

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЕМ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО КАТКА

INVESTIGATION OF VISCOELASTIC STATE OF SOIL UNDER THE INFLUENCE OF ACTIVE SURFACE OF THE TILLAGE ROLLER

Ю.А. СЕМЕНИХИНА, к.т.н.

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт
механизации и электрификации сельского хозяйства,
Зерноград, Россия, semenikhina@mail.ru

YU.A. SEMENIKHINA, PhD in Engineering

North-Caucasian Research Institute of Mechanization
and Electrification of Agriculture, Zernograd, Russia,
semenikhina@mail.ru

Универсальные комбинированные почвообрабатывающие агрегаты совмещают несколько технологических операций. Заключительную операцию по обработке почвы выполняет почвообрабатывающий каток, работающий по взрыхленной почве. Равномерное уплотнение подповерхностного слоя способны создавать почвообрабатывающие катки с активной рабочей поверхностью. Поверхность катка, содержащая упругие элементы способствует увеличению вертикальной нагрузки. Предпочтительным считается ударное нагружение, характеризующееся интенсивным воздействием на почву. Преимущество такой конструкции катка заключается в интеграции внешнего нагружения и автоматической настройке на рациональный режим работы. Исследование процесса уплотнения почвы может быть проведено по аналогии с процессом трамбования грунтов. Для исследования процесса уплотнения рыхлой почвы посредством ударного нагружения и отыскания величины уплотненного слоя необходимой плотности предложена модель системы «рабочий орган – элементарный объем почвы». Модель системы включает массу рабочего органа m , массу деформируемого объема почвы M , элемент жесткости почвы C , и элемент вязкости почвы B . Деформируемый сжатием объем почвы представляет собой усеченный конус с высотой h . Изначально возникают сжимающие напряжения в почвенном объеме непосредственно в точках контакта с рабочим органом. Затем мгновенно происходит разрушение крупных комков почвы со смещением (уплотнением) поверхностных частиц. Далее, измельченные частицы почвы передают давление на соседние, вовлекая все больше частиц с боковым расширением. В результате деформации сжатия формируется уплотненный подповерхностный слой требуемой плотности. Предложенная модель может выступать в качестве первого приближения для дальнейших, более детальных и расширенных исследований напряженно-деформированного состояния почвы с возможностью определения зависимостей конструктивных параметров и режимов работы почвообрабатывающего катка.

Ключевые слова: почвообрабатывающий каток, активная поверхность, ударное нагружение, модель системы, уплотненный слой почвы.

Universal combined tillage machines combine several processing steps. The final soil cultivation operation is performed by soil-processing machine, which works on loosened soil. Uniform compaction of the subsurface layer is able to be created by soil cultivating rollers with an active working surface. The surface of the roller, which contains elastic elements, increases the vertical load. The shock loading, characterized by intensive impact on the soil, is considered preferable. The advantage of this roller construction is the integration of external loading and automatic tuning to a rational operating mode. The study of the process of soil compaction can be carried out by analogy with the process of soil compaction. The model of the system includes the mass of the working body m , the mass of the deformed soil volume M , the soil stiffness element C , and the soil viscosity element B . The volume of soil deformed by compression is a truncated cone with a height h . Initially, there are compressive stresses in the soil volume directly at the points of contact with the working body. Then instantly, large clods of soil are destroyed, and the surface particles are displaced (compacted). Further, the crushed soil particles transfer pressure to the neighboring ones, involving more and more particles with lateral expansion. As a result of compression deformation, a compacted subsurface layer of the required density is formed. The proposed model can serve as a first approximation for further, more detailed and expanded studies of the stress-strain state of the soil with the possibility of determining the dependencies of the structural parameters and operating conditions of the soil-working compactor.

Keywords: soil-cultivating roller, active surface, impact loading, system model, compacted soil layer.

Введение

Современные ресурсо- и энергосберегающие технологии производства сельскохозяйственных культур заключаются в интенсификации процесса обработки почвы за счет применения универсальных комбинированных почвообрабатывающих агрегатов, реализовывающих за один проход несколько технологических операций. Совмещение операций сокращает количество задействованной техники и длительность технологического процесса обработки почвы. В комбинированном почвообрабатывающем агрегате заключительную операцию по дроблению крупных почвенных комков с уплотнением подповерхностного слоя и созданием верхнего рыхлого выполняет почвообрабатывающий каток, чаще классифицируемый как каток-борона. В результате этого каток в составе почвообрабатывающего комбинированного агрегата работает по почве, подготовленной рыхлящими рабочими органами (лапами, дисками) агрегата. Рыхлящие рабочие органы (диски, лапы и др.) оставляют после себя рыхлую структуру почвы, которую каток видоизменяет посредством воздействия на пласт в вертикальном направлении [1], тем самым создавая уплотненный подповерхностный слой с верхним мелкокомковатым.

Наиболее равномерное уплотнение подповерхностного слоя способны создавать почвообрабатывающие катки, обладающие активной рабочей поверхностью вследствие наличия в своей конструкции элементов, имеющих дополнительную степень свободы [2, 3], и тем самым способствующие увеличению вертикальной нагрузки. Необходимую активность рабочей поверхности катка обеспечивают упругие рабочие органы.

Из существующих различных видов нагружений, воздействующих на почву, наибольшее распространение получили вибрационные (ударные) [4]. Поскольку ударное нагружение характеризуется интенсивным воздействием, то взрыхленная почва под влиянием вертикальной ударной нагрузки испытывает преимущественно деформацию сжатия, которая ускоряет процесс изменения напряженно-деформированного состояния почвы. Результатом этого изменения является формирование уплотненного подповерхностного слоя. Для достижения наилучшего результата необходимо проанализировать состояние почвы под воздействием вертикальной (ударной) нагрузки,

образуемой именно активной рабочей поверхностью почвообрабатывающего катка.

Цель исследования

Целью исследования является изучение напряженно-деформированного состояния почвы, подвергающегося ударной нагрузке со стороны активной рабочей поверхности почвообрабатывающего катка.

Материалы и методы

Известен каток ударного действия [5], в котором вертикальную нагрузку создает ударный молот, перемещающийся в полый трубе, тем самым воздействуя на подпружиненную трамбовку. В результате вращения катка, когда возникает вертикальное расположение трубы, молот занимает крайнее положение и выводит трамбовку за поперечный габарит поверхности катка, которая в свою очередь оказывает ударное нагружение на почву.

Кроме того, активной рабочей поверхностью обладает вибрационный каток [6], конструкция которого состоит из жестко закрепленного на валу наружного барабана и внутреннего барабана, который связан с наружным через пружины. На рабочую поверхность наружного барабана через технологические отверстия выходят зубья, крепящиеся на внутреннем барабане. При движении катка по поверхности поля происходит рассогласование во вращении между наружным и внутренним барабанами. Под действием силы тяжести пружины деформируются, и внутренний барабан вместе с зубьями перемещается вниз. Возникающая в результате перемещения энергия вибрации передается на наружный барабан, вследствие чего увеличивается давление на почву и улучшается качество уплотнения.

Преимущество подобных конструкций катков заключается в том, что они способны интегрировать внешнее нагружение на обрабатываемую среду (почву) и автоматически настраиваться на рациональный режим работы [7].

Известно [8], что циклические ударные нагрузки успешно используются в процессе трамбования грунтов вибрационными дорожными катками. В нашем случае процесс уплотнения взрыхленной почвы аналогичен процессу трамбования грунтов, за исключением его цикличности. Известно множество моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние грунта, возникающее при обустрой-

стве земляного основания. Однако наиболее близко нашему процессу взаимодействия активной рабочей поверхности почвообрабатывающего катка с рыхлой почвой соответствует модель взаимодействия вязкоупругой среды с рабочим органом трамбователя дорожной машины. Поэтому исследование и расчет напряженно-деформированного состояния почвы может выступать частным случаем основных положений расчета напряженно-деформируемого состояния грунта под воздействием ударных (вибрационных) нагрузок [9].

Согласно ранее проведенным исследованиям Д.И. Золотаревской [10], обработанная рыхлыми рабочими органами комбинированного агрегата почва обладает вязкоупругими свойствами. Исходя из этого, для исследования процесса уплотнения рыхлой почвы посредством воздействия активной рабочей поверхности катка через ударное нагружение рабочим органом и отыскания величины уплотненного слоя необходимой плотности рассмотрим взаимодействие внешней нагрузки с элементарным вязкоупругим объемом почвы. Для удобства расчета воспользуемся приближенной моделью системы «рабочий орган – элементарный объем почвы» (рис. 1) и проанализируем напряженно-деформируемое состояние почвы.

Модель системы включает массу рабочего органа m и массу деформируемого объема почвы M , содержащую в себе элемент жесткости C , имитирующий упругие свойства рыхлой структуры почвы, а также элемент вязкости B , имитирующий вязкие свойства почвы. Деформируемый сжатием объем почвы испытывает мгновенную внешнюю нагрузку и представляет собой усеченный конус с высотой h . Так

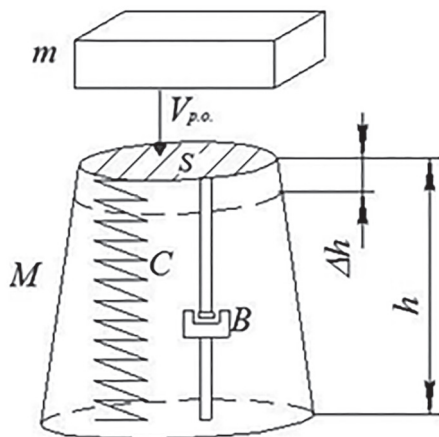


Рис. 1. Модель системы «рабочий орган – элементарный объем почвы»

как изначально возникают сжимающие напряжения в почвенном объеме непосредственно в точках контакта с рабочим органом, то мгновенно происходит разрушение крупных комков почвы со смещением по вертикали (уплотнением) поверхностных частиц. Далее, измельченные частицы почвы передают давление на соседние, вовлекая все больше частиц с боковым расширением.

Результаты и их обсуждение

Представленная модель элементарного объема деформируемой почвы качественно характеризует особенности его динамического состояния – жесткие (упругие) и вязкие свойства, работу вязкоупругих сил деформируемого объема почвы и нарастание его деформации с последующим образованием уплотненного подповерхностного слоя Δh (см. рис.1).

Рабочий орган почвообрабатывающего катка при взаимодействии с почвой обладает кинетической энергией [9], которая тратится на ее уплотнение, расходуясь на преодоление сопротивления вязкоупругих сил.

Суммарную силу сопротивления вязкоупругих сил почвы уплотнению можно представить в виде:

$$F = Ch + B \dot{h},$$

где $C = \frac{ES}{h}$ – жесткость уплотняемого элементарного объема почвы, Н/м; $B = \frac{\mu S}{h}$ – вязкость уплотняемого элементарного объема почвы, Н·с/м; E – модуль упругости, Па; S – площадь контакта рабочего органа с элементарным объемом почвы, м²; h – высота элементарного объема почвы до уплотнения, м; μ – коэффициент вязкости, Па·с.

Работу вязкоупругих сил [9] уплотняемого элементарного объема почвы запишем в виде:

$$A(h) = \int_0^{\Delta h} F dh = \frac{Ch^2}{2} + \int_0^{\Delta h} B \dot{h} dh.$$

Используя интегральную теорему о среднем значении, выразим составляющую работу сил вязкого сопротивления объема почвы через усредненную первую производную величины уплотненного слоя:

$$\int_0^{\Delta h} \dot{h} dh = \Delta h \dot{h}.$$

Следовательно, предполагая движение рабочего органа после соприкосновения и после-

дующего его взаимодействия с элементарным объемом почвы равноускоренным, получим $\dot{h} = \frac{V_c}{2}$, где V_c – скорость движения системы «рабочий орган – элементарный объем почвы».

Принимая условие о «неупругости» удара рабочего органа о почву, определим V_c из закона сохранения импульса $mV_{p.o.} = (m + M)V_c$, из чего следует:

$$V_c = \frac{m}{(m + M)} V_{p.o.},$$

где $V_{p.o.}$ – скорость движения рабочего органа, м/с; m – масса рабочего органа, кг; M – масса уплотняемого элементарного объема почвы, кг.

Тогда работа вязкоупругих сил уплотняемого объема почвы с учетом закона сохранения импульса приобретет следующий вид:

$$A = \frac{C(\Delta h)^2}{2} + B \frac{V_c}{2} \Delta h.$$

Поскольку работа кинетической энергии равна работе, затраченной на уплотнение объема почвы, то уравнение суммы энергий прикладываемой к рассматриваемому объему запишется в следующем виде:

$$\frac{mV_{p.o.}^2}{2} + mg\Delta h + \frac{Mg\Delta h}{2} = \frac{C(\Delta h)^2}{2} + B \frac{V_c}{2} \Delta h.$$

В окончательном виде уравнение для определения величины уплотненного слоя выглядит следующим образом:

$$\frac{C}{2}(\Delta h)^2 + \left(B \frac{V_c}{2} - \left(m + \frac{M}{2} \right) g \right) \Delta h - \frac{mV_{p.o.}^2}{2} = 0.$$

Его итоговое решение:

$$\Delta h = \frac{(m + M)g - B \frac{V_c}{2} + \sqrt{\left(B \frac{V_c}{2} - \left(m + \frac{M}{2} \right) g \right)^2 - CmV_{p.o.}^2}}{C}.$$

Изменение величины уплотненного слоя сопровождается приращением плотности почвы, которая рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0},$$

где ρ_k – конечная плотность слоя почвы, полученная под воздействием внешней нагрузки, г/см³; ρ_0 – начальная плотность почвы, г/см³.

Для достижения требуемой плотности почвы, согласно АТТ, предъявляемой к поверхностной обработке ($\rho_k = 1,1 \dots 1,3$ г/см³), после прохождения комбинированного агрегата оснащенного катком с активной рабочей поверхностью, необходимо задаться краевыми условиями деформирования почвы:

$$\frac{\rho_0}{\rho_k} = 1 - \frac{\Delta h}{h},$$

что будет соответствовать технологическому процессу прикатывания, согласно которого каток уплотняет подповерхностный слой и рыхлит верхний слой почвы до 10 см, выравнивая поверхность поля за счет разрушения глыб и крупных комков.

Выводы

1. Предложена модель системы «рабочий орган – элементарный объем почвы», на основе которой проведено исследование деформируемого рыхлого вязкоупругого объема почвы, подвергающегося ударной нагрузке со стороны активной рабочей поверхности почвообрабатывающего катка.

2. Данная модель может выступать в качестве первого приближения для дальнейших, более детальных и расширенных исследований напряженно-деформированного состояния структуры почвы с возможностью определения зависимостей конструктивных параметров и режимов работы почвообрабатывающего катка.

Литература

1. Золотаревская Д.И. Взаимосвязь различных математических моделей деформирования почв // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. № 5. С. 10–16.
2. Семенихина Ю.А. Использование дополнительных элементов в ротационных прикатывающих устройствах // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4 (14). С. 157–162.
3. Пархоменко Г.Г., Семенихина Ю.А. Инновационный метод разработки ротационных рабочих органов для обработки почвы в засушливых условиях // Техническое кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве (Часть I): материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 23–24 октября 2014 г.) Минск: БГАТУ, 2014. С. 247–249.
4. Семенихина Ю.А. Анализ ротационных устройств для выравнивания и уплотнения почвы //

Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2 (12). С. 154–158.

5. Очинский В.В., Кожухов А.А., Искендеров Р.Д., Братчиков М.Ю. Каток ударного действия: патент на изобретение № 2382537, Российская Федерация. Опубликовано 27.02.2010.
6. Шапарь М.С. Совершенствование процесса прикатывания почвы под сою виброкатком в условиях Приморского края: дис. ... канд. техн. наук. Благовещенск, 2015. 137 с.
7. Пархоменко Г.Г., Щилов В.Н. Расчет взаимодействия катка с почвой с использованием теории вязкоупругости // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 10. С. 16–18.
8. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.
9. Савельев С.В., Михеев В.В. Исследование деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении // Вестник СибАДИ. 2012. № 4 (26). С. 100–103.
10. Золотаревская Д.И. Исследование и расчет уплотнения почвы при работе и после остановки колесного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 33–38.

References

1. Zolotarevskaya D.I. Interrelation of various mathematical models of soil deformation. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1983. No 5, pp. 10–16 (in Russ.).
2. Semenikhina Yu.A. Use of additional elements in rotary stacking devices. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015. No 4 (14), pp. 157–162 (in Russ.).
3. Parkhomenko G.G., Semenikhina Yu.A. Innovative method of developing rotational working tools for soil cultivation in arid conditions. *Tekhnicheskoe kadrovoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve (Chast' I): ma-*

terialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Minsk, 23–24 oktyabrya 2014 g.) [Technical staffing of innovative technologies in agriculture (Part I): materials of the International Scientific and Practical Conference (Minsk, October 23–24, 2014)] Minsk: BGATU Publ., 2014, pp. 247–249 (in Russ.).

4. Semenikhina Yu.A. Analysis of rotary devices for soil leveling and compaction. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015. No 2(12), pp. 154–158 (in Russ.).
5. Ochinskiy V.V., Kozhukhov A.A., Iskenderov R.D., Bratchikov M.Yu. Katok udarnogo deystviya [Impact roller]: patent na izobretenie No 2382537, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 27.02.2010.
6. Shapar' M.S. Sovershenstvovanie protsessa prikatyvaniya pochvy pod soyu vibrokatom v usloviyakh Primorskogo kraia: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the process of consolidation of the soil under soybean vibratory rollers in the conditions of Primorye Territory: dissertation for Degree of Candidate of Technical Sciences]. Blagoveshchensk, 2015. 137 p.
7. Parkhomenko G.G., Shchirov V.N. Calculation of the interaction of the roller with soil using the theory of viscoelasticity. *Traktory i sel'skokhozyaystvennye mashiny*. 2007. No 10, pp. 16–18 (in Russ.).
8. Kharkhuta N.Ya. Mashiny dlya uplotneniya gruntov [Machines for soil compaction]. Leningrad: Mashinostroenie, 1973. 176 p.
9. Savel'ev S.V., Mikheev V.V. Investigation of deformation of an elasto-viscous medium under impact loading. *Vestnik SibADI*. 2012. No 4 (26), pp. 100–103 (in Russ.).
10. Zolotarevskaya D.I. Investigation and calculation of soil compaction during operation and after wheel tractor stoppage. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 8, pp. 33–38 (in Russ.).