

УДК 631.31

В.И. Ветохин, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

К теории почвообрабатывающего клина

Работа посвящена разработке моделей взаимодействия почвы и клина. Предложена модель деформаций и напряжений в пласте почвы, учитывающая образование промежуточного тела из уплотненной почвы, и отображающая механизм преобразования локального сжатия почвы клином в растяжение объема пласта.

обработка почвы, модель взаимодействия почвы и клина, расчетная схема, деформации растяжения и сжатия

Постановка проблемы. Качество и энергоемкость механической обработки почвы в значительной степени определяется формой и параметрами рабочих органов орудий, основой которых является клин. Возможность совершенствования рабочих органов зависит от уровня соответствия теоретических моделей и реальных процессов взаимодействия орудия с пластом почвы. Поэтому развитие теории клина является важной и актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы совершенствования рабочих органов орудий для обработки почвы на основе моделирования процесса взаимодействия клина с почвой занимались многие исследователи.

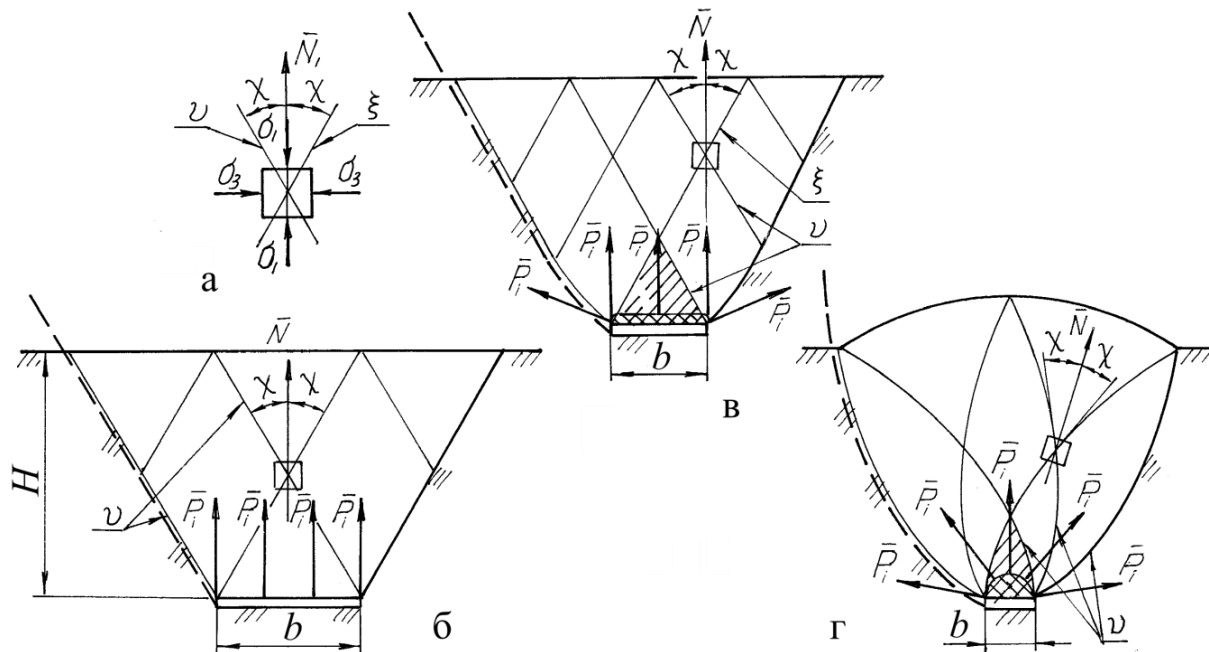
Основы теории почвообрабатывающего клина были заложены В.П. Горячкиным.

В.П. Горячкин обращал внимание на то, что: «... клин действует на обрабатываемый материал очень разнообразно, но сущность работы его заключается не в разрезании лезвием, как обычно принято думать, а в сжимании частиц, которое простирается на более или менее значительное протяжение, после чего образуется трещина ...» [1, с. 169]. В.П. Горячкин также писал: «Вначале клин сминает площадку, а затем образуется трещина ...» [2, с. 242-243]. В этих формулировках, по сути, заложено описание двух стадий процесса стружкообразования – начального пластического деформирования и последующего хрупкообразного разрушения. Современные исследования подтвердили и уточнили эту картину.

Г.Н. Синеоков подробно изучил вопрос стружкообразования при резании клином [3, 4]. Г.Н. Синеоков выделил в сопротивлении почвообрабатывающего клина несколько составляющих и особо отмечал энергоемкое сопротивление внедрению кромки клина в почву, связанное со сжатием и пластическим деформированием почвы.

Предложенные В.П. Горячкиным и Г.Н. Синеоковым модели циклического образования элементов стружки под действием клина используются многими исследователями по настоящее время. Например, модель, подобная модели Г.Н. Синеокова [4, с. 51], использована В.Н. Щириным и Г.Г. Пархоменко при исследовании параметров долото-ножевидного рабочего органа [5]. Однако в предлагаемых моделях не учитывается наличие первой стадии деформации почвы, различие в функционировании долотовидного и ножевидного клина, реальное соотношение высоты клина и глубины обработки, а сами модели строятся из предположения, что ширина клина настолько велика, что «краевыми эффектами» можно пренебречь. Таким образом, во многих случаях, процессы рассматриваются на моделях, построенных для продольно-вертикального сечения пласта, а процесс считается не зависимым от относительной ширины деформатора - клина.

Ранее нами предложены модели крошения почвы с учетом различной ширины клиновидного деформатора b по отношению к глубине обработки H , и наличия пластической стадии деформации почвы (рис. 1) [6]. Однако расчетной схемы процесса дано не было



а – элементарных поверхностей сдвигов ξ , ν и главных напряжений σ_1 и σ_3 ; б, в, г – под действием рыхлительных элементов различной относительной ширины b/H

Рисунок 1 - Схемы образования поверхностей сдвигов в пласте почвы под действием рыхлительных элементов различной ширины b по отношению к глубине обработки H [6]:

Формулировка целей статьи. Цель данного исследования – рассмотреть процесс стружкообразования и крошения почвы под действием клина, и предложить расчетную схему деформаций и напряжений в пласте с учетом реальных явлений при работе клиновидного рыхлителя.

Основная часть. При взаимодействии с рабочим органом, в пласте почвы образуется две зоны в различном деформированном состоянии. Почва, в зоне непосредственно прилегающей к рабочей поверхности, испытывает переуплотнение и переходит в пластичное состояние. При работе глубокорыхлителей размер зоны уплотненной долотом почвы достигает $0,25 \div 0,33$ глубины обработки H . Форму и размер этой зоны можно зафиксировать при внезапной остановке орудия (рис. 2). В борозде после прохода орудия указанная зоны выделяется как распыленная часть пласта.

Крошение почвы второй зоны - вокруг тела из переуплотненной почвы, носит характер хрупкообразного разрушения с признаками растяжения пласта и расширением трещин. Об этом свидетельствует характер сложения пласта, зачастую с явно выраженными промежутками между элементами пласта почвы (рис. 3).

Образование двух зон в пласте почвы в различном напряженно-деформированном состоянии соответствует общим закономерностям деформации при взаимодействии тел. Обобщенные результаты исследований по механике упругопластического контактного взаимодействия показывают, что: «... смещения под поверхностью (контакта) примерно радиальны по отношению к точке начального контакта, а поверхности равных деформаций имеют примерно полусферическую форму» [8, с. 200].

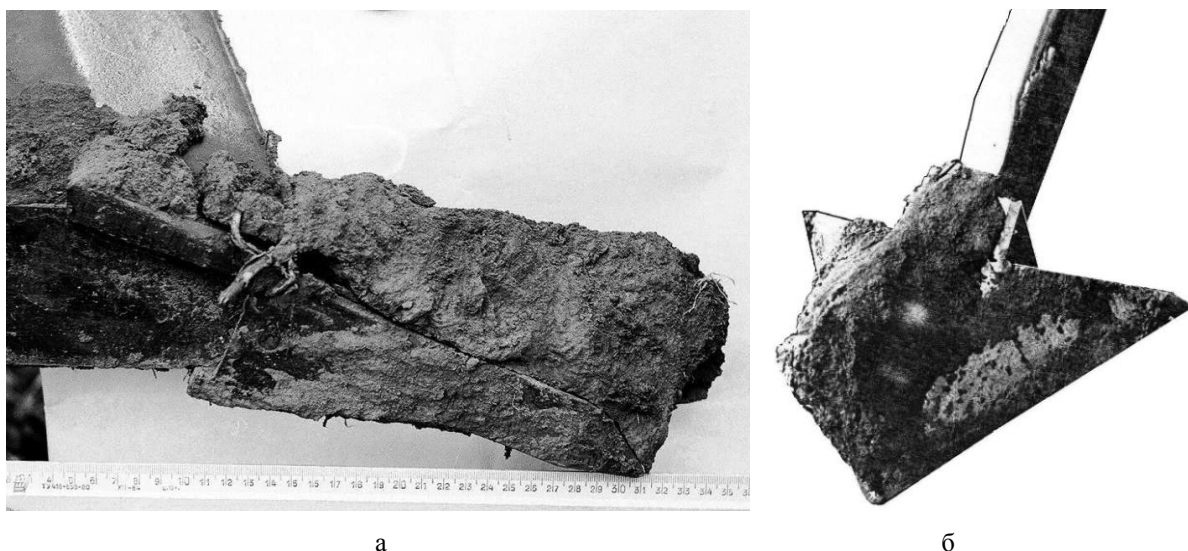


Рисунок 2 - Вид тела из переуплотненной почвы на рабочей поверхности долота (а) и лапы чизельного плуга (б) [7]



Рис. 3. Вид характера крошения почвы рабочими органами плуга-рыхлителя (а) и чизельного плуга (б) [7]

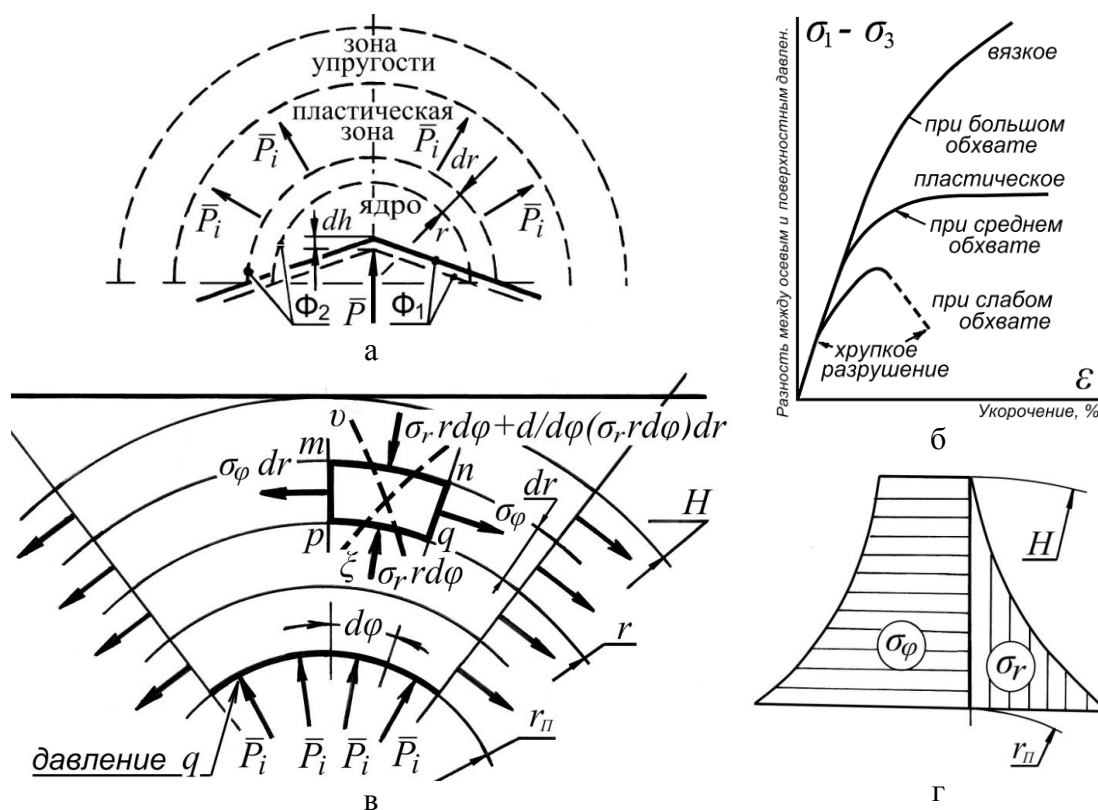
А также: «... поверхность контакта охватывается полусферическим «ядром» радиуса a . Внутри ядра предполагается наличие гидростатического напряженного состояния интенсивностью $\bar{p}$. Гидростатическое давление в ядре равно радиальной компоненте напряжения во внешности (на внешней границе ядра)» [8, с. 200]. Эти выводы совпадают с данными А.Н. Зеленина, полученными при исследовании деформации почвы [9].

С.А. Сидоров [10, с. 29] в результате исследования долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин пришел к следующим выводам: «Удельные давления, действующие на изнашиваемую кромку рабочего органа, относительно постоянны и зависят, в основном, от почвенных условий

и режимов работы, и практически не зависят от геометрии лезвия (или параметров его затупления), в отличие от общих нагрузок, на величины которых существенное влияние оказывает геометрия лезвия.

Это обусловлено тем, что на лезвии почвообрабатывающего рабочего органа циклически возникает «почвенное уплотненное ядро», которое изменяет свою форму, размеры, физическое состояние и месторасположение на кромке, при соответствующем изменении геометрии лезвия (в частности при его затуплении), что является одной из главных причин ухудшения агротехнических и силовых показателей орудия».

Эти и другие данные позволили нам сделать следующий вывод [11, с. 248]: тело из уплотненной почвы, как посредник, передает нагрузку от рабочего органа Φ_1 к остальной части пласта, а его внешняя граница Φ_2 становится фактической рабочей поверхностью для остального объема слоя почвы (рис. 4 а). Тело - посредник существенно корректирует исходную форму Φ_1 рабочего органа и изменяет картину крошения пласта почвы, что определяет характер и энергоемкость процессов.



а - схема образования двух зон деформаций в пласте почвы; б - диаграмма деформированного состояния почвы по В.П. Горячкину [12, с.116]; в - схема нагружения пласта почвы в поперечном сечении; г - эпюры тангенциальных σ_ϕ (растяжения) и радиальных σ_r (сжатия) напряжений

Рисунок 4 - Модель деформирования пласта почвы:

При этом проявляется способность почвы деформироваться хрупкообразно или пластически в зависимости от напряженного состояния (рис. 4 б) [12, с.116].

Тело из уплотненной почвы передает давление q гидростатическим образом, т.е. равномерно во все стороны. Вышерасположенный слой почвы будет нагружен системой сил $\bar{P}_i$, ориентированных в радиальных направлениях (рис. 4 в). В дальнейших выкладках используем подход, изложенный в [13, с. 318-326].

Введем цилиндрические координаты z, r, φ (направление Z совпадает с направлением движения рабочего органа), и выделим элемент пласта почвы с измерениями $dz, dr, r d\varphi$ (см. рис. 4 в).

Уравнение равновесия элемента слоя почвы будет иметь вид

$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r d\varphi) dr - 2\sigma_\varphi dr \frac{d\varphi}{2} = 0.$$

После сокращения дифференциалов и преобразования получим

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (1)$$

Относительная деформация ε_φ элемента pq равняется (рис.5)

$$\varepsilon_\varphi = \frac{p'q' - pq}{pq} = \frac{u}{r}. \quad (2)$$

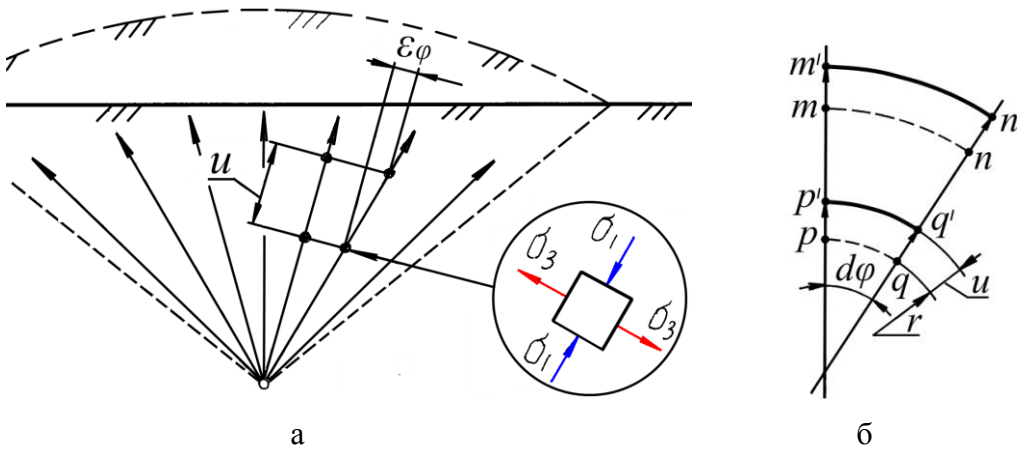


Рисунок 5 - Схема к определению деформации пласта почвы

Точка m в результате деформации в радиальном направлении занимает положение m' , а ее перемещение mm' равняется

$$\varepsilon_r = \frac{p'm' - pm}{pm} = \frac{m'm - pp}{pm} = \frac{du}{dr}. \quad (3)$$

Угловая ε_φ и радиальная ε_r деформации выражаются через одну и одну и ту же функцию $u(r)$ и, таким образом, связаны через уравнения совместности деформаций. Умножив зависимость (3) на r , выполнив дифференцирование и вычитая $\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$, получим

$$\frac{d}{dr}(r \varepsilon_\varphi) - \varepsilon_r = 0. \quad (4)$$

Или в другом виде уравнения совместности деформаций

$$\frac{d\varepsilon_{\varphi}}{dr} + \frac{\varepsilon_{\varphi} - \varepsilon_r}{r} = 0. \quad (5)$$

Уравнение деформаций для координат z, r, φ

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_{\varphi} + \sigma_z)], \\ \varepsilon_{\varphi} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\varphi} - \nu(\sigma_z + \sigma_r)], \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_{\varphi})]. \end{aligned}$$

Подставив зависимость для σ_z в первое и второе уравнения системы, получим

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu \sigma_{\varphi} - \nu E \varepsilon_z - \varepsilon^2 (\sigma_r + \sigma_{\varphi})] = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{\varphi} \right] - \nu \varepsilon_z \quad (6)$$

и

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_{\varphi} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right] - \nu \varepsilon_z. \quad (6')$$

С учетом условия тождественности для уравнения равновесия (4), а именно

$$\sigma_r = \frac{1}{r} F, \quad \sigma_{\varphi} = \frac{dF}{dr} = F',$$

зависимости (6) и (6') примут вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1-\nu^2}{E} \left[\frac{F}{r} - \frac{\nu}{1-\nu} F' \right] - \nu \varepsilon_z \\ \varepsilon_{\varphi} &= \frac{1-\nu^2}{E} \left[F' - \frac{\nu}{1-\nu} \frac{F}{r} \right] - \nu \varepsilon_z \end{aligned} \quad (7)$$

Внесем выражения ε_r и ε_{φ} по формулам (7) в уравнение совместности деформаций (5) и после сокращений получим

$$F'' + \frac{F'}{r} - \frac{F}{r^2} = 0. \quad (8)$$

Выполнив преобразование и учтя предельные условия, получим

$$\sigma_r = q \frac{r_{\Pi}^2}{H^2 - r_{\Pi}^2} \left(1 - \frac{H^2}{r^2} \right), \quad \sigma_{\varphi} = q \frac{r_{\Pi}^2}{H^2 - r_{\Pi}^2} \left(1 + \frac{H^2}{r^2} \right). \quad (9)$$

Распределение напряжений согласно зависимостям (9) показано на рис. 4 г.

Для применения теории Кулона-Мора, которая, по мнению В.П. Горячкина, наиболее отражает свойства почвы, необходимо установить соответствие напряжений σ_{φ} и σ_r минимальному и максимальному главным напряжениям σ_1 и σ_3 . То есть должно

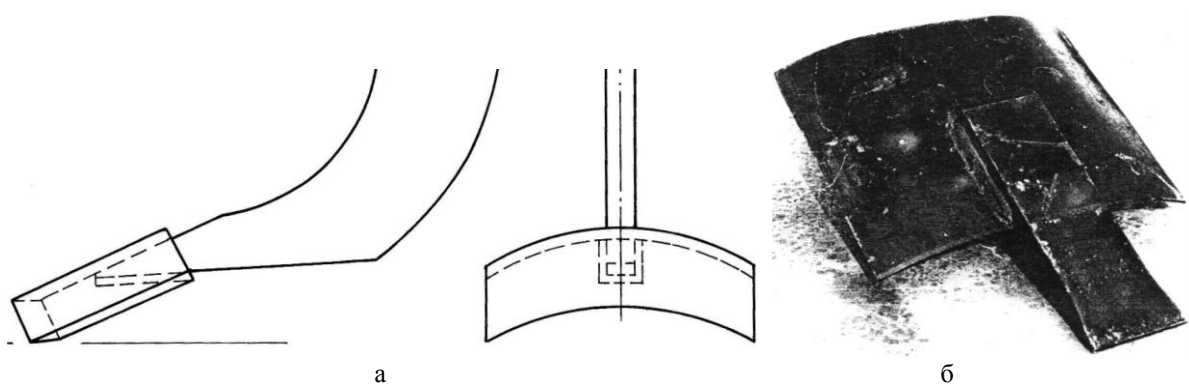
выполняются условие $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\phi$ (с учетом знака). Для этого необходимо оценить значение сил и напряжений вдоль оси Z .

Значения сил и напряжений вдоль оси Z в рассматриваемом сечении (см. рис. 4 в), будут определяться характером деформаций внутри тела из переуплотненной почвы и на его внешней границе. Как показано выше характер этих деформаций соответствует пластическому течению. В некотором приближении можно считать, что сила P_z вдоль оси Z соотносится с радиальной силой P_r следующим образом: $P_z \geq f_{\text{вн}} P_r$, где $f_{\text{вн}}$ - коэффициент внутреннего трения почвы. Поскольку $f_{\text{вн}}$ существенно меньше единицы [13, с.78-80] будет выполняться условие $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\phi$.

Значение напряжения растяжения σ_ϕ согласно зависимостям (9) превосходит значение радиальных напряжений сжатия σ_r по всей толщине деформируемого слоя (см. рис. 4 г). С учетом особенности свойств почвы - меньшей прочности на растяжение, чем на сжатие, крошение будет происходить вследствие деформаций растяжений и сдвигов, что соответствует реальной картине (см. рис. 3).

Описанные процессы соответствуют функционированию рыхлительного элемента выпуклого в поперечном сечении профиля, либо при относительной ширине деформатора b/H , обеспечивающей образование выпуклой формы тела из переуплотненной почвы на рабочей поверхности. Последнее условие обеспечивается долотовидными рыхлителями, имеющими более низкую энергоемкость, чем ножевидные.

Сокращение объема пластических деформаций может быть достигнуто также выполнением формы рыхлительного элемента подобно форме границы уплотненной зоны в почве, как это реализовано в лапе чизельного плуга-глубококорыхлителя [15] (рис. 6).



а – теоретическая поверхность по а.с. 1442093 [15]; б - вид серийного образца

Рисунок 6 – Рыхлительный элемент - лапа чизельного плуга-глубококорыхлителя

Выводы. Особенность механики деформирования пласта почвы клином состоит в образовании на его рабочей поверхности тела из переуплотненной почвы выпуклой формы, дальнейшем преобразовании деформации сжатия в близлежащему к клину объеме почвы, в деформации растяжения и сдвигов в остальном объеме пласта и, как следствие, крошение почвы. При этом проявляются свойства почвы - меньшая прочность на растяжение, чем на сжатие, и способность почвы находиться в хрупкообразном или пластическом деформированном состоянии в зависимости от напряженного состояния.

Дальнейшие исследования данного направления необходимо посвятить оценке соотношения зон пластических и хрупкообразных деформаций в пласте почвы в зависимости от различных параметров клина, режимов работы и состоянии почвы.

Список литературы

1. Горячкин В.П. Основы теории земледельческих машин и орудий. Общая теория орудий / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 7 т. - М.: Сельхозгиз, 1937. - Т.2. - С. 161-181.
2. Горячкин, В.П. О физико-механических и агротехнических свойствах почвы / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 7 т. - М.: Сельхозгиз, 1940. Т.4. - С. 237-246.
3. Синеоков Г.Н. Сопротивления почвы, возникающие при ее обработке: Дис. ... д-ра техн. наук / Г.Н. Синеоков // АН СССР, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. - М., 1954. - Т.1. - 166 с.; Т.2. - 139 с.
4. Синеоков Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. - М.: «Машиностроение», - 1977. - 328 с.
5. Щириков В.Н. Обоснование параметров комбинированного почвообрабатывающего агрегата нового поколения для глубокой безотвальной послойной обработки почвы [Электронный ресурс] / В.Н. Щириков, Г.Г. Пархоменко // Проблемы современной аграрной науки: Материалы международной заочной научной конференции 15 октября 2008 г. - Красноярск: Красноярский ГАУ. Режим доступа: <http://www.kgau.ru/img/konferenc/49.doc>
6. Ветохин В.И. Метод проектирования безотвальных рабочих органов / В.И. Ветохин // Тракторы и с.-х. машины. - 1993. - № 9. - С. 17-19.
7. Ветохин В.И. Системные и физико-механические основы проектирования рыхлителей почвы: Дис. ... д-ра техн. наук: / В.И. Ветохин; НТУУ «Киевский политехнический институт», ОАО «ВИСХОМ». - К.-М., 2010. - 284 с.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. / К.Л. Джонсон. - М.: Мир, 1989. - 510 с.
9. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н.Зеленин: изд-е 2-е. - М.: Машиностроение, 1968.- 375 с.
10. Сидоров С.А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. спец 05.20.01, 05.21.01 / С.А. Сидоров. - М.: ОАО «ВИСХОМ», 2007. - 33 с.
11. Ветохин В.И. К вопросу разработки системной модели крошения пласта почвы / В.И. Ветохин // Праці ТДАТУ – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. - Вип.10, - Т.7. – С.245-252.
12. Горячкин В.П. Общая теория орудий. Картина разрушения материалов / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 7 т. - М.: Сельхозгиз, 1948. - Т.6. - С. 115-120.
13. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. - М.: Физматгиз, 1962. - 456 с.
14. Панов И.М. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. - К.: Феникс, 2008.- 266 с.
15. А.с. 1442093 СССР, МКИ А 01 В 13/08. Рабочий орган для безотвальной обработки почвы / И.М. Панов, Ю.А. Кузнецов, В.И. Ветохин, В.И. Корabelьский, З.Г. Сонис, Л.И. Ройтберг. - № 3737841/30-15; Заявл. 04.05.84; Опубл. 07.12.88. Бюл. № 45.

В.Ветохин

До теорії ґрунтообробного клину

Робота присвячена розробці моделей взаємодії ґрунту з клином. Запропоновано модель розподілу деформацій і напруг у шарі ґрунту, що враховує утворення проміжного тіла з ущільненого ґрунту і відображає механізм перетворення локального стиску ґрунту клином у розтягання об'єму скиби.

V.Vetochin

The theory of tilling the wedge

The work is devoted to the development of the models of the interaction of a soil and a wedge. The model of deformation and stress in the soil layer, taking into account the formation of the intermediate body from the tight soil, as well as representing the mechanism of the conversion of the local soil compression by the help of the wedge into the extension of the layer volume was introduced in this paper.

Получено 10.10.11