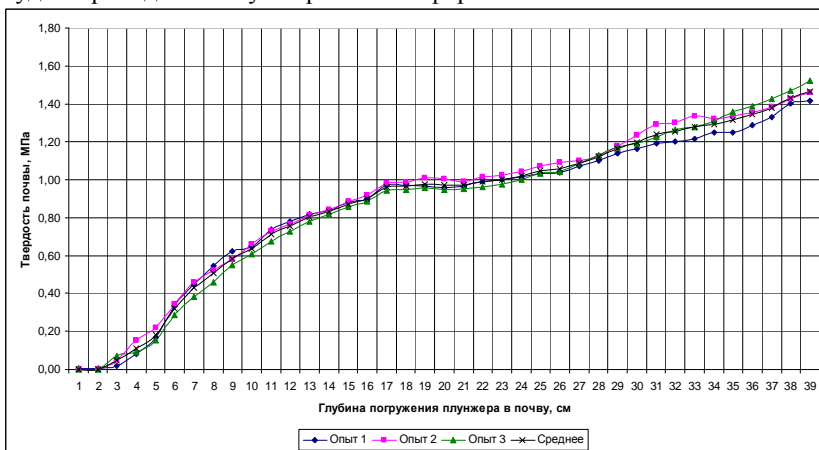
Перед началом каждой сети опытов, для модельной среды, использующейся в исследованиях (просеянная почва и высушенный речной песок), определяется плотность и влажность.

Для дальнейшей обработки результатов измерений на персональном компьютере, проведенных с помощью мобильного электронного твердомера ИП271, используется программа TVERD. Она позволяет получать данные с ИП271 через COM-порт или порт USB, сохранить их в текстовом формате или в базе данных, произвести их дальнейшую обработку, построить графики зависимостей твердости почвы от глубины погружения и сохранить эти графики в файле формата \*.gif.

**В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ»** приводится описание модельной среды для проведения опытов по измерению твердости почвы, характеристики плунжеров, используемых в экспериментальных исследованиях.

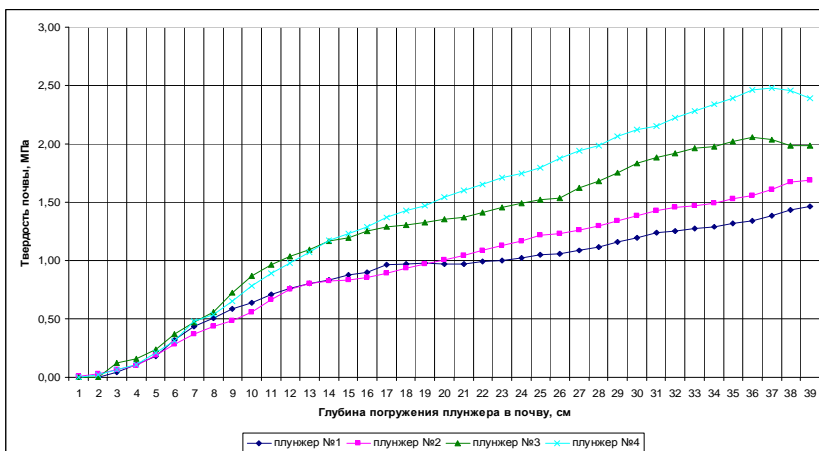
Первая серия опытов посвящена исследованию влияния формы плунжера на величину измеренной твердости почвы. Для этой серии опытов использовались плунжеры с площадью поперечного сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , конической формы (с углом при вершине  $30^\circ$  и  $60^\circ$ ), цилиндрической формы и в форме полусферы. Обработка полученных результатов показала – разброс значений твердости почвы полученных при использовании одного плунжера незначителен (рисунок 7). Сравнение значений твердости почвы полученных при помощи плунжеров разной формы отличаются (рисунок 8). Применив к полученным данным методы математической статистики, вычислим среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, ошибку опыта и точность опыта по каждому плунжеру. Наилучшие показатели по среднему квадратическому отклонению, коэффициенту вариации и ошибке опыта име-

ет плунжер - конус с углом при вершине  $60^\circ$ , поэтому дальнейшие опыты будем проводить с плунжерами этой формы.



Опыт 1 – плунжер №1 угол при вершине  $60^\circ$  скорость погружения 10 мм/с;  
 Опыт 2 – плунжер №1 угол при вершине  $60^\circ$  скорость погружения 10 мм/с;  
 Опыт 3 – плунжер №1 угол при вершине  $60^\circ$  скорость погружения 10 мм/с;

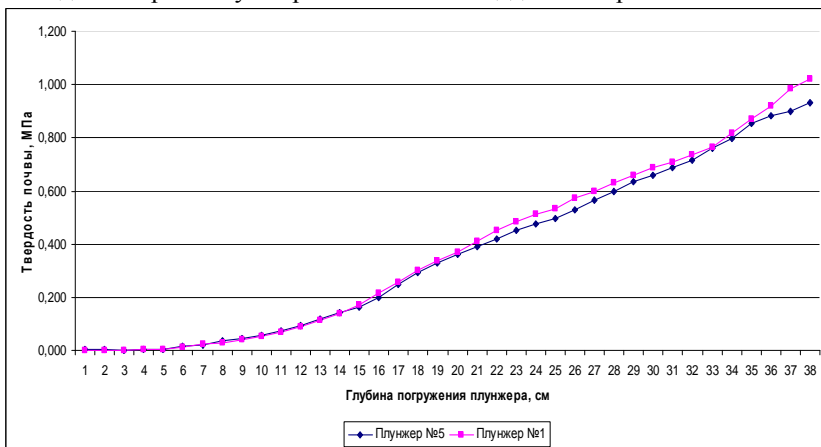
Рисунок 7 - Зависимость твердости почвы от глубины погружения в нее плунжера конической формы



Плунжер №1 – конус  $60^\circ$ , площадь сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , скорость погружения 10 мм/с;  
 Плунжер №2 – конус  $30^\circ$ , площадь сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , скорость погружения 10 мм/с;  
 Плунжер №3 – цилиндр, площадь сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , скорость погружения 10 мм/с;  
 Плунжер №4 – полусфера, площадь сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , скорость погружения 10 мм/с

Рисунок 8 - Зависимость твердости почвы от глубины погружения в нее плунжеров различных форм

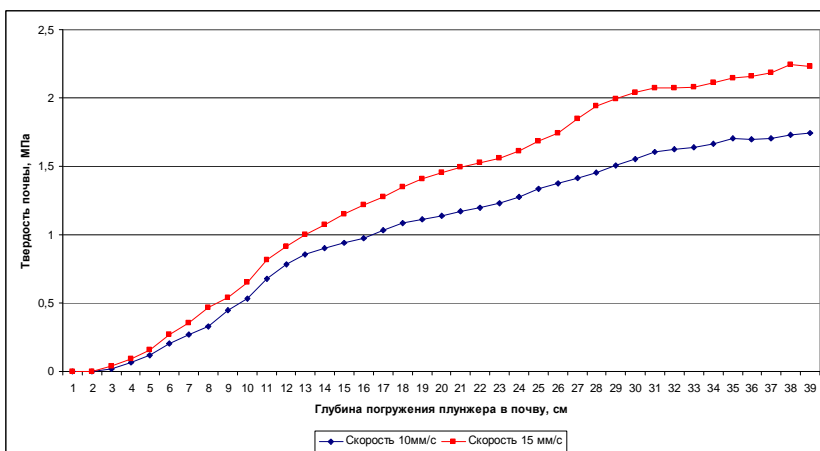
Вторая серия опытов посвящена исследованию влияния площади поперечного сечения плунжера на величину измеренной твердости почвы. Для этой серии опытов использовались плунжеры конической формы с углом при вершине  $60^\circ$  и площадью поперечного сечения  $2,01 \text{ см}^2$  и  $6,29 \text{ см}^2$ . Сравнение полученных данных (рисунок 9) и результатов их обработки с помощью математической статистики позволяет сделать вывод - измеренные показания твердости почвы не зависят от площади поперечного сечения плунжера. В то же время для увеличения точности измерения для почвы с меньшей твердостью надо выбирать плунжер с большей площадью поперечного сечения.



Плунжер №1 – конус  $60^\circ$ , площадь сечения  $2,01 \text{ см}^2$ , скорость погружения  $10 \text{ мм/с}$ ;  
 Плунжер №5 – конус  $60^\circ$ , площадь сечения  $6,29 \text{ см}^2$ , скорость погружения  $10 \text{ мм/с}$ ;

Рисунок 9 - Зависимость твердости почвы от глубины погружения измеренная плунжерами с разной площадью поперечного сечения.

Третья серия опытов была посвящена исследованию влияния скорости погружения плунжера на величину измеренной твердости почвы. Для этой серии опытов использовался плунжер конической формы с углом при вершине  $60^\circ$  и площадью поперечного сечения  $2,01 \text{ см}^2$ . Для изменения скорости погружения плунжера использовался импульсный стабилизированный блок питания с возможностью регулировки выходного напряжения. После проведения опытов и обработки результатов на персональном компьютере с помощью программы TVERD, были получены средние зависимости твердости почвы от глубины погружения плунжеров (рисунок 10) из которых видно, что увеличение скорости погружения плунжера ведет к увеличению измеренных показаний твердости почвы. Результаты этой серии опытов подтверждают выводы, полученные при проведении теоретических исследований.



Плунжер №1 – конус 60°, площадь сечения 2,01 см<sup>2</sup>, скорость погружения 10 мм/с;

Плунжер №1 – конус 60°, площадь сечения 2,01 см<sup>2</sup>, скорость погружения 15 мм/с;

Рисунок 10 - Зависимость твердости почвы от глубины погружения в нее плунжера с разной скоростью погружения

Проанализировав результаты теоретических и экспериментальных исследований, мы приходим к однозначному выводу – для получения достоверных и сопоставляемых данных о твердости почвы необходимо:

- полностью исключить влияние человеческого фактора на процесс измерения твердости почвы;
- использовать измерители твердости почвы с одинаковой скоростью погружения плунжера для устранения влияния неоднородности почвы в разных климатических зонах, неодинаковое влияние состава этих почв на зависимость силы трения от скорости движения плунжера.

**В пятом разделе «Практическая реализация и экономическая эффективность результатов исследования»** отражено несколько основных направлений использования разработанной методики и технического средства:

- проведение государственных испытаний сельскохозяйственной техники на зональных машиноиспытательных станциях, с целью обеспечения требований к условиям проведения испытаний, предложенная методика и техническое средство призваны заменить существующие твердомеры и пенетрометры с целью повышения точности определения твердости почвы, обеспечить снижение трудоемкости проведения измерений и оперативности получения результатов;

- для сельхозпроизводителей - знание твердости почвы на разных горизонтах обрабатываемой почвы необходимо для задания оптимальных настроек сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин и выбора необходи-



мых почвообрабатывающих орудий, что позволяет в ряде случаев отказаться от некоторых операций и в значительной степени увеличить экономию горючего;

- для агрономов - знание твердости почвы позволит заранее принять меры по обеспечению оптимальных условий произрастания растений.

Для определения экономической эффективности разработанного технического средства было проведено сравнение опытного образца ИП271 и базового варианта измерителя твердости почвы ИП232. Были проведены расчеты затрат на оплату обслуживающего персонала, электроэнергии, услуг по проведению поверки и калибровки, амортизацию. Годовой экономический эффект при обследовании площади в 50 га и количестве замеров 100 на 1 га составил 52,328 тыс. рублей, и срок окупаемости составил менее 1,91 лет.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих методов и средств определения твердости почвы показал, что, несмотря на их многообразие, по-прежнему остро стоит вопрос получения достоверных сведений о твердости почвы. Также не решен вопрос по проведению мониторинга твердости почвы и составления карты полей. Одним из наиболее эффективных путей решения этих вопросов является применение автоматизации и компьютерной техники для получения исходных данных и их последующей компьютерной обработки.

2. Во всех проанализированных методах и средствах измерения твердости почвы одним из неустраняемых факторов, влияющих на получаемые показания при определении твердости почвы, является влияние человеческого фактора, поскольку большая часть средств для определения твердости почвы заглубляется в почву под действием физической силы оператора.

3. Теоретическими исследованиями установлены аналитические зависимости влияния скорости погружения плунжера при измерении твердости почвы, на определяемое сопротивление проникновения. Из проведенных теоретических исследований следует, что – для обеспечения сопоставимости результатов измерений необходимо применение автоматического привода штока плунжера и обеспечение постоянной скорости погружения плунжера.

4. Для проверки результатов теоретических исследований была составлена методика экспериментальных исследований. На первом этапе - была проведена подготовительная работа по определению состава необходимого стендового оборудования, технических и поверенных измерительных средств для обеспечения необходимой точности и достоверности получаемых экспериментальных данных. На втором этапе – проведение экспериментальных исследований, включающие в себя, в том числе, проверку условия проведения испытаний и проверку метрологических показателей стендового оборудования.

5. Для экспериментальных исследований в качестве измерителя твердости почвы использовался опытный образец прибора ИП271, разработанный в

Новокубанском филиале ФГНУ «Росинформагротех». ИП271 удовлетворяет агротехническим требованиям, предъявляемым к средствам измерения твердости почвы – для перемещения штока имеется привод от электродвигателя с редуктором, обеспечивающий постоянную скорость погружения плунжера. Контроллер преобразует сигнал от тензодатчика, проводит первичную обработку полученных сигналов и сохраняет их в энергонезависимой памяти.

6. Для обработки полученных экспериментальных данных на персональном компьютере использовалась программа TVERD, которая позволяет получать данные с контроллера ИП271, сохранять их в базе данных, обрабатывать и строить графики зависимости твердости почвы от глубины погружения плунжера.

7. Результаты лабораторных исследований, проведенные с плунжером конической формы, с углом при вершине  $60^{\circ}$  и площадью  $2,01\text{см}^2$ , показали зависимость сопротивления проникновения плунжера в почву от скорости погружения (при изменении скорости погружения плунжера с 10 мм/с до 15 мм/с, измеренная величина твердости почвы увеличилась на 25%).

8. При сравнении двух образцов твердомеров (базовой - ИП232 с ручным приводом и опытной - ИП271) можно сделать следующие выводы:

- разработанный мобильный электронный твердомер ИП 271 при проведении опытов имеет более чем в 3 раза выше производительность по сравнению с базовым прибором;

- благодаря возможности сохранения данных в энергонезависимой памяти и передачи их непосредственно на персональный компьютер, время, необходимое для обработки результатов, сократилось более чем в 5 раз;

- использование совместно с ИП271 системы спутниковой навигации позволяет создавать карты твердости почвы полей для системы точного земледелия.

9. Экономические расчеты подтверждают, что применении ИП271 экономически целесообразно. Годовой экономический эффект при обследовании площади в 50 га и количестве замеров 100 на 1 га составил 52,328 тыс. рублей, и срок окупаемости составил менее 1,91 лет.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Трубицын, Н.В. Измеритель твердости почв. [Текст] / И.М. Киреев, Н.В. Трубицын, З.М. Коваль и др. // Тракторы и сельхозмашины. – М., - ISSN 0235-8573. 2010. - №3. – С. 11-12.

2. Трубицын, Н.В. Новые приборы и программные средства для эксплуатационно-технологической оценки сельхозмашин. [Текст] / И.В. Фролов, Н.В. Трубицын, И.В. Пронин // Техника и оборудование для села. – М., - ISSN 2072-9642. 2010. - №3. – С. 23-24.

### *Патенты РФ*

3. Пат. На пол. мод. 78574 РФ, МКИ<sup>3</sup> G01N 9/00. Устройство для измерения твердости почвы/ И.М. Киреев; Н.В. Трубицын; З.М. Коваль - №2008129960; Заявлено 21.07.2008;Опубл. 27.11.2008, Бюл. №33.

### *Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций*

4. Трубицын, Н.В. Измерители твердости почвы [Текст] / Н.В. Трубицын // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: сб. науч. докл. VII Международной научно – технической конференции, г. Москва. В 5 ч. Ч.5. Инфокоммуникационные технологии и нанотехнологии – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – С. 145 – 148.

5. Трубицын, Н.В. Измеритель твердости почвы [Текст] / И.М. Киреев, В.Е. Таркинский, Н.В. Трубицын и др.// Информационные технологии, системы и приборы в АПК: сб. науч. докл. IV Международной научно – практической конференции «АГРОИНФО 2009», г. Новосибирск. В 2 ч. Ч.1. – Новосибирск.: Сибирский физико-технический институт аграрных проблем СО Россельхозакадемии, 2009. – С. 287 – 290.