

Техніка і обладнання для АПК – дослідження, експертиза, прогноз розвитку

УДК 631.311:631.42:631.43

Кушнарєв А., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НААН України, Кравчук В., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НААН України (УкрНІІПІТ ім. Л. Погорєлого), Кушнарєв С., канд. техн. наук, доц., НУБіП України, Дюжаєв В., канд. техн. наук, доц. ТГАТУ

Мониторинг плотности почвы пахотного горизонта в системе точного (управляемого) земледелия

Установлены корреляционные зависимости «твердость почвы – плотность почвы» при позиционном их измерении и «твердость почвы (позиционные измерения) – твердость почвы (непрерывные измерения)», которые позволяют осуществлять оперативный мониторинг плотности почвы на поле с последующим построением электронных карт.

Состояние вопроса

Одним из важнейших интегральных свойств, определяющих состояние почвы как природного тела, обеспечивающего урожай сельскохозяйственных культур, является плотность почвы ("bulk density"). Оценкой степени внимания к этому свойству со стороны исследователей могут служить Интернет-ресурсы в поисковой системе Google. В Google на сегодняшний день находим 1 807 000 источников на английском языке на ключевое слово "bulk density and yield" и 33100 источников на русском языке на ключевое слово "плотность почвы и урожай".

В научных кругах широко используются два понятия: "равновесная плотность почвы" и "оптимальная плотность почвы" [1]. Одной из основных задач обработки почвы является регулирование плотности почвы, точнее перевод плотности почвы на период вегетации растений из состояния равновесной в состояние оптимальной плотности путем механического воздействия.

Естественно, возникает вопрос: как распределена плотность почвы на реальном поле перед ее обработкой? Что нужно сделать, чтобы с минимальными затратами привести плотность почвы на поле в состояние "оптимальной плотности"? Ответы на эти вопросы позволяют выбрать способ, орудие и режимы его работы (например, глубину обработки). С другой стороны, при оценке систем точного земледелия отмечается, что на вариабельность урожая (на примере озимой пшеницы) существенно (до 30-40%) влияют такие почвенные факторы, как плотность почвы и содержание гумуса. Различие отдельных участков поля по этим показателям требует индивидуального подхода к их механической обработке [2, 3].

Мониторинг плотности почвы – это реальная основа не только обеспечения энергосбережения при обработке почвы, но и основа рационального использования ресурсного (природного и антропогенного) обеспечения урожая.

К сожалению, сегодня практически отсутствуют экспресс-методы определения плотности почвы, а используемый в практике определения плотности почвы метод "вырезных цилиндров" не только трудоемок, но и требует длительного времени для получения конечного результата.

В настоящее время GPS открывают возможность снятия информации о состоянии почвы в любой точке поля и принятия решения по выбору технологии механического воздействия, направленного на создание оптимальной плотности почвы поля. Мониторинг плотности почвы на поле и является одной из составляющих технологии "точного земледелия".

Постановка вопроса

Имеется большой опыт поисковых работ, направленных на установление корреляционной связи между плотностью и твердостью почвы. Нужно отметить, что на твердость почвы влияет не только ее плотность, но и влажность, которая неравномерно распределяется как по поверхности поля, так и по глубине почвы.

Рассмотрим два способа измерения твердости почвы – позиционный и непрерывный (динамический).

Позиционный способ измерения твердости почвы предусматривает использование приборов типа твердомера (плотномера) Ревякина. В позиционной схеме наконечник пенитрометра движется перпендикулярно поверхности почвы.

Непрерывное (динамическое) измерение твердости почвы является инструментом интенсификации процесса съема информации о состоянии почвы по твердости. Требуется определить особенности непрерывного определения твердости почвы и сопоставить полученные показатели с позиционным измерением твердости почвы.

Кроме динамики, принципиальным отличием является направление движения индентора при непрерывном измерении – параллельно поверхности почвы на измеряемой глубине, а сопротивление является функцией времени – $R(t)$ (или переменная s).



Рис. 1. Радиоизотропный прибор РПП-2

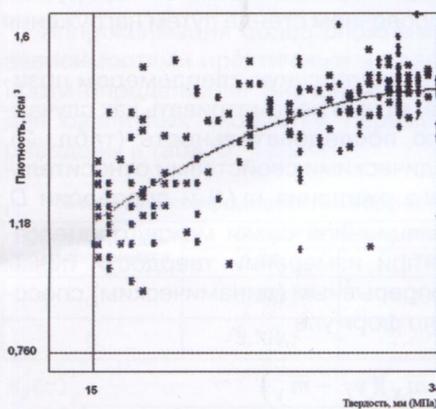


Рис. 2. Поле корреляции "плотность-твердость" в слое 0-30 см

С помощью позиционных измерений плотности и твердости почвы были установлены корреляционные связи между плотностью и твердостью почвы в реальных условиях [4]. Твердость и плотность почвы измерялись в

одних и тех же точках поля на глубине 0-30 см. Твердость почвы измерялась твердомером Ревякина, а плотность почвы – радиоизотропным прибором РПП-2 (рис. 1). Образец поля корреляции представлен на рис. 2.

Измерения проводились осенью (конец августа, начало сентября) на трех фонах основной обработки:

- делянка по пахоте (7 последних лет делянка ежегодно пахалась на глубину 25-30 см);
- делянка по плоскорезной обработке (7 последних лет делянка ежегодно обрабатывалась плоскорезом на глубину 25-30 см);
- делянка с мелкой плоскорезной обработкой (последние 3 года делянка ежегодно обрабатывалась плоскорезом на глубину 10-15 см).

Предшественник – кукуруза на силос.

Полученные значения коэффициентов корреляции и корреляционного отношения приведены в табл. 1.

Анализ полученных данных позволяет сделать

Таблица 1

Значения коэффициентов корреляции и корреляционных отношений "плотность-твердость почвы"

Вид проводимой обработки	Коэффициент корреляции	Корреляционное отношение
Вспашка на глубину 25-30 см (7 лет)	0,74	0,85
Безотвальная обработка почвы на глубину 25-30 см (7 лет)	0,80	0,85
Мелкая плоскорезная обработка на глубину 12-15 см (3 года)	0,59	0,83

вывод, что между плотностью и твердостью почвы существует высокая нелинейная корреляционная связь, так как значения коэффициентов корреляции значительно ниже, чем значения коэффициентов корреляционных отношений.

В качестве уравнений регрессии опробованы 10 уравнений, однако наиболее близким по точности является уравнение в виде полинома второго порядка:

$$\rho = a + bp + cp^2,$$

где ρ – плотность почвы, г/см³; p – твердость почвы, (Н/см², Па); a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Уравнение регрессии имеет вид:

на поле с постоянной вспашкой –

$$\rho = 0,698 + 0,039p - 0,00038p^2;$$

на поле с постоянным глубоким рыхлением –

$$\rho = 0,657 + 0,038p - 0,00062p^2;$$

на поле с постоянным мелким рыхлением –

$$\rho = 0,720 + 0,048p - 0,0080p^2.$$

Обобщенное уравнение регрессии:

$$\rho = 0,692 + 0,042p - 0,0031p^2.$$

Анализ уравнений регрессии показывает, что вычлененные по ним значения плотности отличаются по величине всего на 4-6 %.

Таким образом, следует вывод, что по результатам измерения твердости можно прогнозировать плотность почвы. Но для этого каждый раз до начала и после окончания измерений твердости и плотности почвы на поле необходимо проводить тарировку или сопоставление твердости и её плотности. В случае выпадения осадков во время сбора информации необходимо повторить операции сравнения твердости и плотности почвы.

С точки зрения разработки электронных карт плотности почвы представляет интерес новый прибор SC-900 (рис. 3), позволяющий измерять ультразвуковым датчиком твердость на глубине до 40 см с шагом 2,5 см. Прибор присоединяется к любому GPS-передатчику посредством последовательного выхода. Оснащен встроенной памятью и порталом RS-232, записывает 772 измерения (579 измерений с применением GPS /DGPS опции). Совместим с онлайн картографическим приложением SpesMaps. Тарировка такого прибора радиоизотропным прибором РПП-2 позволит построить электронную карту распределения плотности почвы как по площади поля, так и по глубине.

Однако более полную информацию может дать непрерывное измерение твердости поля с корреляцией по плотности почвы, накладкой координат по GPS и построение электронных карт плотности почвы.

Имеется ряд подходов к конструкции устройств для непрерывного измерения твердости почвы. На рис. 4 представлен твердомер конструкции Самарской сельскохозяйственной академии [5].

В ТГАТА использовалось устройство для определе-



Рис. 3. Прибор для измерения твердости почвы SC-900

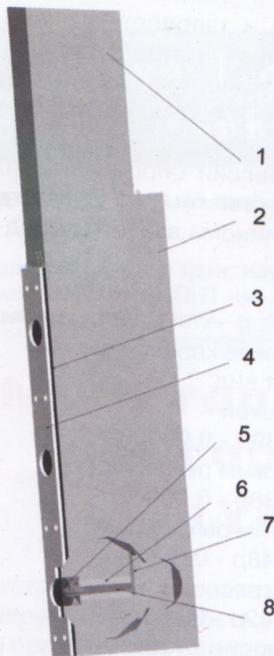


Рис. 4. Общий вид твердомера:

1 – корпус; 2 – задняя крышка; 3 – мембрана; 4 – передняя крышка; 5 – наконечник; 6 – втулка; 7 – тензометрическая балка; 8 – плунжер

результатов эксперимента предусмотрено остационаривание процесса методом фильтрации на ЭВМ. Возникает задача сопоставить значения твердости, полученные позиционным путем, с полученными по непрерывной схеме измерения.

Первый способ предусматривает измерение твердости почвы по традиционной методике при помощи твердомера конструкции Ю. Ю. Ревякина. Измерения проводятся в 50 точках на рабочей глубине до 30 см плунжером 11,3 см, $F = 1 \text{ см}^2$.

Второй способ предусматривает измерение продольной твердости почвы изготовленным для этих целей твердомером конструкции ЛСХИ [6, 7]. Этот твердомер (рис. 5) представляет собой деформатор 1, укрепленный на тензометрической стойке 3 с наклеенными тензорезисторами 4, регистрирующими изгибающий момент. Для разгрузки стойки перед ней установлен нож 2. Деформатор имеет конусовидную

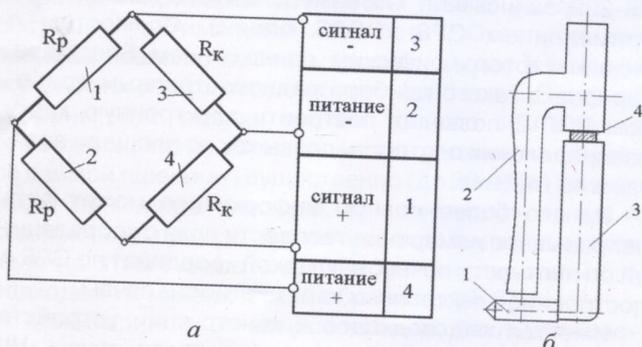


Рис. 5. Схема прибора (а) и схема включения тензорезисторов (б) для измерения продольной твердости почвы: 1 – деформатор ($S = 3 \text{ см}^2$); 2 – нож; 3 – тензометрическая стойка; 4 – тензорезисторы

ния продольной твердости почвы [5, 6], позволяющее непрерывно измерять твердость почвы.

Процесс работы почвообрабатывающего агрегата, а, следовательно, и индентора при непрерывном измерении твердости почвы, как и любой другой динамической системы, начинается с нестационарной стадии. После затухания переходного процесса он переходит в установившийся режим работы, при котором процесс протекает сравнительно однородно и имеет вид непрерывных колебаний вокруг некоторого среднего значения. Для исключения переходного процесса методикой предусмотрено производить запись информации только при достижении агрегатом рабочей скорости. В случае нарушения стационарности процесса, при обработке

Таблица 2
Твердость почвы на глубине 20 см, измеренная твердомером Ревякина (статического действия)

Статистический параметр	Обозначение	Значение
Среднее арифметическое, МПа	\bar{R}	5,719
Среднее квадратическое, МПа	σ_R	0,71
Ошибка среднего арифметического, МПа	$\Delta\bar{R}$	0,1
Точность опыта, %	P	3,3
Коэффициент вариации, %	Y	12,4

форму с площадью поперечного сечения 3 см^2 и углом образующей $22^\circ 30'$. Твердомер крепится на раму плуга таким образом, чтобы деформатор двигался перед носком лемеха. Схема наклейки и включения тензорезисторов приведена на рис. 5. Тарируется твердомер на тарировочном стенде путем нагружения от 0 до 480 Н.

Твердость почвы, измеренную твердомером позиционного действия, можно рассматривать как случайную стационарную последовательность (табл. 2), обладающую эргодическими свойствами относительно математического ожидания $m_y(t)$ и дисперсии D_y [6]. Оценку корреляционной связи между процессами, полученными при измерении твердости почвы позиционным и непрерывным (динамическим) способами, выполняем по формуле

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{m}_x)(y_i - \bar{m}_y)}{(N-1) \cdot \bar{\sigma}_x \cdot \bar{\sigma}_y}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – текущие значения твердости почвы, измеренной позиционным и непрерывным (динамическим) способами; m_x, m_y – математическое ожидание процессов $x(t_i)$ и $y(t_i)$; σ_x, σ_y – среднеквадратическое отклонение процессов $x(t_i)$ и $y(t_i)$.

Приведенная методика апробирована при исследовании динамики взаимодействия корпуса плуга на упругой подвеске с почвой (рис. 6).

Коэффициенты корреляции этих двух процессов находятся в пределах 0,91...0,93. Это дает основание говорить о достаточно тесной их корреляционной связи.

Характер возмущающего воздействия считается известным, если определены статистические характеристики в виде математического ожидания $m_y(t)$,

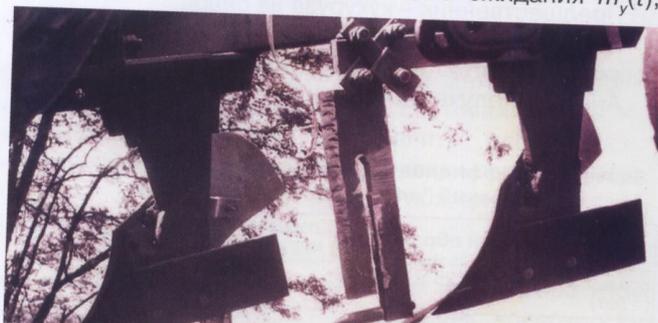


Рис. 6. Устройство для непрерывного определения продольной твердости почвы

корреляционной функции $K_y(\tau)$ и спектральной плотности $S_y(\omega)$. Полученные корреляционные функции и спектральные плотности сопротивления почвы изображены графически на рис. 6. Аппроксимация кривых корреляционной функции дает возможность определять коэффициенты корреляционной связи, которые зависят в основном от физико-механических свойств почвы и от скорости движения агрегата. Аппроксимацией корреляционной функции и спектральной плотности реализаций сопротивления почвы определяют коэффициенты α и β :

$$K_y(\tau) = D_y \exp(-\alpha|\tau|) \cos \beta\tau, \quad (2)$$

$$S_y(\omega) = \frac{2D_y^2}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2\omega^2}. \quad (3)$$

Аппроксимация более сложными аналитическими зависимостями практически не дает повышения точности определения. Значения коэффициентов α и β для различных скоростей перемещения индентора риведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициентов корреляционной связи

Обозначение коэффициента	Скорость движения агрегата V , м/с		
	1,96	1,78	1,6
α	0,230	0,290	0,320
β	3,100	2,295	2,282

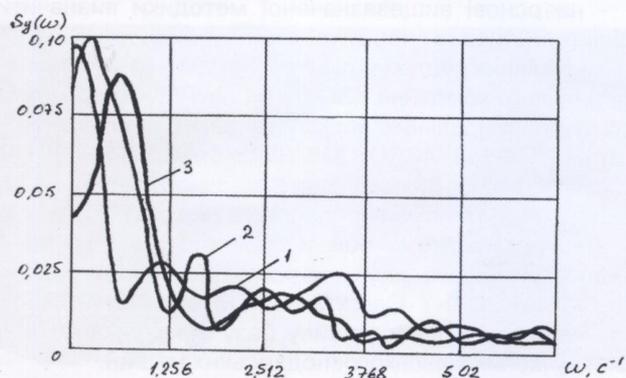
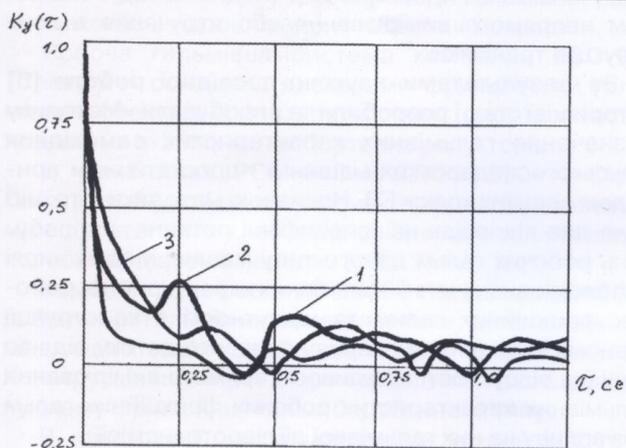


Рис. 7. Корреляционная функция $K_y(\tau)$ и спектральная плотность $S_y(\omega)$ продольной твердости почвы на скоростях движения агрегата: 1 – $V = 1,5$ м/с; 2 – $V = 1,78$ м/с; 3 – $V = 1,96$ м/с

Графики корреляционной функции (рис. 7) указывают на эргодичность процесса, т.к. $K_y(\tau)$ стремится к нулю при $\tau \rightarrow \infty$. Затухание кривых свидетельствует о наличии в процессе, наряду со случайными, скрытых периодических составляющих. Из графиков видно, что процесс изменения сопротивления почвы имеет низкочастотный спектр дисперсии с частотой среза ω_0 до $5,03$ с⁻¹. Поскольку коэффициенты вариации достаточно велики ($v_R = 9,1...9,8\%$), амплитуды колебаний сопротивления почвы также велики, что указывает на сравнительную неоднородность твердости почвы поля, на котором проводилось экспериментальное исследование. С повышением скорости движения V_0 от 1,5 до 1,96 м/с средние значения сопротивления почвы несколько возрастают, спектры дисперсии сдвигаются в сторону увеличения значений ω (табл. 4).

Таблица 4

Значение ширины спектра частот

Параметр	Скорость движения агрегата V_0 , м/с		
	1,96	1,78	1,5
ω_0	0,210	0,628	0,314
$S(\omega_0)$	0,085	0,10	0,09
$\Delta\omega$	11,8	10,0	11,1

Анализируя график спектральной плотности сопротивления почвы, определим ширину спектра частот из выражения [6]:

$$\Delta\omega = 1/S(\omega_0), \quad (4)$$

где ω_0 – частота, при которой спектральная плотность максимальна; $S(\omega_0)$ – значение спектра спектральной плотности при $\omega = \omega_0$.

Процесс считается узкополосным, если его спектральная плотность сосредоточена в сравнительно узком диапазоне частот около ω_0 . Условие узкополосности определяется неравенством [6]

$$\Delta\omega \leq \omega_0. \quad (5)$$

Полученные результаты подтверждают широкополосность процесса, так как во всех случаях ширина спектра значительно больше частоты ω_0 (табл. 4).

Выводы:

1. Экспериментально установлена высокая нелинейная корреляция между твердостью и плотностью почвы при позиционном их измерении при фиксированном состоянии почв.
2. Экспериментально установлена высокая корреляция между позиционным и непрерывным измерением плотности.
3. Вышеуказанные закономерности позволяют обеспечить непрерывное измерение плотности почвы, совместив с определением координат на карте поля с помощью GPS.

Список литературы

1. Кушнарев А.С., Кравчук В.И. Новые научные подходы к выбору способа обработки почвы / Техніка і технології АПК. – №5(8), 2010. – С. 6-11.
2. Жукова О. Точность на полях // О. Жукова,