

**ФГБОУ ВО**  
**«Брянский государственный аграрный университет»**

**С.И. Старовойтов**  
**Н.М. Белоус**  
**В.Е. Ториков**  
**А.М. Гринь**  
**Н.П. Старовойтова**

**Технологические и теоретические аспекты  
почворезущих рабочих органов**

**Учебно-методическое пособие**

**БРЯНСК – 2017**

УДК 631.31(07)

ББК 40.72

Т 38

**ISBN 978-5-88517-292-9**

Технологические и теоретические аспекты почворезущих рабочих органов: учебно-методическое пособие /С.И. Старовойтов, Н.М. Белоус, В.Е. Ториков, А.М. Гринь, Н.П. Старовойтова. – Брянск: Издательство Брянского ГАУ, 2017. - 93 с.

В учебно-методическом пособии приводятся основные физико-технологические показатели почвы, используемые в теоретических моделях, описывающих взаимодействие почворезущих рабочих органов со средой. Рассмотрены конструктивные особенности рабочих органов и направления их модернизации. В частности, анализируются вопросы снижения энергоемкости, повышения надежности, расширения функциональных возможностей за счет совмещения технологических операций. Представлены элементы теории почворезущих рабочих органов.

Учебно-методическое пособие может быть полезно для специалистов АПК, преподавателей, сотрудников, студентов, магистров и аспирантов.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве инженерно-технологического института В.П. Лапик;

профессор кафедры агрохимии, почвоведения и экологии Брянского ГАУ, к. с.-х. наук В.В. Осмоловский.

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического института, протокол №12 от 31 августа 2017 года.

**ISBN 978-5-88517-292-9**

© Брянский ГАУ, 2017

© Коллектив авторов, 2017

## Содержание

	стр.
Введение.....	4
1. Почва как среда.....	7
1.1 Идеальные модели почвы.....	7
2. Физико-технологические показатели почвы.....	8
2.1 Модуль упругости первого рода.....	8
2.2 Коэффициент динамической вязкости.....	10
2.3 Коэффициент сопротивления деформации.....	11
2.4 Коэффициент Пуассона.....	13
2.5 Упругая составляющая относительной деформации сжатия.....	16
2.6 Предел прочности почвы на сжатие.....	16
2.7 Предел прочности почвы на растяжение.....	18
2.8 Коэффициент внешнего трения.....	20
2.9 Коэффициент внутреннего трения.....	24
2.10 Твердость почвы.....	25
2.11 Влажность почвы.....	26
3. Конструктивные особенности почворезущих рабочих органов...	28
3.1 Плужные корпуса.....	28
3.2 Дисковые рабочие органы.....	33
3.3 Рабочие органы культиваторов.....	35
4. Элементы теории почворезущих рабочих органов.....	39
4.1 Элементы теории клина.....	40
4.2 Тяговое сопротивление В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Си- неокова, В.В. Кацыгина.....	45
4.3 Тяговое сопротивление А.Т. Вагина.....	48
4.4 Элементы теории сферического диска.....	52
4.5 Элементы теории рыхлителей.....	56
4.6 Теоретические аспекты крошения почвенного пласта.....	60
5. Заключение.....	66
6. Список литературы.....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Для сохранения продовольственной безопасности страны нужно обеспечить производство достаточного количества продуктов сельского хозяйства [83] при условии применения интенсивных и высокоинтенсивных технологий [39, 107]. Переход к устойчивому развитию сельского хозяйства предусматривает как один из вопросов рациональное использование машин и орудий [231] с учетом полного соответствия технических средств требованиям отдельных технологических операций [64] на основе повышения производительности работ [65, 220] в оптимальные агротехнические сроки [40].

Обработка почвы, являясь важнейшим звеном в системе агротехнических мероприятий, направленных на поддержание плодородия и производство продуктов растениеводства [110], остается самой востребованной операцией в производстве сельскохозяйственных культур [81, 82, 232, 104, 105, 106]. Планируется довести ежегодную обработку пашни в севообороте до 90 млн. га [50]. Совершенствование машин для обработки почвы проходит в направлении экономии топлива [36] и повышения технологической надежности приемов обработки с учетом почвенно - климатических условий [101, 229]. Интенсификация режимов работы машин [108] требует более глубокого изучения закономерностей протекания технологических [24] и энергетических процессов, имеющих место при нормальном функционировании машин. Поэтому возникает потребность учета внутренних структур процессов, что требует более полного их математического описания и решения ряда сложных вопросов, связанных с условиями работы машин [93, 94, 95, 96, 97, 98].

В теоретических и экспериментальных исследованиях объектом обработки является почва [2]. Свойства почвы и принятая технология ее обработки - решающие факторы при определении конструктивных форм и параметров рабочих органов [193]. Известный советский ученый М.Х. Пигулевский считал изучение физико - механических свойств почвы, от которых зависит качественное выполнение механизированных работ [4], одной из важнейших проблем почвенной науки [11].

Существуют различные физические модели почв. В зависимости от физического состояния почва может быть отнесена к упругим, упруго - вязким, пластичным средам, которые могут быть представлены моделью Пойтинга - Томсона, Барджерса, Фойгта. В данных моделях отражено различное сочетание упругих, вязких и пластичных свойств, количественное содержание которых зависит от гранулометрического состава и содержания влаги. Упругие свойства можно охарактеризовать модулем упругости первого рода  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ . Вязкие свойства почвы представляются коэффициентом динамической вязкости  $\eta$ . Пластичные - углами внешнего и внутреннего трения. Величина модуля упругости первого рода, коэффициента динамической вязкости и Пуассона для суглинистых почв Брянской области изучены слабо, экспериментальных данных имеется немного, причем эти данные, вследствие различия в методах определения, не всегда сопоставимы.

Одной из самых энергоемких операций в производстве сельскохозяйственных культур является вспашка [43, 120, 118, 119, 228, 59]. На ее долю приходится до 40% всех энергоресурсов, используемых в растениеводстве. И, тем не менее, роль вспашки резко возрастает в связи с тем, что отвальная обработка почвы служит основой экологически безопасных технологий, позволяющих существенно сократить применение химических средств защиты и минеральных удобрений [43, 195]. Энергозатратным элементом лемешно - отвальной поверхности [46] плужного корпуса плуга является лемех. Попытки снижения энергоемкости его работы различны: от подвода в зону резания жидких минеральных удобрений [234], колебания плужного корпуса вдоль направления движения почвообрабатывающего орудия или лезвия, вокруг стойки [168, 209], формоизменения геометрии лемеха. К наиболее перспективным, с точки зрения технической реализации методам, следует отнести формоизменение геометрии лемеха. Формоизменение заключается или в применении переменного угла резания для всей поверхности лемеха при постоянном угле наклона лезвия к стенке борозды, или трансформации лезвия фрагментированной части режущей кромки в сторону лицевой поверхности отвала. В случае преобладания работы лемеха в режиме излома пласта при

вспашке целесообразнее использовать трансформацию лезвия режущей кромки. Результатом теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении является определение целесообразного угла трансформации лезвия лемеха с учетом работы на суглинистых почвах Брянской области.

К востребованным операциям по обработке почвы Брянской области относятся дискование с применением гладких, вырезных сферических дисков и культивация с использованием стрелчатых, рыхлительных долотообразных почворежущих рабочих органов. Снижение же энергоемкости при дисковании вырезными дисками возможно при трансформации внешней режущей кромки сегмента в сторону вогнутой поверхности диска. Снижение энергоемкости при работе стрелчатых лап возможно также за счет реализации переменного угла крошения и трансформации лезвия крыла лапы, при этом режущая кромка будет воздействовать на почвенный пласт в режиме смятия и растяжения, а поверхность крыла деформировать его за счет напряжений косоугольного изгиба и кручения.

Повышение технологической надежности почворежущих рабочих органов, в частности при дисковании и рыхлении долотообразными лапами, заключается в обеспечении устойчивого скольжения пласта при его подъеме по криволинейной поверхности. Для рыхлительных лап данная поверхность линейная, для дисковых рабочих органов - пространственная. Возможность подъема пласта по криволинейной поверхности диска должна быть реализована с учетом его диаметра и глубины хода, угла атаки на почвах почв с различным гранулометрическим составом и абсолютной влажностью. Возможность подъема пласта по криволинейной поверхности рыхлительной лапы должна быть реализована с учетом заданной глубины хода при работе на почвах с различным гранулометрическим составом.

Результатом обработки почвы является ее крошение в пределах поверхностного слоя. Возможность крошения почвы напрямую связана с величиной накопленной пластом потенциальной энергии. Подсчет величины потенциальной энергии возможен при использовании метода конечных элементов, где почва представлена квазиупругой средой и выражена через модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона.

## 1. Почва как среда

### 1.1 Идеальные модели почвы

Обработка почвы [50, 51, 91, 92], выполняемая почворезущими рабочими органами, остается самой востребованной операцией в производстве сельскохозяйственной продукции.

Важно установить понятие о почве как о среде, которая воспринимает и передает механическое воздействие деформаторов [180]. В каждой сплошной конкретной почве наблюдается специфическая зависимость напряжений и деформаций [76, 249]. Специфическая зависимость выражается идеальной моделью [75]. По степени комбинации упругих и вязких свойств идеальные модели можно разбить на три класса. К первому классу можно отнести модель Гука и Ньютона [76]. Идеальным моделям второго класса соответствуют модели Максвелла и Фойгта [31, 75]. К идеальным моделям третьего класса можно отнести модели Пойтинга - Томсона, Барджерса, Кельвина [16, 190].

Если при увеличении нагрузки имеется прямо пропорциональная зависимость между нагрузкой  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$ , то почву можно отнести к идеальной модели первого класса Гука, то есть представить её в виде упругой среды. Если же деформация возрастает неограниченно при определённой величине  $\sigma$ , то почву можно представить идеальной моделью первого класса Ньютона.

В идеальных моделях второго класса Фойгта и Максвелла учтена величина и скорость относительной деформации, которая зависит от скорости движения воды в порах. Скорость движения воды в порах зависит от скорости фильтрации. С увеличением содержания в почве глинистых частиц коэффициент фильтрации резко уменьшается. При быстром приложении нагрузки данная почва деформируется как мало сжимаемое тело [41]. Модель Максвелла представляет собой почву, перенасыщенную влагой. Модель Фойгта - среднеувлажненную почву, между структурными агрегатами кото-

рой имеется вода и воздух [28]. Кривая, полученная с помощью прибора Цитовича - Файнциммерра [114], соотносит данный тип почвы к модели Максвелла, прямая - к модели Фойгта [8].

Идеальные модели третьего класса, служащие для уточняющих расчетов, моделируют напряженно - деформированное состояние почвенной среды определенного гранулометрического состава и интервала значений абсолютной влажности с помощью прямых перехода почвенной влаги и кривых водоудержания [20].

При влажности, меньшей ее полной влагоемкости, и при сжимающих напряжениях, меньших ее предела прочности, почва под действием нагрузки уплотняется и упрочняется. Неуплотненные почвы при таких влажностях - вязкоупругие [49]. При разработке теоретических моделей почву, находящуюся в состоянии физической спелости, в основном, представляют моделью Фойгта.

## **2. Физико - технологические показатели почвы**

### **2.1 Модуль упругости первого рода**

Модуль упругости первого рода отображает упругие деформации. Упругие деформации по закону Гука распространяются в сплошных средах с высокой скоростью. Эта скорость равна скорости звука в материале [31]. Упругий модуль может быть измерен в лаборатории, используя динамические трехосные испытания или резонаторные испытания образцов в условиях одноосного сжатия [5, 236, 207]. Для почв средних по механическому составу модуль упругости первого рода составляет  $E = 2 \text{ МПа}$ . Для глинистых почв данная величина может составлять до 10 МПа [186].

В настоящее время в механике грунтов и в земледельческой механике используется понятие «модуль деформации» [78]. Модуль деформации учитывает две составляющие: упругую и пластическую. Значения модуля деформации для различного рода грунта представлено в табл. 2.1.1.

Исследования, выполненные в институте [18] «Фундаментпроект» (А.А. Добровольский) показали, что между модулем упругости и модулем деформации имеется следующая зависимость, которая получена путем испытания различных грунтов в стабилометре

$$E \approx 8 \times E_d, \quad (2.1.1)$$

где  $E_d$  - модуль деформации, МПа.

Тем не менее, выражение (2.1.1) при наличии величины модуля деформации следует применять с большой осторожностью. Величину модуля упругости первого рода можно определить с помощью резонаторных колебаний малой интенсивности. Резонаторные колебания в целом сводятся к определению частоты собственных колебаний [212, 78].

Таблица 2.1.1

Значение модуля деформации

Вид грунта	Модуль деформации, МПа
Очень мягкие глины	0,5...5
Мягкие глины	5...20
Полутвердые глины	20...50
Твердые глины	50...100
Опесчаненные глины	25...200
Рыхлые пески	10...20
Плотные пески	25...100
Гравелистые грунты	100...200

Используемые допущения: материал однороден, изотропен и следует закону Гука; сечения при колебаниях образца остаются плоскими; частицы, лежащие в этих сечениях, совершают движения только в направлении оси почвенного образца; вес выделенного фрагмента не учитывают. А.С. Кушнareвым получено следующее выражение для определения модуля упругости первого рода

$$E = \frac{4 \times \pi^2 \times f^2 \times l^2 \times \gamma_{ов}}{K \times g}. \quad (2.1.2)$$

## 2.2 Коэффициент динамической вязкости

Вязкость - свойство почвы медленно деформироваться как в функции нагрузки, так и в функции времени. Вязкость почвы обусловлена взаимным перемещением составляющих ее фаз: твердой, жидкой и газообразной [47, 48, 114]. Чем продолжительнее действие нагрузки, тем значительнее деформация. Например, при движении трактора по болотистой почве (торфяники) глубина колеи больше, чем меньше скорость трактора, и наоборот. При вспашке, когда продолжительность действия нагрузки не превышает нескольких десятых долей секунды, вязкие деформации практически не успевают проявляться и ими можно пренебречь [63, стр.25].

Параметр  $\eta$  называется коэффициентом динамической вязкости. Размерность коэффициента динамической вязкости -  $Па \times с$ . Численное значение  $\eta$  для различных жидкостей находится опытным путем при помощи особых приборов, называемых вискозиметрами.

Большой разброс опытных данных значений вязкости для грунтов объясняется не только разнообразием их свойств, но и в не меньшей мере различием в методике определения коэффициента вязкости, да и в самом понимании этой величины. Вследствие того, что некоторые авторы не учитывают указанного обстоятельства, полученные данные носят случайный характер.

Вязкость различных сред меняется в весьма большом диапазоне: от  $1,8 \cdot 10^{-4} Па \times с$  для воздуха,  $10^{-2}$  для воды, 0,5 - 10  $Па \times с$  для различных масел и до  $5 \cdot 10^{22} Па \times с$  для земной коры. Что касается грунтов, то имеющиеся опытные данные по определению вязкости грунтов имеют разброс в значениях от  $10^6$  до  $10^{17} Па \times с$ .

## 2.3 Коэффициент сопротивления деформации

Основным параметром, влияющим на усилие тяги рабочего органа, является коэффициент деформации пласта [227, 201, 18]. Среднее значение коэффициента деформации колеблется в пределах 0,3 - 0,5  $кг/см^2$  для легких и

средних почв, 1 - 1,5 кг/см<sup>2</sup> и более для тяжелых почв [217, стр.69; 60]. По материалам Резникова Л.А. [187, стр. 81] коэффициент деформации для легких почв составляет 19620...20400 Н/м<sup>2</sup>, для средних - 39200...49000 Н/м<sup>2</sup>, для тяжелых - 58800...78400 Н/м<sup>2</sup>, очень тяжелых - 88200...147100 Н/м<sup>2</sup>.

И.А. Качинский предложил следующую формулу для расчета коэффициента деформации пласта

$$k_{\sigma} = k_1 + k_x \times (a_{cp} - b_{cp}), \quad (2.3.1)$$

где  $k_1$  - экспериментальное значение удельного сопротивления, Н/м<sup>2</sup>;

$k_x$  - коэффициент регрессии, показывающий изменение удельного сопротивления при изменении твердости почвы на ее единицу;

$a_{cp}$  - сопротивление почвы расклиниванию на глубину вспашки в момент определения, Н/м<sup>2</sup>;

$b_{cp}$  - среднее сопротивление почвы расклиниванию, Н/м<sup>2</sup>.

Е.П. Огрызковым [125] предложена формула для определения удельного сопротивления почвы с учетом ее абсолютной влажности

$$k_{\sigma} = 332884,8 - 60010 \times \omega + 4877,4 \times \omega^2 - 178,8 \times \omega^3 + 2,4655 \times \omega^4. \quad (2.3.2)$$

Известно также выражение Ю. К. Киртбая для определения коэффициента деформации пласта

$$k_{\sigma} = d - c \times \omega + b \times \omega - a \times \omega, \quad (2.3.3)$$

где  $a, b, c, d$  - экспериментально определенные коэффициенты.

М. Д. Подскребко [184] предложил определять коэффициент деформации с помощью следующего выражения

$$k_{\sigma} = \beta_{\sigma} \times T \times \omega, \quad (2.3.4)$$

где  $\beta_{\sigma}$  - коэффициент пропорциональности;

$T$  - твердость почвы, МПа.

Известно выражение Баширова Р.М. [12] для определения коэффициента деформации

$$K_{\phi} = B_0 + B_1 \times \omega + B_2 X_2 + B_3 \times v + B_4 \times H + B_{11} \times \omega^2 + B_{33} v^3 + \dots \quad (2.3.5) \\ \dots + B_{44} H^2 + B_{12} \times \omega \times X_2 + B_{13} \times \omega \times v + B_{23} X_2 \times v,$$

где  $X_2$  - механический состав почвы, %.

Коэффициенты  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_{11}, B_{33}, B_{44}, B_{12}, B_{13}, B_{23}$  для определения коэффициента деформации приведены в таблице № 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Значения коэффициентов для определения коэффициента деформации  
на серых лесных почвах

	Пласт многолетних трав	Поле после кукурузы	Стерня пшеницы	Поле после картофеля
$B_0$	366,60	250,65	253,75	316,45
$B_1$	-10,53	-11,28	-11,01	-13,66
$B_2$	2,06	1,77	1,56	1,43
$B_3$	-24,40	-29,17	-29,05	-34,81
$B_4$	-15,18	-4,00	-4,29	-6,25
$B_{11}$	0,33	0,33	0,32	0,37
$B_{33}$	2,20	2,63	2,55	3,06
$B_{44}$	0,32	0,09	0,10	0,14
$B_{12}$	-0,09	-0,07	-0,06	-0,05
$B_{13}$	-0,08	-0,06	-0,06	-0,05
$B_{23}$	0,04	0,03	0,03	0,02

Коэффициент деформации является экспериментальной величиной, зависящей от влажности почвы или от произведения влажности и твердости.

## 2.4 Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона [31, стр.42, 188] в сопротивлении материалов связан только с упругой деформацией сред. Зависимость коэффициента Пуассона с тремя главными напряжениями, относительными деформациями, модулем упругости первого рода описывается формулами, которые носят название обобщенного закона Гука [68, 69, стр.111].

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \times \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{E}; \quad (2.4.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \mu \times \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{E}; \quad (2.4.2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \mu \times \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{E}, \quad (2.4.3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные напряжения, Па;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - величины относительных деформаций.

Коэффициент Пуассона - абсолютная величина отношения поперечной и продольной деформаций. Этот коэффициент зависит от природы материала.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \quad (2.4.4)$$

где  $\varepsilon'$  - деформация в поперечном направлении;

$\varepsilon$  - продольная деформация.

Коэффициент Пуассона имеет совершенно определенное значение для каждого материала. В упругой зоне коэффициент  $\mu$  постоянен, а в пластической - данный параметр является переменной величиной. В таблице 2.4.1 приведены диапазоны модуля упругости первого рода  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$  для различных материалов.

Таблица 2.4.1

## Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона

Материал	Модуль упругости первого рода, МПа	Коэффициент Пуассона
Сталь углеродистая	$(2...2,1) \times 10^5$	0,25...0,33
Медь	$1,1 \times 10^6$	0,31...0,34
Алюминий	$0,69 \times 10^5$	0,32...0,36
Бетон	$(0,146...0,232) \times 10^5$	0,18

Для разных материалов  $\mu$  колеблется от 0 до 0,5, в среднем изменяясь от 0,25 до 0,33 [44]. Для парафина  $\mu = 0,5$ .

В механике грунтов коэффициент Пуассона называется коэффициентом поперечного (бокового) расширения [73], коэффициентом поперечной деформации, коэффициентом бокового распора [31]. Коэффициент бокового расширения грунта (аналогичный коэффициенту Пуассона) равен

$$\mu = \frac{E_{об} - E}{2 \times E_{об}}, \quad (2.4.5)$$

где  $E_{об}$  - модуль объемной деформации грунта, Па.

Коэффициент бокового распора также соответствует определенному состоянию грунта и определяет его поперечную деформируемость. Коэффициент бокового распора будет постоянен для тех грунтов, механические свойства которых не зависят от перемещения воды в пустотах. Это относится к крупнозернистым, хорошо фильтрующим, скелетным грунтам. В данных грунтах поровая вода свободно передвигается между зернами скелета, не принимает участие в создании реакции сжимающей силы.

При кратковременном нагружении увлажненных грунтов, влага, находящаяся в пустотах, не успевает прийти в движение, вследствие чего грунт проявляет себя как единое целое [127]. Коэффициент деформации различного рода грунтов приведен в таблице 2.4.2 [203].

Таблица 2.4.2

## Значения коэффициента поперечной деформации

Грунты		Коэффициент поперечной деформации
Крупнообломочные грунты		0,27
Пески и супеси		0,30...0,35
Суглинки		0,35...0,37
Глины при показателе текучести $I_L$	$I_L \leq 0$	0,20...0,30
	$0 \leq I_L \leq 0,25$	0,30...0,38
	$0,25 \leq I_L \leq 1$	0,38...0,45

Коэффициент Пуассона также связан с коэффициентом бокового давления следующей зависимостью [226]

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (2.4.6)$$

где  $\xi$  - коэффициент бокового давления.

В свою очередь, коэффициент бокового давления  $\xi$  есть отношение приращения горизонтального давления грунта  $dq$  к приращению действующего вертикального давления  $dP$

$$\xi = \frac{dq}{dP}. \quad (2.4.7)$$

Для песчаных грунтов коэффициент бокового давления  $\xi = 0,25...0,37$ . Для глинистых грунтов в зависимости от консистенции  $\xi = 0,11...0,82$  [226, стр. 38].

С учетом изложенного, можно сделать следующий вывод. Коэффициент Пуассона характеризует конкретную почву и ее определенное состояние. В зависимости от влажности и скорости нагружения данный параметр, возможно, изменяет свои значения.

## **2.5 Упругая составляющая относительной деформации сжатия**

Конструктивные изменения геометрии рабочих органов, осуществленные в пределах упругих относительных деформаций обрабатываемой почвы, позволят осуществить технологический процесс без разрушения почвенных частиц в виду их пластической деформации.

При испытании на одноосное сжатие суглинков установлено, что величина упругой составляющей относительной деформации почвы существенно зависит от влажности [116]. При влажности 8,4% упругая составляющая относительной деформации находится в пределах 1,5%. При влажности 12,2% - 2%. То есть с увеличением значений абсолютной влажности величина упругой составляющей увеличивается.

Упругая составляющая относительной деформации почвы, как и предел прочности на сжатие, характеризуют почву определенного гранулометрического состава и существенно зависят от ее значений абсолютной влажности.

## **2.6 Предел прочности почвы на сжатие**

К основным параметрам, характеризующим почву как объект обработки можно отнести предел прочности на сжатие [38] и растяжение, углы внешнего и внутреннего трения, ее твердость.

Знание прочностных свойств почвы позволяет наметить пути и методы снижения энергоемкости ее механической обработки: правильно рассчитать и спроектировать рабочие органы, определить условия рационального их применения [63, стр.12]. В процессе воздействия рабочих органов различного рода почва, в большей мере благодаря наличию слабых связей, подвергается случайной комбинации деформаций растяжения, сдвига, сжатия.

Наиболее энергоемкой деформацией является деформация сжатия. Силам сжатия противодействуют все виды сцепления почвы. К ним относятся молекулярные силы сцепления твердых частиц, химические связи, менисковые силы поверхностного натяжения воды, силы трения зацепления и прилипания [27].

Если кубический или цилиндрический почвенный образец подвергается возрастающей нагрузке  $\sigma_1$  при  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , то величина  $\sigma_1$  в момент разрушения называется пределом прочности на сжатие. Предел прочности почвы на сжатие равен

$$\sigma = \frac{P}{F}. \quad (2.6.1)$$

Вопросами исследования почвы на сжатие занимались ученые, определяя воздействие катков и ротационных плугов на обрабатываемый пласт, изыскивая оптимальные режимы функционирования комкодавителей картофелеуборочных комбайнов [111, 77, 181]. Так установлено, что временное сопротивление (до начала крошения) [222] при различных видах деформации изменяется в широких пределах. Суглинистая почва имеет временное сопротивление сжатию 65...108 кПа. Вагин А.Т. показал, что удельное сопротивление почвы горизонтальному смятию может составлять  $1,44 \times 10^6$  Па [124]. На значение данного параметра оказывает влияние влажность почвы.

Так, максимальное значение данного параметра соответствует влажности 20%. При уменьшении и увеличении влажности величина предела прочности на сжатие уменьшается. Значения временного сопротивления сжатию глинистого чернозема приведены в таблице 2.6.1.

Таблица 2.6.1

Значения временного сопротивления сжатию

Влажность почвы, %	Предел прочности почвы на сжатие, г/см <sup>2</sup>
12...16	1080,0
19...22	980,0
22...24	650,0

Для глинистого чернозема экстремальные значения предела прочности почвы на сжатие соответствуют абсолютной влажности 12 - 16%. Опять же с увеличением влажности значение данного показателя падает. При увеличении влажности глинистого чернозема с 12% до 24% предел прочности на сжатие падает почти в два раза.

## 2.7 Предел прочности почвы на растяжение

Растяжение (разрыв) - самый мало энергоемкий вид деформации [23, 194, 223]. Данному виду деформации противодействуют только силы сцепления почвы [27]. Результаты исследования предела прочности почвы на растяжение используются, в частности, для расчета тягового сопротивления клина в методике, предложенной А.П. Осадчим [128]. Также с помощью значений предела прочности почвы на растяжение в совокупности со значениями предела прочности на сжатие строится круг Мора и определяется положение огибающей прямой. Угол между огибающей прямой и осью абсцисс дает значение внутреннего угла трения почвы.

Известны значения предела прочности при растяжении суглинистой почвы при влажности 21...28%. Так, в данном случае, временное сопротивление почвы растяжению составляет 5...6 кПа [226]. Также известны величины предела прочности на растяжение глинистой почвы [63, стр.12]. Причем, исследуемая величина неоднозначна и зависит от значений абсолютной влажности почвы. Экстремальное значение, равное 100 кПа, соответствует абсолютной влажности 22%.

По аналогии с пределом прочности на сжатие, уменьшении или увеличении порогового значения влажности, которое соответствует экстремальному значению, приводит к уменьшению величины предела прочности на растяжение.

Величина предела прочности на растяжение глинистого чернозема приведена в таблице 2.7.1. Из данной таблицы видно, что при увеличении влажности от порогового значения 21 - 23% предел прочности на растяжение снижается.

Таблица 2.7.1

Предел прочности почвы на растяжение

Влажность почвы, %	$\sigma_p$ , г/см <sup>2</sup>
21-23	61,8
23-25	52,5
26-28	50

Также получен ряд выражений, устанавливающих изменение величины предельного сопротивления почвы растяжению от скорости нагружения [184, 25]. Так, Виноградовым В.И. получено следующее выражение при динамическом действии силы

$$\sigma_p^d = \sigma_0 + K_{pcn} \times \ln\left(\frac{v_n}{v_0}\right), \quad (2.7.1)$$

где  $\sigma_0$  - временное сопротивление почвы растяжению при скорости нагружения  $v_0 = 1 \text{ м/с}$ ;

$v_n$  - действительная скорость нагружения, м/с;

$K_{pcn}$  - коэффициент, учитывающий релаксационные свойства почвы.

В узком диапазоне варьирования скорости зависимость между временным сопротивлением растяжению и скоростью деформации может быть описана линейным уравнением

$$\sigma_p = \sigma_0 \times (1 + K \times v_n). \quad (2.7.2)$$

Данным автором установлено то, что повышение скорости нагружения в 11 раз, увеличивает временное сопротивление растяжению только в 2 раза.

Подсребко М.Д. получены выражения для статического и динамического нагружения при разрушении почвенного образца растяжением.

Напряжение при статическом нагружении

$$\sigma_p^c = E_d \times \varepsilon + a \times \varepsilon^d + c, \quad (2.7.3)$$

где  $a, d, c$  - коэффициенты, зависящие от состояния почвы, особенно от влажности.

Временное сопротивление растяжению при динамическом нагружении

$$\sigma_p^d = \sigma_p^c \times e^{b_{yn} \times v_{n0}^2}, \quad (2.7.4)$$

где  $b_{yn}$  - коэффициент, отражающий особенности условий нагружения почвенного образца;

$v_{nko}$  - скорость перемещения подвижного края образца относительно неподвижного, м/с.

Параметр  $b_{yn}$  определяется по выражению

$$b_{yn} = \frac{A \times T_{np}}{2 \times l_0}, \quad (2.7.5)$$

где  $A$  - коэффициент, определяющий свойства почвы;

$T_{np}$  - период релаксации, сек;

$l_0$  - начальная длина образца, м.

В узких пределах изменения скорости нагружения (0,4 - 2 м/с и 2 - 4 м/с) зависимость между прочностью почвы и скоростью нагружения можно считать линейной.

На основании изложенного, можно сделать следующий вывод. Предел прочности на растяжение, являясь самой малоэнергоемкой величиной, отражает почву определенного мехсостава и зависит, в большей мере от влажности почвы, чем от скорости нагружения. Величина предела прочности на растяжение изменяется в довольно широких пределах.

## 2.8 Коэффициент внешнего трения

Под трением понимается сопротивление скольжению одной поверхности по другой [86, стр. 425]. Сила трения всегда больше в самом начале скольжения. Началу скольжения соответствует переход от состояния покоя к движению. Поэтому различают два коэффициента трения - покоя и скольжения. Коэффициент трения покоя называется статическим коэффициентом трения. Коэффициент трения скольжения называется динамическим коэффициентом трения. Коэффициент трения покоя определяется с учетом опреде-

ленного угла наклона поверхности, при котором тело начинает движение [103, стр.8]. При наличии угла наклона поверхности, при котором тело начинает скольжение, можно и определить угол трения покоя.

При определении конструктивных и энергетических характеристик ряда почвообрабатывающих машин применяется коэффициент трения скольжения [219]. Величина коэффициента зависит от механического состава [200, стр. 54] и влажности почвы, шероховатости рабочей поверхности, материала, используемого для изготовления рабочего органа, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения.

Согласно теории И. В. Крагельского [70] коэффициент трения скольжения

$$f_{\text{внеш}} = \frac{\alpha_m \times S}{N} + \beta_m, \quad (2.8.1)$$

где  $\alpha_m, \beta_m$  - параметры, зависящие от механических и молекулярных свойств поверхности трущихся тел;

$S$  - площадь соприкосновения, м<sup>2</sup>;

$N$  - нормальное давление, Па.

При наличии экспериментально определенного значения силы трения  $F_{\text{тр}}$  коэффициент трения определяется с помощью формулы Амонтона [192, стр.38], предложенной в конце XVII века

$$f_{\text{внеш}} = \frac{F_{\text{тр}}}{N}. \quad (2.8.2)$$

Из всего многообразия факторов, влияющих на коэффициент трения скольжения, определяющее значение все же оказывает механический состав почвы и ее влажность.

С увеличением значения содержания физической глины увеличивается и коэффициент трения скольжения. При содержании физической глины в объеме 10% коэффициент трения составляет 0,26. При содержании физической

глины в объеме 60% коэффициент трения составляет 0,4. Значения коэффициента трения  $f_{внеш}$ , угла трения  $\varphi_{внеш}$ , определенные при давлении 20...100 Па, и скорости скольжения почвы 0,4 м/с по шлифованной стальной поверхности для некоторых типов почв даны в таблице № 2.8.1 [20].

Таблица 2.8.1

Коэффициент  $f_{внеш}$  и угол трения  $\varphi_{внеш}$  почвы о сталь

Тип почвы по механическому составу	$f_{внеш}$	$\varphi_{внеш}$
Песчаная и супесчаная (рыхлая)	0,25...0,35	14°...19°30'
Песчаная и супесчаная (связная)	0,50...0,70	26°30'...35°
Легко и среднесуглинистая	0,35...0,50	19°30'...26°30'
Тяжелая суглинистая и глинистая	0,40...0,90	22°...42°

Для разных почв при определенном механическом составе характерна своя тенденция изменения коэффициента трения от влажности. Так, для песчаной почвы минимальное значение коэффициента трения соответствует абсолютной влажности 5% и 15%. А максимальное значение соответствует влажности 10%. При низкой влажности частицы песчаной почвы, соприкасаясь с поверхностью, перекатываются по ней, что приводит к уменьшению коэффициента трения скольжения.

Для супесчаной почвы характерна тенденция уменьшения коэффициента трения с увеличением значений абсолютной влажности почвы. Для тяжелых суглинков и глин характерна тенденция увеличения коэффициента трения скольжения при увеличении значений абсолютной влажности почвы. Тем не менее, данное утверждение недостаточно точно [63, 126]. Все зависит от величины анализируемого интервала значений абсолютной влажности. Так, зависимость коэффициента внешнего трения от значений абсолютной влажности почвы в интервале от 10% до 60% представлена тремя участками.

На I участке (фаза сухого трения) при относительно низкой влажности почвенная влага не поступает к материалу. И коэффициент трения является величиной постоянной. На II участке (фаза прилипания) коэффициент трения резко возрастает за счет возникновения сил молекулярного притяжения между почвенной влагой и материалом. Максимальное значение коэффициента трения соответствует влажности 40%. На третьем участке коэффициент трения резко снижается за счет того, что влага играет роль смазки.

В результате экспериментальных исследований установлено зависимость коэффициента внешнего трения от значений абсолютной влажности почвы из - под люцерны [191, стр.145]

$$f_{внеш} = -0,228 + 0,0695 \times \omega - 0,0012 \times \omega^2 \pm 0,04. \quad (2.8.3)$$

Шероховатость поверхности также, но в незначительной степени, влияет на значения коэффициента трения скольжения. Так, коэффициент трения для чисто шлифованной стали ниже, чем нешлифованной. В тоже время полировка поверхности почти не изменяет его значения. Наиболее низкий коэффициент трения о почву имеют некоторые новые материалы. К ним относятся тефлон, фторопласт, полиэтилен, капрон.

Увеличение удельного давления на поверхности контакта вызывает уменьшение значения коэффициента трения [200], так как при этом в результате уплотнения почвы на поверхность трения поступает свободная влага, оказывающая смазывающее действие.

Противоречивы данные о влиянии скорости скольжения на величину коэффициента трения. Но ряд ученых полагает, что изменение скорости скольжения почвы по стали в пределах 0,5 - 4 м/с не оказывает ощутимого влияния на величину коэффициента трения [200]. Для ориентировочных расчетов коэффициент трения принимают равным  $f_{внеш} = 0.5$ , что соответствует углу трения  $\varphi_{внеш} = 26^\circ 30'$ .

## 2.9 Коэффициент внутреннего трения

Показателем величины действующих в почве сил внутреннего трения является коэффициент внутреннего трения [126]. Коэффициент внутреннего трения отражает проявление молекулярных сил, электростатического притяжения между частицами, кристаллизационных связей. А рабочий орган почвообрабатывающего орудия проектируется для конкретного состояния почвы, определяемого ее углом внутреннего трения [9, 126]. Внутреннее трение, то есть трение между частицами, позволяет определить зону воздействия на почву рабочего органа почвообрабатывающего орудия [60].

В таблице 2.9.1 приведены значения коэффициента внутреннего трения и значения абсолютной влажности суглинистой почвы.

Таблица 2.9.1

Коэффициент внутреннего трения среднесуглинистой почвы

Абсолютная влажность, %	Коэффициент внутреннего трения	Угол внутреннего трения
3,6	0,60	30,97
6,5	0,64	28,38
7,8	0,47	25,19
15,4	0,40	21,82
20,3	0,40	21,82
25,4	0,33	18,27
30,2	0,33	18,27

Отмечается тенденция уменьшения угла внутреннего трения с увеличением значения абсолютной влажности. В интервале от 15...20% значений абсолютной влажности величина является постоянной. Также и в интервале от 25...30% величина абсолютной влажности является величиной постоянной.

В таблице 2.9.2 представлены значения коэффициента и угла внутреннего трения темно - каштановой тяжелосуглинистой почвы от абсолютной влажности почвы.

Таблица 2.9.2

## Коэффициент трения тяжелосуглинистой почвы

Влажность, %	Коэффициент внутреннего трения	Угол внутреннего трения, град
8,5	3,2	72,68
10,2	1,6	58,02
12,9	0,73	36,15
17,7	0,73	36,15
20,9	0,40	21,81
26,0	0,33	18,27

На основании изложенного материала, можно сделать следующий вывод. Угол внутреннего трения уменьшается с увеличением абсолютной влажности. Доказано, что коэффициент внутреннего трения уменьшается ступенчатого. Коэффициент внутреннего трения изменяется от 3,2 до 0,33.

### 2.10 Твердость почвы

Твердость является одной из существенных характеристик механических свойств почвы, обязательное определение которой при испытаниях плугов, культиваторов и других машин предусматривается соответствующими ГОСТами.

Существуют различные формулировки твердости почвы. Твердость - свойство почвы в естественном положении сопротивляться сжатию и расклиниванию. В тоже время, твердость почвы - это сопротивление проникновению в нее деформатора. В качестве деформатора может быть использован конус, шар, цилиндр [224].

Твердость почвы определяется следующими факторами: количеством частиц в единице объема; пространственным распределением частиц; влажностью почвы; распределением влаги в объеме почвы; связями между частицами; распределением связей. Чем больше количество частиц в единице объеме, тем больше частиц вступает в контакт с деформатором, тем меньше усилия приходится на частицу.

Связь между частицами формируется силами взаимного притяжения, минеральными и органическими частицами, минеральными частицами и частицами окисей, органическими частицами и частицами окисей. Большое количество точек контакта частиц увеличивает связь между ними.

## **2.11 Влажность почвы**

Основным показателем, от которого зависят показатели, представляющие почву как объект обработки, динамические и деформационные параметры, является влажность. Вода, заполняющая поры почвы, состоит из раствора различных солей. Она может находиться в твердом (в виде льда в мерзлой почве), жидком и парообразном состоянии. По характеру взаимодействия со скелетом грунта вода подразделяется на свободную и связанную. Свободная поровая вода по физическим свойствам не отличается от обычной и подчиняется основным законам гидростатики. Связанная поровая вода в результате физико-химического взаимодействия молекул воды с поверхностью глинистых частиц отличается по некоторым физическим свойствам от свободной воды.

Различают два вида свободной воды: гравитационную воду [7] и капиллярную. Вода, передвигающаяся под действием силы тяжести, называется гравитационной. В порах крупнообломочных грунтов и крупнозернистых песков всю поровую воду обычно считают гравитационной.

Взаимодействие воды с частицами, передвижение почвенной влаги и ее усвоение растениями в почвах, различных по механическому составу, структуре, порозности, происходит неодинаково [230]. Существуют определенные значения влажности почвы, при достижении которых резко меняются как свойства почвенной влаги, так и ее доступность для растений.

Свободная вода, поступившая в почву, изменяет свой энергетический уровень под влиянием водоудерживающих сил почвы. К водоудерживающим силам почвы относят менисково - пленочные, осмотические, адсорбционные силы [20, стр.72].

Абсолютная влажность, характеризующая общее содержание влаги в почве, равна [33]

$$\omega = \frac{m_e}{m_{асн}} \times 100\%, \quad (2.11.1)$$

где  $\omega$  - абсолютная влажность почвы, %;

$m_e$  - количество воды в образце почвы, г;

$m_{асн}$  - масса абсолютно сухой почвы, г.

Относительная влажность дает представление о степени насыщения почвы влагой и позволят сравнить влажности почв, отличающихся по величине влагоемкости.

Относительную влажность почвы определяют по формуле

$$\omega_{отн} = \frac{\omega \times 100\%}{\omega_{оис}}, \quad (2.11.2)$$

где  $\omega_{оис}$  - общая влагоемкость почвы.

Относительная влажность почвы характеризует степень смоченности почвы.

Влажность почвы существенно влияет как на расход энергии при обработке почвы, так и на качество производимой работы. При вспашке пересохших (воздушно - сухих) суглинистых и глинистых почв, не имеющих водонепроницаемой структуры, происходит образование крупных глыб, диаметр которых часто достигает 0,5 м. В этих условиях работы тяговое сопротивление плуга максимально. Измельчить глыбы, образующиеся при вспашке пересохшей почвы, невозможно ни катками, ни боронами. Они могут быть полностью ликвидированы лишь в результате осеннего увлажнения почвы и последующего промерзания, оттаивания и своевременного весеннего боронования почвы.

Отрицательные результаты дает и вспашка переувлажненных связных почв, относительная влажность которых более 80%. При обработке бесструк-

турных почв пласт, сохраняя форму сплошной ленты, остается слабо взрыхленным, его поверхность после оборота блестит, так как отвал “заиливает” пласт. После просыхания почвы такая пахня непригодная для посева. При вспашке сильно увлажненных структурных почв происходит сильное залипание отвалов и сгуживание почвы впереди корпусов плуга. При этом происходит неполный оборот пласта, растительные остатки заделываются плохо.

### **3. Конструктивные особенности почворезущих рабочих органов**

#### **3.1 Плужные корпуса**

К почворезущим рабочим органам относятся лемеха плужных корпусов, стрельчатые и долотообразные лапы, дисковые рабочие органы. Почва разрыхляется при движении рабочего органа в почвенной массе. Тело является лапой или зубом, если эффект рыхления распространяется значительно дальше его ширины [76], или плужным корпусом, если деформация слоя ограничивается его шириной.

Плужные корпуса [87, 89] конструктивно подразделяются на отвальные, безотвальные, вырезные, с почвоуглубителем, с выдвигным долотом, дисковые и комбинированные [61, 3].

Отвальные корпуса применяют для вспашки с оборотом и рыхлением пласта. Корпус состоит из лемеха, отвала, полевой доски. Отвал и лемех, прикрепленные к стойке, образуют рабочую поверхность корпуса [86, 218, 33, 213, 102]. Рабочая поверхность корпуса плуга подразделяется на культурную, полувинтовую, винтовую и цилиндрическую [221].

Культурные корпуса хорошо оборачивают и крошат почвенный пласт, поэтому их используют для вспашки старопахотных земель [222] на скоростях в интервале 7,7...12 км/ч. С точки зрения минимальной энергоемкости процесса следует пахать на скоростях, близких к нижнему пределу [63]. В сочетании с предплужниками корпуса с культурными отвалами хорошо работают и на слабозадренных почвах [63].

Полувинтовые корпуса хорошо обрабатывают пласт, но хуже разрыхляют его. Такие корпуса устанавливаются, в основном, на кустарниково - болотных плугах, но их также можно применять на плугах общего назначения для вспашки сильно задернелых и целинных почв.

Винтовые поверхности могут быть длинные, короткие, с вогнутой, выпуклой или с прямолинейной образующей. Винтовые корпуса обеспечивают полный оборот пласта без его рыхления и создают наилучшие условия для разложения пожнивных остатков и дернины. Их используют для перепашки пласта многолетних трав, коренном улучшении кормовых угодий и первичной вспашке целинных земель.

При работе лемешно - отвальной поверхности пласт подрезается лемехом в горизонтальной плоскости, а его полевым обрезом - в вертикальной. При этом на лезвие лемеха преобладают напряжения смятия. При дополнительном поступлении на остов лемеха пласт подвержен нормальным напряжениям косоугольного изгиба. При дальнейшем движении по отвалу к напряжениям косоугольного изгиба добавляются касательные напряжения за счет скручивания пласта.

Модернизация таких почворезущих рабочих органов как плужный лемех, дисковый рабочий орган, долотообразная и стрелчатая лапа осуществляется в направлении снижения энергоемкости, обеспечения эксплуатационной и технологической надежности, универсализации за счет расширения функциональных возможностей [13].

Установлено, что на лемеха приходится около 50%, а в ряде случаев около 80% [19] всего тягового сопротивления плужного корпуса, в то же время на отвал - 10% [185]. На тяговое сопротивление полевой доски приходится около 17% общего сопротивления плужного корпуса [63]. Таким образом, снижение энергоемкости плужного лемеха является задачей важной и актуальной.

Снижение энергоемкости в свою очередь осуществляется по пяти направлениям: за счет реализации колебаний [206], уменьшения сил трения между поверхностью почворезущих рабочих органов и почвенного пласта,

формоизменения геометрии, реализация движения режущего рабочего органа в созданной сети опережающих трещин, оптимизации условий функционирования почворезущих элементов [239].

Почворезущие рабочие органы могут совершать колебания в направлении движения агрегата, вдоль лезвия лемеха, вокруг стойки [177]. Колебания могут быть свободные или вынужденные [242].

Свободные колебания может осуществлять подпружиненная режущая кромка составного лемеха [241], или сам лемех, шарнирно связанный с отвалом, опирающийся на упругие полосы или пружину кручения [163], или плужный корпус в целом за счет изгиба на  $90^\circ$  стойки корпуса плуга [167].

Вынужденные колебания также может осуществлять режущая кромка составного лемеха [243], сам лемех [139], плужный корпус [138, 153, 145] или рама плуга за счет работы вибраторов различного рода, обеспечивая тем самым снижение тягового сопротивления и улучшения качества вспашки.

Тем не менее, плужные корпуса, работающие в режиме вибрации, неэффективны при работе на повышенных скоростях и обладают достаточной сложностью, что приводит к снижению надежности конструкции в целом.

Затраты на преодоление сил трения составляют в некоторых случаях 40...50% и более от их общего сопротивления рабочих органов. Для уменьшения сил трения и борьбы с прилипанием применяют различные методы: устанавливают пластинчатые или прутковые отвалы, рабочие поверхности покрывают антиадгезионными материалами, в частности тефлоном, используют вибрацию рабочих органов, электросмазку, на рабочую поверхность подают воду или жидкие удобрения, заменяют трение скольжения трением качения [148], создают «пустотелые участки», в результате чего уменьшается площадь соприкосновения пласта с рабочей поверхностью лемеха [155].

Эффект электросмазки достигим при пропускании через отвал корпуса постоянного тока, одноименного заряду почвы. Возникающая при этом благодаря электроосмосу водяная пленка уменьшает притяжение между трущимися поверхностями [20].

Наиболее эффективным оказался метод увеличения удельного давления пласта на рабочую поверхность плужного корпуса в результате установки пластинчатых или прутковых отвалов, в котором используется способность рабочих поверхностей прутков и пластин самоочищаться [20].

Известны попытки формоизменения геометрии плоского лемеха, который обладает постоянной величиной угла между поверхностью и дном борозды. Так, лемешно - отвальная поверхность [175, 166] может быть выполнена в виде единой винтовой поверхности с переменным радиусом кривизны. Или сам непосредственно лемех может иметь выпуклые и вогнутые участки поверхности, образующей параболоид [142]. Также ВИМом предложен лемех с переменным в сторону уменьшения от полевого обреза деформатора углом резания [84].

К рабочим зонам лемеха относят основную, лезвийную [159] и носовые части. Конструктивные изменения поверхности лемеха напрямую связаны с тем, в каком режиме функционирует лемех: в режиме скалывания, где определяющую роль играет основная часть поверхности лемеха, или в режиме излома пласта, где определяющую роль играет лезвийная часть и непосредственно лезвие. Давление на режущей кромке находится в пределах 0,1 - 0,8 МПа [199].

При преобладании режима излома пласта доказано снижение энергоемкости в случае сочетания режущей кромкой впадин [129] и зубьев [136, 165, 132, 147], каплевидных выступов [130], дополнительно создающие растягивающие напряжения.

Для представленных выше лемехов, режущая кромка которых создает сминающие и растягивающие напряжения, будет характерна значительная трудоемкость изготовления. Эффект сочетания напряжений смятия и растяжения будет воспроизведен, если режущая кромка будет фрагментирована на три части и лезвие будет трансформировано на угол, при котором будут преобладать упругие деформации.

В плуге Бойкова В.М. [136] конструктивно реализована способность со-

здавать сеть опережающих трещин, сочетание растягивающих и сжимающих напряжений за счет конических поверхностей носка лемеха. Известно также изобретение, где полевой обрез лемеха заменен зубьевидным наральником стойки корпуса плуга. Установлено, что работа зубьевидного наральника также способствует созданию сети опережающих трещин, что приводит к снижению энергоемкости вспашки [162].

Оптимизация условий функционирования лемешно - отвальной поверхности [14] в зависимости от почвенно - климатических условий работы заключается в ручном [143, 133] или автоматическом изменении [151, 80] угла между поверхностью лемеха и дном борозды, лезвием лемеха и стенкой борозды, кривизны верхней части отвала [152, 176]. К данному направлению следует отнести то обстоятельство, что с целью снижения энергоемкости, геометрические параметры, в частности угол резания плужного лемеха [115] должен быть определен с учетом физико - технологических параметров обрабатываемой почвы. Так, угол резания может находиться в интервале  $34^\circ \dots 25^\circ$  [121].

Надежность - это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Для почворезущих рабочих органов, на наш взгляд, допустимо применение таких понятий как эксплуатационная и технологическая надежность. Повышение эксплуатационной надежности [131] заключается в применении износостойкого [155, 144, 126, 58, 179] или многослойного материала, термообработке [52, 53, 54, 55, 56, 57].

Известны технические решения, которые повышают технологическую надежность вспашки плужным корпусом, минимизируя появление «плужной подошвы» [135]. Также верхняя часть плужного корпуса Мударисова С.Г. [158] представляет собой спираль Корню, что устраняет задир пласта в момент его укладки в борозду.

Универсализация за счет расширения функциональных возможностей заключается в совмещении элементарных технологических операций [66, 157, 178]. Использование плужных корпусов в сочетании с внесением удобрений, ядохимикатов, позволит снизить себестоимость продукции растениеводства в целом. Плужный корпус может быть снабжен подпружиненным крылом отвала [176].

### 3.2 Дисковые рабочие органы

Проборазы современных дисковых орудий уже изготавливались в XIX веке. Изобретение дисковых орудий было вызвано желанием заменить трение скольжения трением качения, так как рабочие органы - диски в процессе работы в меньшей мере забиваются растительными остатками [28]. Также лезвие дисков в несколько раз длиннее лемешных, лапчатых и других рабочих органов того же назначения. С учетом этого режущая кромка медленнее изнашивается [86].

Дисковые рабочие органы, обладая наибольшей универсальностью [120], устанавливаются на плугах, луцильниках, боронах [198], сеялках, комбинированных машинах, дискаторах [103]. Они классифицируются по сплошности лезвийной части, по форме диска, по типу выреза, по характеру выреза [216]. По сплошности лезвийной части диски подразделяются на рабочие органы, имеющие сплошное или вырезное лезвие. По форме диски бывают плоские, сферические, гофрированные, конические, рифленые, волнистые. Вырезные гладкие сферические диски имеют вырез типа «ромашка» или же вырез полукруглой формы. Характер выреза может быть симметричным или ассиметричным, иметь форму логарифмической спирали [137] или шестигранника [170]. Ассиметричный вырез обеспечивает лучшее защемление растительных остатков и их измельчение при резании со скольжением. Диск, имеющий форму сферической поверхности, изготавливают штамповкой из листовой стали и затачивают [192].

Диски размещаются индивидуально или в батареях. Минимальное количество дисков в батарее - 2, максимальное - 7...8. При увеличении числа дисков в батарее ухудшается копирование рельефа поля [187]. Батареи, в частности дисковых борон, чаще всего расположены X - образно, V - образно, ромбом. При данном расположении только два диска работают в условиях заблокированного, а остальные - в условиях полублокированного резания. Работа в условиях полублокированного резания приводит к снижению энергоемкости процесса взаимодействия.

Максимальный угол атаки дисковых плугов составляет  $45^\circ$ , луцильников -  $35^\circ$  [10, 192], борон -  $25^\circ$ . Угол атаки может изменяться индивидуально или для секции в целом вручную с помощью винтовых стяжек, или элементов гидравлики.

Для гладкой пахоты некоторые зарубежные фирмы выпускают дисковые плуги, у которых при смене направления движения одновременно с поворотом рамы в горизонтальной плоскости на  $180^\circ$  поворачиваются диски [72].

При движении как гладкие сферические, так и вырезные диски вращаются за счет сцепления с почвой. Процесс взаимодействия сегмента вырезного диска с почвой включает этап внедрения, движения в пласте, выход из него [204]. Режущая кромка диска отрезает полоску почвы и поднимает ее на внутреннюю сферическую поверхность. Далее почва падает с некоторой высоты и отводится диском в сторону [61, стр. 47]. В результате этого почва крошится, частично оборачивается и перемешивается [90]. С учетом этого, работа диска оценивается показателями крошения, оборота и перемешивания пласта. Почва, как объект обработки, представлена углом внешнего трения и коэффициентом сопротивления деформации. При движении вырезного диска почва деформируется за счет касательных напряжений.

Удельное сопротивление дисковых луцильников составляет 1,2...2,6 кН/м, легких борон 1,9...3,0 кН/м, тяжелых - 4...8 кН/м. Установлено, что при изменении постоянной скорости движения дисков с 6 до 10 км/ч тяговое

сопротивление увеличивается на 7...12% [211]. Удельное тяговое сопротивление дисковых и лемешных плугов практически одинаково, поэтому для энергетических расчетов дисковых плугов можно использовать данные динамометрирования лемешных орудий [63].

Энергоемкость воздействия сферического вырезного диска на почву, сегмент которого имеет переднюю, внешнюю, заднюю режущие кромки, будет уменьшена при трансформации внешнего лезвия в сторону вогнутой поверхности рабочего органа.

К факторам, которые снижают технологическую надежность обработки почвы дисковыми рабочими органами, относят забивание батарей растительными остатками и почвой [85], проскальзывание режущей кромки относительно растительной массы в момент резания [154]. Проблема решается за счет использования чистиков, оптимального расстояния между дисками [171], индивидуальным размещением рабочих органов. Зазор между чистиком и диском батареи должен составлять 2...4 мм. При индивидуальном размещении рабочих органов используются жесткие или упругие стойки. Так, расстояние между рабочими органами дисковых плугов должно составлять 600 мм [63]. Использование прямолинейных пластин с криволинейной режущей кромкой исключает проскальзывание режущей кромки [154].

Повышение технологической надежности дисков обеспечивается при оптимизации формы поверхности с учетом устойчивого скольжения пласта при его подъеме с учетом работы на заданной глубине и с определенным углом атаки.

### **3.3 Рабочие органы культиваторов**

Рабочие органы культиваторов, выполняющие при уходе за парами и пропашными культурами поверхностную обработку почвы [187], подразделяются на подрезающие, вычесывающие, присыпающие, органы специального назначения. К вычесывающим рабочим органам, которые

предназначены для рыхления почвы на глубину до 25 см [217], относят оборотные, копьевидные, долотообразные рыхлительные лапы. Обратные и копьевидные лапы на жестких стойках используются для глубокого рыхления на культиваторах - рыхлителях. Обратные лапы на пружинных стойках используются для предпосевного рыхления почвы и уничтожения корневищных сорняков путем их вычесывания на поверхность поля.

Вылет носка, радиус кривизны передней поверхности, форма поперечного сечения являются основными конструктивными параметрами долотообразной лапы. Радиус кривизны передней поверхности должен обеспечивать наилучшее крошение, беспрепятственное перемещение почвы от режущей кромки носка к остову.

Предложено иметь два типоразмера рыхлителей для работы на сухих и влажных почвах для глубокого рыхления в пределах 16...20 см. В данном случае вылет носка может составлять 110 мм или 205 мм [187]. Радиус кривизны передней поверхности долотообразных лап зависит от вылета стойки и может быть равен 123 мм или 250 мм. Угол между касательной к носку и дном борозды первоначально составляет  $35^{\circ}$ ... $40^{\circ}$ , а затем, постепенно, величина возрастает до  $90^{\circ}$ . Такой угол у поверхности поля не увеличивает тягового сопротивления лапы, так как лапа (или стойка) движется в уже разрыхленной почве [200].

Процесс взаимодействия долотообразной лапы включает работу носка [99], где преобладают напряжения смятия, и работу передней поверхности, при движении по которой пласт испытывает действие нормальных и касательных напряжений.

При работе плоскорежущей или универсальной стрелчатой лапы лезвие носка груди будет испытывать напряжения смятия, носок и грудь - нормальные и касательные напряжения. Крылья стрелчатой лапы будут деформировать пласт за счет нормальных напряжений косоугольного изгиба.

Значение сопротивления и тягового усилия, необходимое орудиям для

дополнительной обработки почвы с пассивными рабочими органами [60], представлены в таблице 3.3.1.

Копьевидная и оборотная культиваторная лапа, в силу своей симметричности, совершает колебания в направлении движения агрегата, что приводит к снижению энергоемкости и повышению технологической надежности, проявляющейся в виде улучшения схода сорняков с поверхности рабочего органа.

Известны работы О. В. Верняева, где работа стрелчатой лапы сопровождается колебанием режущего рабочего органа вокруг стойки за счет механизма активного привода. Данное направление поддержано учеными американского Национального института сельскохозяйственного машиностроения. Тяговое сопротивление активной лапы шириной захвата 610 мм и амплитудой колебания  $8^\circ$  меньше на 30% в сравнении с пассивным аналогом [22].

Работа плоскорезущей лапы с переменным углом крошения также способствует снижению энергоемкости взаимодействия за счет сочетаний деформаций изгиба и кручения [134]. К недостаткам выше указанной лапы можно отнести то, что конструкция крыла лапы не учитывает возможность работы ее лезвия режущей кромки в совместном режиме смятия и растяжения пласта.

В случае, если лезвие режущей кромки левого и правого крыла лапы отклонено от дна борозды в сторону дневной поверхности поля на угол, достаточный для преодоления упругих деформаций при минимальных значениях силы трения [172], то в процессе работы режущая кромка и лезвие правого, левого крыла работают на смятие и растяжение, а непосредственно крылья лапы на изгиб и кручение, что приведет к снижению энергоемкости при обработке.

Реализация движения режущего рабочего органа в созданной сети опережающих трещин возможна при использовании в стрелчатых лапах накладного элемента в виде заостренного бруса [160]. Накладной элемент, вынесенный вперед, создает сеть опережающих трещин, что способствует снижению энергоемкости взаимодействия. Снижение энерго-

емкости при работе долотообразных лап также возможно при применении выдвижного носка [169].

Таблица 3.3.1

Сопротивление и тяговое усилие, необходимое орудиям для дополнительной обработки почвы с пассивными рабочими органами

Орудие		Тяговое усилие в расчете на 1 м ширины захвата, кг	Удельная масса на один зуб, кг	Сопротивление в расчете на		Необходимое тяговое усилие, кВт/м
				один рыхлительный элемент, Н	на 1 м ширины захвата, Н	
Зубовая борона	легкая	15 - 20	0,75 - 1	15 - 25	300 - 500	1,0 - 2,5
	средняя	25 - 40	1,25 - 2	25 - 40	500 - 800	2,5 - 4,0
	тяжелая	50 - 60	2,5 - 3	40 - 60	800 - 1200	4,0 - 6,0
Борона	с жесткими зубьями	50 - 60	2,5-3	50 - 70	1000 -1400	5,0 -7,0
	с пружинными зубьями	40 - 65	2,0 - 3	50 - 80	1000 -1600	5,0 - 8,0
Дисковая борона	односледовая	150 -180	18,0 - 22,5	150 -250	1200 -2000	4,0 -7,0
	легкая двухследовая	180 - 220	22,5 - 27,5	187 - 275	1500 - 2200	5,0 - 8,0
	тяжелая двухследовая	230 - 280	28,5 - 35	225 - 310	1800 - 2500	6,0 - 9,0
Рыхлитель роторного типа		70 -100			900 - 1200	5 - 7
Культиватор легких для обработки узких междурядий	при глубине обработки 5 см	240 -250	23-25	150-220	1500-2200	5,0 - 7,0
	при глубине обработки 10 см	230 - 250	23-25	250-360	2700-3600	8,0 -11,0
	при глубине обработки 15 см	230 - 250	23-25	350-450	3500-4500	12,0 -16,0
Каток для крошения почвы		200 - 400		$(0,15 \dots 0,3) \times G$	600 - 900	4 - 6

Оптимизация условий функционирования заключается в обосновании угла крошения в начале крыла универсальной стрелчатой лапы с учетом гранулометрического состава обрабатываемой почвы. Также, с целью облег-

чения подъема пласта на грудь стрелчатой лапы Жуком А.Ф. было предложено, чтобы угол подъема прямолинейного участка груди не превышал  $16^\circ$ , а центр радиуса изгиба груди был расположен на вертикали, проходящей через носок лапы [146].

К мероприятиям, повышающим эксплуатационную надежность рабочих органов культиваторов, относят и термомодеформационное воздействие на тыльную сторону режущей кромки [156]. При более мягком верхнем слое будет создаваться эффект самозатачивания.

Повышение технологической надежности, в частности для долотообразных лап, заключается в оптимизации формы передней поверхности, что позволяет работать на почвах с различным гранулометрическим составом и влажностью. Для обеспечения движения и схода сорняков с культиваторных лап было предложено выполнять лезвие криволинейным, кривизна которой изменялась по закону логарифмической спирали [150, 214, 215, 15]. Или же совокупностью сопряженных отрезков логарифмической спирали [141, 194]. Плоский режущий контур культиваторной лапы обеспечивает устойчивость глубины хода [189].

Универсализация рабочих органов, в частности для долотообразных лап заключается в виде дополнительного размещения боковых рыхлителей [173], натянутых струн [164], использование их при посеве [161], внесении удобрений [174] и ядохимикатов [149]. Для стрелчатых лап предложено в зависимости от вязкости обрабатываемой почвы изменять угол раствора крыльев [140]. С целью дополнительного крошения пласта на стрелчатой лапе культиватора могут быть размещены прутки с круглым сплошным сечением [170].

#### **4. Элементы теории почворежущих рабочих органов**

В основе теории взаимодействия рабочих органов с почвой лежит теория клина и теория разрушения почвы [180]. При анализе теоретических моделей, на наш взгляд, должно быть отражено пять важнейших моментов: что является выходным параметром модели; как представлены геометрические парамет-

ры рабочего органа; как в модели отражена динамичность воздействия и деформационность почвы; как в модели представлен объект обработки?

Выходным параметром модели может быть тяговое сопротивление, работа сил резания [71], напряженно - деформированное состояние почвы, размер тела скольжения. К геометрическим параметрам, косвенно, можно отнести массу почвы, вовлекаемую в деформацию, размеры сечения обрабатываемого пласта, угол резания, форму кривой рабочей поверхности. Динамичность воздействия можно оценить модулем упругости первого рода, скоростью воздействия, силой инерции, временем воздействия. К деформационным признакам следует отнести угол скалывания и излома, коэффициент сопротивления деформации. Почва может быть представлена углами внешнего и внутреннего трения, твердостью, влажностью, удельным весом, плотностью обрабатываемого слоя.

#### 4.1 Элементы теории клина

В почвообработке [63] различают два вида резания: резание клином и резание лезвием. При резании лезвием определяющее воздействие оказывает лезвие. При резании клином определяющее воздействие оказывает рабочая грань. В выражении горизонтальной составляющей тягового сопротивления клина геометрические параметры представлены углом резания, длиной и шириной клина, его глубиной хода. Динамичность воздействия - квадратом скорости, почва - плотностью, углом внешнего трения.

$$R_x = v^2 \times \sin(\alpha) \times H \times b \times \rho \times \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{внеш}}) + H \times b \times l_{\text{нк}} \times \rho \times g \times \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{внеш}}), \quad (4.1.1)$$

где  $l_{\text{нк}}$  - длина рабочей поверхности клина, м;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Известно выражение, где [202] усилие тяги клина определено с учетом теоретических предпосылок о пассивном давлении на подпорные стенки в

условиях предельного равновесия

$$P = \frac{A_0 \times b \times H}{\cos \varphi_{\text{внутр}} \times \sin \psi} \times \left( \frac{\gamma \times H}{2} + c \times \text{tg} \varphi_{\text{внутр}} \right), \quad (4.1.2)$$

где  $A_0$  - коэффициент, учитывающий взаимодействие клина с почвой;

$c$  - коэффициент сцепления почвы.

Почва, как объект обработки, представлена углом внутреннего трения, коэффициентом сцепления, объемным весом. Деформационность - углом скалывания.

В зависимости от гранулометрического состава и задерженности обрабатываемого пласта почвенные элементы могут образовываться [128] путем скалывания (рис. 4.1.1) или путем излома (рис. 4.1.2). Процесс образования является периодичным.

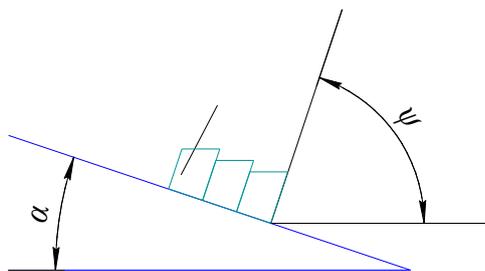


Рис. 4.1.1. Образование тел скольжения путем скалывания

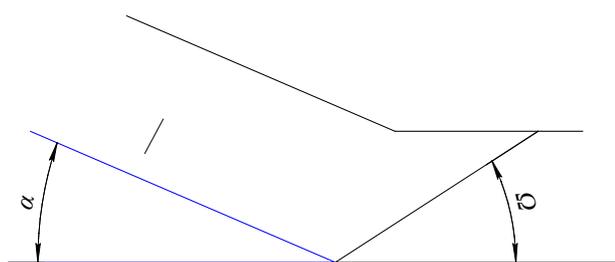


Рис. 4.1.2. Образование тел скольжения путем излома

Тяговое сопротивление клина при разрушении почвы путем скалывания

$$P = K_1 \times \left( f_1 + \frac{f_2 \times H}{\xi \times b} \right) \times h \times l + K_2 \times \left( f_3 + \frac{f_4 \times H}{b} \right) \times \frac{H}{b}, \quad (4.1.3)$$

где  $K_1$  - удельное сопротивление почвы на чистый сдвиг, Па;

$K_2$  - удельное сопротивление почвы на срез, Па;

$f_1$  - усилие скалывания пласта относительно его подошвы, Н;

$f_2$  - усилие скалывания пласта относительно его стенок, Н;

$f_3$  - усилие подрезания пласта относительно его подошвы, Н;

$f_4$  - усилие подрезания пласта относительно его стенок, Н.

Усилие скалывания пласта относительно его подошвы

$$f_1 = \frac{2 \times \sin \alpha}{\sin \psi \times [a_{\text{вс}} \times \sin(\psi + \alpha) + b_{\text{вс}} \times \cos(\psi + \alpha)]},$$

где  $a_{\text{вс}}, b_{\text{вс}}$  - коэффициенты, отражающие зависимость между углами внешнего и внутреннего трения.

$$a_{\text{вс}} = 1 - \operatorname{tg} \varphi_{\text{внутр}} \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{внеш}};$$

$$b_{\text{вс}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{внутр}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{внеш}}.$$

Угол скалывания пласта относительно его стенок

$$f_2 = \frac{2 \times \eta_{\text{под}} \times \sin(\varphi_{\text{внеш}} + \alpha) \times \sin \gamma_n}{\sin \alpha \times \cos \Theta_{\alpha\gamma} \times \sin \psi \times [a_{\text{вс}} \times \sin(\alpha + \gamma_n) + b_{\text{вс}} \times \cos(\Theta_{\alpha\gamma} + \gamma_n)]},$$

где  $\gamma_n$  - угол сдвига пласта (угол, образованный направлением движения клина и линией лезвия), град.;

$\eta_{\text{под}}$  - величина предельной относительной деформации;

$\Theta_{\alpha\gamma}$  - угол соответствия приращения угла  $\alpha$  на угол  $\gamma$ .

$$\Theta_{\alpha\gamma} = \arccos \left( 0,5 + 0,5 \times \sqrt{1 + \frac{1}{\left( \frac{b_{\text{вс}} + a_{\text{вс}} \times \operatorname{tg} \gamma_n}{a_{\text{вс}} - b_{\text{вс}} \times \operatorname{tg} \gamma_n} \right)^2}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Предельная относительная деформация пласта при скалывании

$$\eta_{\text{под}} = 1 - \frac{e^{\alpha_{\text{мин}} \times \text{tg} \varphi_{\text{внеш}}} \times \cos(\alpha_{\text{мин}} + \varphi_{\text{внеш}})}{\cos \varphi_{\text{внеш}}},$$

где  $\alpha_{\text{мин}}$  - минимальный угол резания клина, при котором пласт почвы сходит с клина не слитным, а разрушается путем скалывания.

Для среднесуглинистых почв данный угол имеет значение 8...15 град..

$$\xi = \frac{[a_{\text{вс}} \times \sin(\Theta_{\alpha\gamma} + \gamma_n) + b_{\text{вс}} \times \cos(\Theta_{\alpha\gamma} + \gamma_n)] \times \cos \Theta_{\alpha\gamma} \times \cos \varphi_{\text{внутр}}}{(1 - \text{tg}^2 \varphi_{\text{внутр}}) \times \cos^2 \left( 45 - \frac{\varphi_{\text{внутр}}}{2} \right) \times \cos \gamma_n}.$$

Для разрушения пласта путем излома формула тягового сопротивления имеет вид

$$P = \sigma_p \times \left( \Phi_1 + \frac{\Phi_2 \times H}{\xi \times b} \right) \times H \times b + K_2 \times \left( f_3 + \frac{f_4 \times H}{b} \right) \times H \times b, \quad (4.1.4)$$

где  $\sigma_p$  - предел прочности почвы на растяжение, Па;

$\Phi_1, \Phi_2$  - коэффициенты.

$$\Phi_1 = \frac{\sin^2 \alpha}{\sin \Omega_{cp} \times \left( 2 \times \mu_{\text{под}} \times \sin \Omega_{cp} + \sin \alpha \times \left[ \cos(\Omega_{cp} + \alpha) - \text{tg} \alpha \times \sin(\Omega_{cp} + \alpha) \right] \right)},$$

$$\Phi_2 = \frac{\eta_{\text{под}} \times \sin(\Omega_{cp} + \alpha) \times \cos \varphi_{\text{внутр}}}{0,93 \times \sin \Omega_{cp} \times \sin \alpha}.$$

Среднее значение угла наклона плоскости излома к направлению перемещения клина

$$\Omega_{cp} = \frac{45^\circ + \Omega}{2}.$$

Угол излома

$$\Omega = \arccos \left( 0,5 + 0,5 \times \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{a_1}{b_1}\right)^2}} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$a_1 = 2 \times \mu_{\text{под}} - \sin^2 \alpha - 0,5 \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{внеш}} \times \sin 2\alpha,$$

$$b_1 = 0,5 \times \sin 2\alpha - \operatorname{tg} \varphi_{\text{внеш}} \times \sin^2 \alpha.$$

Предельная относительная деформация пласта при изломе

$$\mu_{\text{под}} = 1 - \frac{e^{\alpha \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{внеш}}} \times \cos(\alpha + \varphi_{\text{внеш}})}{\cos \varphi_{\text{внеш}}}.$$

Существуют следующие критерии соответствия, при котором пласт будет разрушаться путем излома или скалывания. При

$$\frac{K_1 \times f_1}{\sigma_p \times \Phi_1} \geq 1, \quad (4.1.5)$$

пласт почвы будет разрушаться путем излома. При

$$\frac{K_1 \times f_1}{\sigma_p \times \Phi_1} \leq 1, \quad (4.1.6)$$

пласт будет разрушаться путем скалывания.

Деформационность почвы выражена углами скалывания и излома, величиной предельной относительной деформации пласта. Почва представлена углами внешнего и внутреннего трения, значением плотности, предельным напряжением на разрыв. Геометрические параметры отображаются углом резания, объемом деформируемой почвы. Динамичность воздействия не отражена.

В теории, представленной Осадчим П.П., однозначно показано разделение режимов скалывания и излома пласта. Хотя при работе лемеха как двойного деформатора идет износ и лезвия, и его поверхности. Здесь налицо совмещение операций скалывания и излома пласта при случайном характере вида деформации почвы [72].

#### 4.2 Тяговое сопротивление В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина

Основоположник земледельческой механики академик В. П. Горячкин предложил следующее выражение для определения тягового сопротивления плуга [192, 20, 63, 222, 37], которое учитывает затраты энергии на полезную работу, сообщение пласту кинетической энергии и преодоление сил сопротивления

$$P = f_{\text{внеш}} \times G + k_0 \times H \times b \times n + \varepsilon \times H \times b \times v^2 \times n, \quad (4.2.1)$$

где  $P$  - тяговое сопротивление, Н;

$f_{\text{внеш}}$  - коэффициент внешнего трения;

$G$  - вес плуга, Н;

$k_0$  - коэффициент деформации почвы, Н/м<sup>2</sup>;

$H$  - толщина деформируемого почвенного пласта, м;

$b$  - ширина захвата деформатора, м;

$v$  - скорость движения, м/с;

$\varepsilon$  - коэффициент затрат энергии на отбрасывание пласта, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  - число корпусов.

Н.В. Щучкиным [20] предложена следующая формула для определения тягового сопротивления

$$P = f_{\text{внеш}} \times G + m_{\text{д}} \times T_{\text{ср}} \times H \times b \times n, \quad (4.2.2)$$

где  $m_{\text{д}}$  - коэффициент, отражающий соотношение между удельным сопротивлением почвы и ее твердостью;

$T_{\text{ср}}$  - средняя твердость пахотного слоя, МПа.

Использование величины твердости суглинистой почвы в зависимости от значений абсолютной влажности позволяет использовать формулу Н.В. Щучкина в качестве экспертного выражения, оценивающего величину тягового сопротивления модернизируемых почвообрабатывающих рабочих органов.

В формуле Н.В. Щучкина геометрические параметры также представлены размерами сечения деформируемого пласта [208]. Почва отражена значением средней твердости. Деформационность пласта выражена через произведение коэффициента  $m_d$  и величины твердости почвы. При отсутствии прилипания почвы к рабочим частям плуга коэффициент  $m_d = 0,014$ .

Г. Н. Синеоков предложил [6] следующую формулу для определения тягового сопротивления плужных почвообрабатывающих орудий

$$P = m_n \times (G + R_z) + f \times R_y + R_x, \quad (4.2.3)$$

где  $m_n$  - коэффициент перекачивания опорного колеса;

$R_z, R_y, R_x$  - вертикальная, боковая, горизонтальная составляющие тягового сопротивления, Н.

Боковая составляющая

$$R_y = \frac{1}{3} R_x. \quad (4.2.4)$$

Вертикальная составляющая

$$R_z = 0,25 \times R_x. \quad (4.2.5)$$

Горизонтальная составляющая

$$R_x = k_o \times H \times b \times n. \quad (4.2.6)$$

Формула Г. Н. Синеокова отражает деформационность почвы через ко-

ээффициент деформации, а почва, как объект обработки, выражена с помощью угла внешнего трения.

Известна также формула В.В. Кацыгина

$$P = f_{\text{внеш}} \times G + k_{\rho} \times H \times b \times n + \varepsilon \times H \times b \times v^2 \times n \times \left[ 1 + \left( \frac{2 \times \varepsilon}{\rho} \right) \times \left( \frac{v}{2 \times u} \right)^2 \right], \quad (4.2.7)$$

где  $u$  - скорость распространения напряжений в почве, м/с;

$\rho$  - плотность почвы до деформации, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость распространения напряжений в почве

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4.2.8)$$

где  $E$  - модуль упругости первого рода, Па.

В целом, в формуле В.В. Кацыгина геометрические параметры рабочего органа также представлены размерами поперечного сечения пласта. А динамичность воздействия выражена скоростью движения плуга и распространения напряжений в почве.

Таким образом, в формулах В.П. Горячкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина Н.В. Щучкина выходным параметром является тяговое сопротивление, геометрические параметры плужного корпуса отображены размерами поперечного сечения пласта, динамичность воздействия представлена скоростью пахотного агрегата и распространения волн напряжений. Деформационность почвы выражена через коэффициент деформации, отражающий сложный характер нагружения почвенного пласта в момент его движения по лемешно - отвальной поверхности почвообрабатывающего орудия. Почва, как объект обработки, учтена углом внешнего трения, плотностью.

Выражения В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина не позволяют учитывать возможные изменения конструкции лемеха или отвала, так как фактически не описывают движения пласта по поверхности.

### 4.3 Тяговое сопротивление А.Т. Вагина

В тоже время достаточно полно описывает процесс взаимодействия почвенного пласта с лемешно - отвальной поверхностью теоретические разработки А.Т. Вагина [19].

Известно также выражение для определения тягового сопротивления лемеха [19]

$$P_{\text{лем}} = P_{\text{лем}}^{\text{л}} + P_{\text{лем}}^{\text{с}} + P_{\text{лем}}^{\text{дв}}, \quad (4.3.1)$$

где  $P_{\text{лем}}^{\text{л}}$  - тяговое сопротивление внедренного лезвия лемеха, Н;

$P_{\text{лем}}^{\text{с}}$  - тяговое сопротивление при сдвиге пласта лемехом, Н;

$P_{\text{лем}}^{\text{дв}}$  - тяговое сопротивление на преодоление динамического воздействия лемеха, Н.

Данное выражение позволяет определить тяговое усилие одностороннего косоугольного клина при воздействии на выступ, открытый с одной стороны.

Тяговое усилие внедренного лезвия лемеха

$$P_{\text{лем}}^{\text{л}} = N_{\text{плл}} \times \sqrt{1 + f_{\text{внеш}}^2} \times \sin(\gamma + \varphi_{\text{внеш}}), \quad (4.3.2)$$

где  $N_{\text{плл}}$  - сила нормального давления почвы на лезвие лемеха, Н;

$\varphi_{\text{внеш}}$  - угол внешнего трения почвы, град.;

$\gamma$  - угол между лезвием лемеха и стенкой борозды, град.

Тяговое усилие при сдвиге пласта лемехом

$$P_{\text{лем}}^{\text{с}} = S_2 \times [\cos \psi_1 \times \sin \gamma + f_{\text{внеш}} \times \sin(\alpha + \psi_1) \times \cos \alpha' \times \cos \Theta'], \quad (4.3.3)$$

где  $S_2$  - усилие сдвига пласта, Н;

$\psi_1$  - угол сдвига, град.;

$\alpha$  - угол наклона лемеха ко дну борозды в ортогональном сечении, град.;

$\alpha'$  - действительный угол подъема пласта, град.;

$\Theta'$  - угол отклонения пласта на лемехе в горизонтальной плоскости от продольно - вертикальной плоскости, град..

Действительный угол подъема пласта

$$\alpha' = \arcsin(\sin \alpha \times \sin \gamma). \quad (4.3.4)$$

Величина подъема центра тяжести пласта

$$h'_{cp} = \sqrt{H^2 + b^2} - \frac{H + b}{2}. \quad (4.3.5)$$

Касательное напряжение в плоскости сдвига

$$\tau = \frac{\sigma_{сж}}{2}, \quad (4.3.6)$$

где  $\tau$  - касательное напряжение, Па;

$\sigma_{сж}$  - предел прочности почвы при сжатии, Па.

Предел прочности почвы при сжатии определяется экспериментальным путем. Характеризует почву определенного гранулометрического состава и зависит в основном от значений абсолютной влажности почвы.

Угол сдвига определяется из следующего выражения

$$\sin \psi_1 \times \left[ \frac{\sin(\alpha' + \psi_1)}{\cos(\alpha' + \varphi_1 + \psi_1)} + \cos(\alpha' + \psi_1) \right] = \frac{[\tau] \times \sin \alpha'}{\varepsilon_1 \times \gamma_{ос} \times h_{cp} \times (\sin \alpha' + f_{внеш} \times \cos \alpha')}, \quad (4.3.7)$$

где  $\varepsilon_1$  - коэффициент усадки пласта;

$\gamma_{ос}$  - объемный вес почвы, Н/м<sup>3</sup>.

Площадь сдвига рассчитывается с учетом коэффициента отношений.

Коэффициент отношений первого рода

$$k_1 = \frac{b}{H}. \quad (4.3.8)$$

Коэффициент отношений второго рода

$$k_2 = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \psi_1}. \quad (4.3.9)$$

При выполнении следующего условия  $k_1 \leq k_2$  площадь сдвига

$$F_2 = \frac{b^2}{\sin \gamma \times \cos \psi_1}. \quad (4.3.10)$$

В случае, если  $k_1 \geq k_2$ , то площадь сдвига равна

$$F_2 = \frac{h_0}{\sin \gamma \times \sin \psi_1} \times \left( b - \frac{h_0 \times \cos \gamma}{2 \times \operatorname{tg} \psi_1} \right). \quad (4.3.11)$$

Угол отклонения пласта на лемехе от продольно вертикальной плоскости в горизонтальной плоскости

$$\Theta' = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\left( 1 - \cos \left( \frac{90 + \alpha}{2} \right) \right) \times \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma \times \cos \left( \frac{90 + \alpha}{2} \right)} \right]. \quad (4.3.12)$$

Усилие сдвига

$$S_2 = [\tau] \times F_2. \quad (4.3.13)$$

Тяговое усилие на преодоление динамического воздействия пласта на лемех

$$P_{\text{лем}}^{\text{об}} = \frac{\gamma}{g} \times F_1 \times v^2 \times \sin \Theta_0 \times \cos \psi_1 \times (1 - i_{\text{max}}) \times \dots \quad (4.3.14)$$

$$\left[ \sin \Theta_0 \times \cos \psi_1 + f \times \sin(\delta + \psi_1) \times \cos \alpha' \times \cos \Theta' \right],$$

где  $i_{\text{max}}$  - максимальный коэффициент усадки пласта.

Данная величина равна

$$i_{\text{max}} = \frac{\operatorname{tg} \psi_1}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi_1)}. \quad (4.3.15)$$

Тяговое сопротивление, затрачиваемое на перемещение пласта по отвалу, равно

$$P_o = P_{\text{под}} + P_u + P_{\text{сн}},$$

где  $P_{\text{под}}$  - составляющая на подъем пласта, Н;

$P_y$  - составляющая от действия центробежной силы, Н;

$P_{снл}$  - составляющая сил сопротивления пласта изгибу при его обороте, Н.

Составляющей сил сопротивления пласта изгибу при его обороте для старопахотных минеральных земель можно пренебречь.

Усилие, затрачиваемое на подъем пласта

$$P_{под} = G_{пл} \times (\sin \alpha_{пол} + f_{внеш} \times \cos \delta_{ср}) \times \cos \alpha_{пол} \times \cos \Theta',$$

где  $G_{пл}$  - вес пласта на лемешно - отвальной поверхности, Н;

$\alpha_{пол}$  - угол наклона полевого обреза лемеха ко дну борозды, град.;

$\delta_{ср}$  - среднее значение угла наклона отвала ко дну борозды в ортогональном сечении, град..

Вес пласта почвы на лемешно - отвальной поверхности

$$G_{пл} = \eta_n \frac{\gamma_{ос} \times h_n \times b^2}{2 \times tg \gamma}, \quad (4.3.16)$$

где  $h_n$  - толщина пласта на лемешно - отвальной поверхности, м;

$\eta_n$  - коэффициент, учитывающий увеличение веса пласта по сравнению с плоским клином.

Среднее значение угла наклона отвала ко дну борозды

$$\delta_{ср} = \frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2}.$$

Составляющая от действия центробежной силы

$$P_y = \frac{G_{пл} \times v^2}{g \times 2,5 \times \rho_0} \times \left( \sin \left( \frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2} \right) \times \sin \gamma_{ср} + f_{внеш} \times \cos \alpha_{пол} \times \cos \Theta' \right),$$

где  $\rho_0$  - радиус кривизны поверхности плуга в ортогональном сечении, м;

$\gamma_{cp}$  - среднее значение угла наклона образующей отвала к стенке борозды, град..

Среднее значение угла наклона образующей к стенке борозды

$$\gamma_{cp} = \frac{\gamma_{max} + \gamma_{min}}{2},$$

где  $\gamma_{max}$  - максимальный угол наклона образующей отвала к стенке борозды, град.;

$\gamma_{min}$  - минимальный угол наклона образующей отвала к стенке борозды, град..

В теоретической модели А.Т. Вагина выходным параметром является величина тягового сопротивления. Геометрические параметры учтены глубиной обработки, шириной захвата плужного корпуса, углом резания, радиусом кривизны поверхности отвала. Также присутствует угол между лезвием лемеха и образующей отвала к стенке борозды, полевого обреза лемеха ко дну борозды. Деформационность почвы представлена углами сдвига и отклонения пласта на лемехе в горизонтальной плоскости от продольно - вертикальной плоскости, коэффициентом усадки пласта. Динамичность воздействия отражена скоростью плуга. Почва как объект обработки представлена углом внешнего трения, допускаемым напряжением на сжатие, удельным весом.

Теоретические положения А.Т. Вагина достаточно полно описывают процесс взаимодействия почвенного пласта с лемешно - отвальной поверхностью. Тем не менее, в данных теоретических положениях не отражена методика расчета нормальной силы на лезвие лемеха, возможные величины разного удельного давления на поверхности отвала. Угол резания представлен постоянной величиной.

#### **4.4 Элементы теории сферического диска**

К основным геометрическим параметрам диска относят его диаметр  $D$ , радиус сферы  $R$ , половину угла  $\varphi$  при вершине сектора диска. К дополнительным - угол образующей конуса заточки  $\omega$  и угол заострения  $i$  (рис. 4.4.1).

Глубина заглабления и диаметр дискового рабочего органа связаны между собой следующим соотношением

$$H = \frac{D}{k_{HD}}, \quad (4.4.1)$$

где  $k_{HD}$  - коэффициент соответствия глубины обработки и диаметра диска.

Для плугов коэффициент соответствия глубины обработки и диаметра диска составляет  $k_{HD} = 3...4$ , для борон  $k_{HD} = 4...6$ , для луцильников  $k_{HD} = 6...8$ . Большие значения  $k_{HD}$  принимают при обработке твердых почв при малых углах атаки, больших скоростях работы орудия [1].

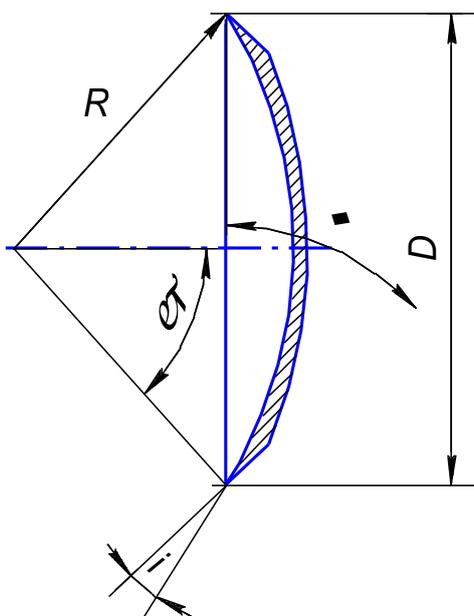


Рис. 4. 4. 1. Геометрические параметры диска

Половина центрального угла сферического сектора для дисковых плугов составляет  $\varphi = 31...37^\circ$ , луцильников -  $\varphi = 26...32^\circ$ , борон -  $\varphi = 22...26^\circ$ . Радиус сферы диска, являясь постоянной величиной, определится как

$$R = \frac{D}{2 \times \sin \varphi}, \quad (4.4.2)$$

где  $\varphi$  - половина угла при вершине сектора диска, град..

Выбор величины половины центрального угла является субъективной величиной, не зависит от угла атаки, в том числе максимального, и глубины хода дисковых рабочих органов.

С учетом соотношения глубины обработки и диаметра диска, угла атаки [72, стр.138] радиус сферы диска

$$R = \frac{D}{k_{HD}} \times \sqrt{\frac{k_{HD} - 1}{\sin^2 \zeta}} + (0,5 \times k_{HD} - 1)^2, \quad (4.4.3)$$

где  $\zeta$  - угол атаки, град..

Длина хорды погружения диска

$$D_H = 2 \times \sqrt{H \times (D - H)}. \quad (4.4.4)$$

Угол образующей конуса заточки, соответствующий хорде погружения диска

$$\omega_H = \zeta - \varepsilon_H, \quad (4.4.5)$$

где  $\omega_H$  - угол образующей конуса заточки, соответствующий хорде погружения диска, град.;

$\varepsilon_H$  - затылочный угол, соответствующий хорде погружения диска, град..

Угол образующей конуса заточки

$$\omega_o = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \omega_H \times D}{D_H}\right). \quad (4.4.6)$$

Половина центрального угла при вершине конуса

$$\varphi = \omega_o - i, \quad (4.4.7)$$

где  $i$  - угол заострения, град..

Составляющая силы сопротивления диска зависит от конструктивных параметров, режимов работы рабочих органов, в частности угла атаки, физико - механических свойств почвы [26].

Теоретическими исследованиями установлено, что на сферический диск действует горизонтальная  $R_x$ , боковая  $R_y$ , вертикальная  $R_z$  составляющие тягового сопротивления рабочего органа [240].

Тяговое сопротивление диска

$$P_o = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}, \quad (4.4.8)$$

где  $P_o$  - тяговое сопротивление диска, Н.

Тяговое сопротивление дисковой батареи

$$P = q \times B_o, \quad (4.4.9)$$

где  $q$  - удельное тяговое сопротивление на 1 м ширины захвата, Н/м;

$B_o$  - ширина захвата дисковой батареи, м.

Удельное тяговое сопротивление дисковых луцильников на 1 м ширины захвата составляет  $q = 1500...2400$  Н/м. Тяговое сопротивление двух следовых полевых и садовых борон на 1 м ширины захвата  $q = 2000...3000$  Н/м.

Горизонтальная составляющая тягового сопротивления

$$R_x = P \times \frac{\cos \varphi}{\sin(\zeta + \varphi)}. \quad (4.4.10)$$

Боковая составляющая

$$R_y = P \times \frac{\sin \varphi}{\sin(\zeta + \varphi)}. \quad (4.4.11)$$

Вертикальная составляющая

$$R_z = P \times m_{ок}, \quad (4.4.12)$$

где  $m_{ок}$  - опытный коэффициент.

Известно полиномиальное уравнение [79] тягового сопротивления диска дискатора А.С. Кушнарева, описывающее влияние угла атаки и крена диска на тяговое сопротивление при установленной скорости движения

$$P = 183,57 + 20,677 \times x_1 + 40,05 \times x_2 + 5,18 \times x^2 + 6,89 \times x_2^2 - 12 \times x_1 \times x_2. \quad (4.4.13)$$

В элементах теории дисковых борон величина тягового сопротивления, в основном, является экспериментальной величиной, учитывающей угол атаки и крена диска.

#### 4.5 Элементы теории рыхлителей

Радиус кривизны передней поверхности рыхлителя может быть обоснован теоретически на принципах и методах механики сплошных сред [9] или экспериментально. Основой теоретических методов лежат предпосылки Березанцева В.Г., где используется величина пассивного давления на подпорные стенки в условиях предельного равновесия среды.

В основе экспериментальных методов лежит возможность построения линий скольжения. Линия скольжения перед рабочим органом ограничивает блок почвы, участвовавший в деформации одного цикла. Значительный интерес представляет собой метод Одэ. Этот метод предполагает, что линия скольжения состоит из двух участков. Первый участок имеет форму логарифмической спирали. Вторым участком является прямая линия. Таким образом, поверхность бокового профиля имеет очертания логарифмической спирали с начальным углом резания

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi_{\text{внутр}}}{2}, \quad (4.5.1)$$

где  $\varphi_{\text{внутр}}$  - величина внутреннего угла трения, град.

Данное обстоятельство способствует тому, что деформации не распространяются ниже носка, элементарные реакции пересекают дневную поверхность поля, что способствует наилучшему качеству крошения.

Величина текущего полярного угла нижней кромки бокового профиля

$$\Theta_H = \frac{3}{2} \varphi_{\text{внутр}} - 45^\circ. \quad (4.5.2)$$

Величина полярного угла для определения верхней кромки бокового профиля рабочего органа

$$\Theta_B = 90 - \varphi_{\text{внутр}}. \quad (4.5.3)$$

Вылет носка лапы

$$L = h_0 \times \left( \operatorname{tg} \Theta_H + \frac{\cos \varphi_{\text{внутр}}}{e^{\Theta_H \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{внутр}}} \times e^{\Theta_H} \times \cos \Theta_H} \right). \quad (4.5.4)$$

Максимальное значение радиуса – вектора

$$r_{\max} = \frac{h_0}{\cos \Theta_H}. \quad (4.5.5)$$

Значение

$$L_1 = r_{\max} \times \sin \Theta_H. \quad (4.5.6)$$

Значение

$$L_2 = L - L_1. \quad (4.5.7)$$

Начальный радиус - вектор

$$r_0 = \frac{h}{e^{\Theta_H \times \operatorname{tg} \varphi} \times \cos \Theta_H}. \quad (4.5.8)$$

Таким образом, радиус кривизны передней поверхности учитывает угол внутреннего трения обрабатываемой почвы, что несколько сужает область применения рыхлительных долотообразных лап. А одним из приоритетных направлений модернизации рабочих органов является их пригодность работы в широком диапазоне почвенных условий [105].

Формула Короткевича [67] при условии равновесия силы выглубления и тягового сопротивления, суммарные сила нормального давления и трения учитывает геометрию рабочего органа через касательную к точкам профиля

$$P = b \times \int_0^s \sigma(x, y) \times (\sin \alpha + f \times \cos \alpha) \times ds, \quad (4.5.9)$$

где  $\sigma(x, y)$  - нормальное давление, являющееся функцией координат, Па.

При движении рыхлительной лапы происходит формирование плоскости скалывания [1]. Плоскость скалывания имеет формы трапеции. Ширина плоскости скалывания на поверхности почвы

$$B = b + \frac{2 \times H \times \operatorname{tg}(\psi / 2)}{\cos(\alpha + \varphi)}, \quad (4.5.10)$$

где  $\psi$  - угол скалывания почвы, град..

Угол скалывания при работе рыхлительной лапы [192]

$$\psi = 90^\circ - \frac{\alpha + \varphi_{\text{внеш}} + \varphi_{\text{внутр}}}{2}. \quad (4.5.11)$$

Оптимальная форма поперечного сечения может быть также получена через величину тягового сопротивления. По Миниху [113] общее тяговое сопротивление лобовой поверхности (рис. 1.1.2) определяется по следующему выражению

$$\bar{P} = \bar{R}_1 + \bar{R}_{\text{сж}} + \bar{F} + \bar{J} + \bar{F}_{\text{бок}}, \quad (4.5.12)$$

где  $\bar{R}_1$  - усилие на вдавливание и резание почвенного пласта, Н;

$\bar{R}_{сж}$  - усилие на сжатие пласта, Н;

$\bar{F}, \bar{F}_{бок}$  - силы трения сошника, Н;

$\bar{J}$  - силы инерции при работе сошника, Н.

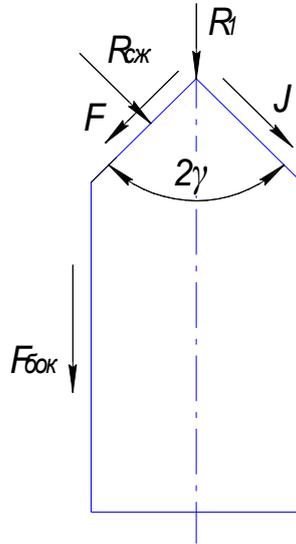


Рис.1.1.2. К определению тягового сопротивления сошника

В данном выражении динамичность работы сошника оценена силой инерции. Почва, как объект обработки, представлена силой внешнего трения, усилием на сжатие пласта.

Горизонтальная составляющая тягового сопротивления стрелчатой лапы

$$R_x = k_o \times H \times b. \quad (4.5.13)$$

Рекомендуется для стрелчатых лап культиватора удельное сопротивление почвы принимать в интервале 11...20кПа [67].

Таким образом, в теоретических моделях, описывающих взаимодействие стрелчатых и долотообразных лап, выходным параметром является тяговое сопротивление, ширина полосы скалывания. Почва, как объект обработки, представлена углами внутреннего и внешнего трения. Динамичность воздействия отражена через силы инерции. Геометрические параметры выражены через глубину хода, ширину рабочего органа, угол наклона касательной к кривой бокового профиля. Деформационность почвы представлена углом скалывания, удельным сопротивлением почвы.

#### 4.6 Теоретические аспекты крошения почвенного пласта

Основным показателем, характеризующим водно - воздушный режим, создаваемый почвообрабатывающими орудиями, является показатель крошения почвы [34]. Данный показатель в значительной степени определяет аэрационную и водоудерживающую способность почвы [196]. Оптимальные условия функционирования корневой системы растений обеспечены тогда, когда общее содержание воздуха в почве составляет 15 - 25% суммарного объема пор, а концентрация кислорода составляет 10 - 15% [74].

После основной обработки почвы в пахотном слое [109] должно содержаться 70% и более комков размеров менее 50 мм, а после предпосевной в слое 0 - 10 см - 70% и больше комков размером менее 25 мм. В тоже время многие исследователи за оптимальное крошение принимают такое, при котором пласт имеет 50% комков диаметром 1...10 мм и 50 % комков диаметром 10...50 мм. П.У. Бахтин считал, что очень хорошей считается такая пашня, когда в ней содержится 90...100% комков размером менее 50 мм и менее 5% пыли. Хорошей считается пашня, содержащая 70...90% и 5...10% пыли, удовлетворительной - 50...70% комков и более 20% пыли [182].

За счет рыхления происходит изменение размеров почвенных комков и расстояния между ними. В результате улучшаются водо - и воздухопроницаемость почвы, а также ее биологическая активность [61, стр.7]. Допустимое рыхление характеризуется содержанием почвенных частиц размером 1...10 мм и определяется коэффициентом рыхления

$$K_p = \frac{m_{1-10}}{m} \times 100\%, \quad (4.6.1)$$

где  $m_{1-10}$  - масса частиц размером 1...10 мм в пробе почвы, кг;

$m$  - масса пробы почвы, кг.

Одной из целей воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин является получение частиц почвы заданного размера в соответствии с

агротехническими требованиями [123]. Актуальным является вопрос о взаимосвязи размера частиц, свойств почвы, геометрии рабочего органа и его скорости воздействия на обрабатываемый пласт [88].

Существуют результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению степени крошения почвы. Так, при вспашке скорость движения агрегата является наиболее существенным фактором, влияющим на качество обработки почвы. Зависимость крошения от скорости движения плуга при вспашке и влажности почвы представляет собой кривую второго порядка [191, с. 168].

$$K_p = 0,954 \times v^2 + 6,9 \times v - 0,034 \times \omega^2 + 1,94 \times \omega + 97,47. \quad (4.6.2)$$

При скорости 2,22 м/с крошение определяется по выражению

$$K_p = 0,034 \times \omega^2 + 1,94 \times \omega + 64,7. \quad (4.6.3)$$

При взаимодействии рабочего органа с почвой, последняя, как объект обработки, испытывает напряженно - деформируемое состояние. Для пассивного и активного рабочего органа [21] идет формирование зоны внедрения и возмущенного состояния. Зона возмущенного состояния формирует тело скольжения. Тело скольжения распадается на частицы под действием накопленной потенциальной энергии [225].

Основным компонентом тела скольжения, образуемого по ходу движения вертикального профиля, является уплотненное ядро. Так, профессор В.Г. Березанцев выяснил, что уплотненное ядро приводит грунт в состоянии предельного равновесия. При этом образуется более удлиненная, неупругая часть ядра. В процессе погружения штампа положение вершины и ее очертания непрерывно изменяются, как бы выискивая направление наименьшего сопротивления для сдвига прилегающих к ядру масс грунта. Установление истинного направления движения частиц в грунте объясняет природу образования так называемых тел скольжения.

В.С. Казаковым предложено в 1997 году степень рыхления почвы оцени-

вать следующим выражением [63]

$$Q = \iint_S \operatorname{div} \bar{v} dF_{пч}, \quad (4.6.4)$$

где  $F_{пч}$  - площадь поверхности почвенных частиц, м<sup>2</sup>.

В основе теоретического обоснования крошения почвы лежит теория дробления или же массового разрушения твердых тел. Теория дробления, в свою очередь, базируется на двух энергетических теориях: поверхностной и объемной.

Поверхностная теория [112], сформулированная немецким ученым П. Риттингером (1867), исходит из того, что работа, необходимая для дробления тела, прямо пропорциональна величине вновь образовавшейся в результате дробления поверхности

$$A_{оп} = f(\Delta S). \quad (4.6.5)$$

Объемная теория разработана (1874) русским ученым В.Л. Кирпичевыми и немецким профессором Ф. Киком (1885). В данной теории отражается прямая пропорциональность между величиной работы, затраченной на дробление тела, и его объемом (массой).

$$A_{оп} = f(\Delta m). \quad (4.6.6)$$

Академик П.А. Ребиндер (1928) предложил оценивать работу измельчения следующим выражением

$$A_{оп} = f(\Delta S) + f(\Delta m). \quad (4.6.7)$$

Данное уравнение названо основным законом измельчения, который учитывает работу деформации над объемом (массой) и работу на образовании новых поверхностей. С учетом данного закона было предложено выражение для определения работы на дробление почвенных частиц при использовании ротационного плуга [235, с. 91]

$$A_{\text{др}} = \frac{\pi \times \sigma^2 \times D_{\text{кдр}}^2}{12 \times E} \times \lg \left( \frac{D_{\text{кдр}}^2}{d_{\text{кнр}}^2} \right), \quad (4.6.8)$$

где  $D_{\text{кдр}}$  - первоначальный диаметр комка почвы, поступающего на ротор, м;

$d_{\text{кнр}}$  - средневзвешенный диаметр почвенных частиц после разрушения комка почвы ротором, м.

В данном выражении основным моментом является то, что комки почвы имеют шарообразную форму [122]. Шарообразность почвенных частиц заимствована из теории фильтрации, которая пошла по пути построения упрощенных моделей реальной пористой среды [183]. В модели фиктивного грунта пористая среда представлена в виде множества шарообразных частиц одинакового размера. Все поры являются цилиндрическими. Расположены они параллельно друг другу. Все шарообразные частицы уложены во всем объеме одинаковым образом по элементам из восьми шаров. Наименее плотная укладка шаров - та, при которой центры восьми шаров помещаются в вершинах куба. Наиболее плотная укладка получается при расположении центров восьми шаров в вершинах ромбоэдра с углом ромба  $\alpha_p = 60^\circ$ .

Существует мнение, что энергоемкость обработки почвы находится в прямой зависимости от степени ее крошения. Однако [210] разделение пласта на отдельные фракции может быть достигнуто не только за счет разделения его по геометрическим размерам, обусловленным траекторией движения режущих рабочих органов, но и за счет случайных связей.

Несмотря на то, что в обоих случаях конечным результатом является степень крошения пласта, однако затраты энергии в первом случае будут значительно больше. Это объясняется тем, что почва неоднородна по своей структуре и в ней имеются многочисленные поры, пустоты, трещины. Участки с плотно упакованными частицами могут быть разделены областями, где частиц меньше и они не прилегают тесно друг к дру-

гу. Рыхлые участки снижают сопротивляемость почвы, так как не обеспечивают опору более плотным участкам [30, с. 21]. Кроме того, почвенные частицы не всегда расположены хаотично. Могут наблюдаться четко выраженные скопления параллельно расположенных пластинчатых почвенных частиц. Кроме того, корневая система растений проникает в почву, расчленяет и дробит ее. Происходит сдавливание почвенных частиц вокруг корня, сближение, слипание. Сумма всех пор и трещин образует сечение слабых связей.

Таким образом, на основании выше изложенного можно сделать следующий вывод. Теоретическое обоснование крошения почвы, с одной стороны, должно согласно поверхностной и объемной теории дробления тел, включать величину удельной потенциальной энергии, накопленной частицей, с другой стороны, в связи с наличием слабых связей и случайного вида деформации экспериментально определенный коэффициент рыхления почвы.

Специфика задач обработки почвы заключается в том, что ее результатом является не напряженно - деформируемое состояние [248, 247], а крошение [100], происходящее в почве под действием внешних сил за счет высвобожденной энергии [42]. Математическая модель поведения почвы под нагрузкой должна отражать этот эффект [35] с учетом геометрии рабочего органа [238, 246].

Известно выражение для определения длины тела скольжения [202]

$$l = \sqrt{\frac{A_0 \times H \times \left( \frac{\gamma \times H}{2} + c \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{внутр}} \right) \times 2 \times \cos \varphi_{\text{внеш}}}{q_{\text{см}} \times \sin \alpha \times \cos \alpha \times \cos \varphi_{\text{внутр}} \times \sin \psi}}, \quad (4.6.9)$$

где  $q_{\text{см}}$  - коэффициент объемного смятия, Н/см<sup>3</sup>.

Значение коэффициента  $A_0$  при  $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$  можно с достаточной точностью определить по формуле

$$A_0 = \left( \frac{\cos^2 \varphi_{\text{внутр}}}{1 - \sin \varphi_{\text{внутр}}} \right) \times e^{\left( \frac{3}{2} \pi - 2\psi + \varphi_{\text{внутр}} \right) \times \text{tg} \varphi_{\text{внутр}}}. \quad (4.6.10)$$

В данном случае, деформируемость почвы оценена углом скалывания и коэффициентом объемного смятия. Почва представлена углами внутреннего и внешнего трения, коэффициентом сцепления и объемным весом почвы. Геометрические параметры учитывают глубину обработки, ширину клина и угол резания. Динамичность воздействия не отражена.

Перспективным направлением решения этой задачи является использование метода конечных элементов [197]. Некоторые аспекты применимости МКЭ к задаче о поведении почвы под нагрузкой были уже рассмотрены [244, 237, 245]. Установлено, что для построения исходных уравнений (уравнений равновесия [32], геометрических и физических) достаточно использовать соотношение теории малых деформаций. Интегрирование дифференциальных уравнений с учетом аналитической постановки задачи сводится к решению системы линейных уравнений [117, 62, 45, 29].

Почва состоит из трех фаз. Поэтому говорить о ее сплошности, даже в нетронutom виде, можно только условно. С учетом этого, применительно к задачам почвообработки, вводится термин «квазисплошность» почвы. Квазисплошной можно считать и разрыхленную почву. Математическая модель, описывающая переход от квазисплошной нетронутой к квазисплошной разрыхленной почве, обладает элементом случайности.

Деформационная модель для упрощения алгоритма и его универсализации по отношению к моделям почвы должна быть адаптирована к оперированию только со стандартным блоком решения задач теории упругости. С учетом этого почва считается квазиоднородной, квазисплошной, изотропной, каждый элемент которой представляет упругое тело. А среда (почва) представляется константами упругости: модулем упругости первого рода  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Формирование матриц жесткости можно осуществить с помощью законов сопротивления материалов или же на основе теории упругости, которая относится к задачам механики деформируемого твердого тела. Данная задача формулируется следующим образом. Имеется тело, так или иначе закрепленное, или движущееся в пространстве, как функция координат и времени. Известны (заданы) внешние воздействия на тело. Под внешним воздействием обычно понимают силовое, температурное или другие воздействия. В систему искомых функций входят, как правило, компоненты вектора смещения, а также векторов деформаций и напряжений. Для формирования матрицы жесткости необходимо задание значений модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ . Задача построения матрицы жесткости включает четыре этапа: определение поля перемещений, напряжений, деформаций и потенциальной энергии [205].

Матрица жесткости для элементарного элемента при наличии перемещения узловых точек, чаще всего для треугольника, позволяет рассчитать напряженное состояние для узла в целом.

## 5. Заключение

К основным физико - технологическим показателям, описывающим процесс взаимодействия почворезущего рабочего органа с деформируемым пластом, можно отнести те параметры, которые отражают саму почву как объект обработки, ее деформационность и динамичность нагружения. К таким параметрам относится модуль упругости первого рода, коэффициент динамической вязкости, коэффициент сопротивления деформации, упругая составляющая относительной деформации сжатия, величина удельной потенциальной энергии разрушения почвенной частицы, коэффициент Пуассона, углы внешнего и внутреннего трения, предел прочности почвы на сжатие и растяжение.

К основным параметрам, оценивающим динамичность воздействия почворезущих рабочих органов, можно отнести модуль упругости первого рода

и коэффициент динамической вязкости. К показателям, оценивающим деформационность воздействия, можно отнести коэффициент деформации, коэффициент Пуассона, величину предельной относительной деформации пласта. Почва, как объект обработки, представлена углами внешнего и внутреннего трения, допускаемым напряжением на сжатие и растяжение.

Физико - технологические показатели почвы зависят от ее гранулометрического состава, абсолютной влажности, скорости нагружения, задержания. При определенном гранулометрическом составе все же определяющим фактором является абсолютная влажность почвы. Данные параметры для суглинистых почв Брянской области изучены слабо, экспериментальных данных имеется немного, причем эти данные, вследствие различия в методах определения, варьируют в больших интервалах, противоречивы и требуют уточнения.

Модернизация почворезущих рабочих органов осуществляется в направлении снижения энергоемкости, повышения надежности, расширения функциональных возможностей за счет совмещения технологических операций. Снижение энергоемкости почворезущих рабочих органов возможно за счет их колебания, уменьшения сил трения при контакте с почвой, создание сети опережающих трещин или за счет сложного характера нагружения. К наиболее перспективному направлению снижения энергоемкости следует считать создание поверхностью деформатора сложного характера нагружения.

На суглинистых почвах почворезущие рабочие органы функционируют в совместном режиме скалывания и излома пласта, где определяющую роль оказывает лезвие режущей кромки. Трансформация лезвия режущей кромки обеспечивает разрушение почвы за счет напряжений смятия и растяжения, что приводит к снижению энергоемкости обработки в целом.

Угол трансформации, в частности для почворезущих рабочих органов строгающего типа, должен быть увязан с упругой составляющей относительной деформации графика сжатия. При этом работа лезвия почворезущих рабочих органов будет проходить в пределах упругих деформаций, что мини-

мизирует возможное разрушение почвенных частиц и залипание режущей кромки почвообрабатывающих орудий.

При проектировании долотообразных лап и дисковых рабочих органов повышение технологической надежности заключается в обеспечении устойчивого скольжения пласта при его подъеме на почвах с различным гранулометрическим составом и влажностью. Коэффициент кривой, описывающей переднюю поверхность долотообразной лапы, должен быть определен с учетом глубины хода и вылета носка. Коэффициент кривой, описывающей поверхность сферического диска, должен учитывать в частности глубину хода рабочего органа и возможный угол атаки.

Выходным параметром теоретической модели может быть тяговое сопротивление, работа сил резания [71], напряженно - деформированное состояние почвы, размер тела скольжения.

К геометрическим параметрам, косвенно, можно отнести массу и объемом почвы, вовлекаемую в деформацию, размеры сечения обрабатываемого пласта, угол резания, форму кривой рабочей поверхности, угол атаки, угол между лезвием и стенкой борозды, угол наклона полевого обреза лемеха, радиус кривизны поверхности плуга, среднее значение угла наклона образующей отвала к стенке борозды.

Большинство теоретических моделей, описывающих взаимодействие деформатора с почвой, не учитывает возможность работы лезвийной части почворежущих рабочих органов в сложном характере нагружения. Почва представлена частными показателями, а не реологической моделью. Режимы скалывания и излома пласта разделены. Затруднено определение величины тягового сопротивления от значений абсолютной влажности суглинистой почвы.

Работая в режиме излома пласта при определяющей роли нормальных напряжений, по ходу движения лезвия лемеха формируется вовлекаемый в деформацию за счет волн напряжений объем почвенного массива. С учетом использования реологической модели Фойгта тяговое сопротивление почворежущих рабочих органов строгающего типа должно оцениваться модулем

упругости первого рода, коэффициентом динамической вязкости, углами внешнего и внутреннего трения.

Значение удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц также позволит определить тяговое сопротивление поверхности лемеха с учетом угла резания, угла между лезвием и стенкой борозды.

Прогнозирование крошения поверхностного слоя при работе почвообрабатывающих рабочих органов должно учитывать с одной стороны удельную потенциальную энергию, накопленную в отдельном почвенном фрагменте, с другой стороны - вероятностный характер разрушения частиц. Прогнозирование степени крошения пласта при работе почворезущего рабочего органа возможно при использовании метода конечных элементов. Почва, как объект обработки, может быть представлена модулем упругости первого рода и коэффициентом Пуассона. Рассчитанная величина удельной потенциальной энергии в каждом элементарном фрагменте должна быть сопоставима с экспериментальной величиной в виду случайности процесса разрушения почвенных частиц.

## 6. Список литературы

1. Сельскохозяйственные машины. Практикум / М.Д. Адиньяев [и др.]. М.: Колос, 2000. С. 82.
2. Исследование демпфирующих свойств машинно - тракторного агрегата с технологическим модулем с позиций оценки вероятностных характеристик случайных процессов / Н.В. Аксенов, Ю.П. Корношин, Г.М. Луценко, В.Н. Сидоров // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 4. С. 136-141.
3. Сельскохозяйственные машины / Н.В. Алдошин [и др.]. М., 2014. С. 149.
4. Алдошин Н.В., Дидманидзе Р.Н. Выбор стратегий качественного выполнения механизированных работ // Международный технико - экономический журнал. 2013. № 5. С. 67-70.
5. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. С. 192.
6. А.К.N. Agro. ru. Частный информационный ресурс.
7. Основы агрономии / М.Д. Атрошенко, Н.Д. Ковалев, А.В. Солошенко [и др.]. М.: Колос, 1978. С. 30.
8. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1986. С. 7.
9. Бауков А.В., Кушнарев А.С. Использование методов механики сплошных сред при проектировании рыхлительных рабочих органов культиваторов // Вопросы механизации сельского хозяйства. Мелитополь: Издательство Мелитопольского института механизации сельского хозяйства, 1971. Т. XVII. С. 17.
10. Справочник инженера - механика сельскохозяйственного производства / В.М. Баутин, Д.С. Буклагин, Н.П. Мишуров [и др.]. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. С. 212.
11. Бахтин П.У. Проблема изучения физико - технологических свойств почвы // Тракторы и сельхозмашины. 1973. № 2. С. 19.

12. Баширов Р.М., Исупов И.Ф., Байрамгулов Ю.Г. Математическая модель удельного сопротивления плуга // Техника в сельском хозяйстве. 2003. № 2. С. 35.
13. Универсальные энерго - ресурсосберегающие почвообрабатывающие и посевные машины комплекса "Уралец" / В.В. Бледных, Н.К. Мазитов, Р.С. Рахимов, В.Н. Коновалов, Н.Т. Хлызов, С.В. Стоян, И.Р. Рахимов // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 9. С. 2-7.
14. Бледных В.В. Математическая модель лемешно – отвальной поверхности корпуса плуга // Техника в сельском хозяйстве. 1993. № 2. С. 9.
15. Разработка комбинированного рабочего органа для послыйной безотвальной обработки почвы / И.В. Божко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 3-5.
16. Бойков В.П., Белковский В.Н. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин. М.: ВО «Агропромиздат», 1988. С. 98.
17. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. Пенза: ПГУАС, 2008. С. 15.
18. Бушмаков В.Я., Голомазов Б.А. Зависимость удельного сопротивления плуга ПН-4-35 от условий работы // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1966. № 1. С. 33.
19. Вагин А.Т. К вопросу обоснования параметров рабочих органов для основной обработки почвы // Вопросы сельскохозяйственной механики. Минск: Урожай, 1967. Т. XVI. С. 77.
20. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. С. 144.
21. Васильковский С.М. Исследование активных рабочих органов культиваторов в условиях Среднего Поволжья: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Саратов, 1966. С. 5.
22. Верняев О.В. Активные рабочие органы культиваторов. М.: Машиностроение, 1983. С. 4.
23. Ветохин В.И. Системные и физико – механические основы проектиро-

- вания рыхлителей почвы: автореф. дис. ... док. тех. наук. Глеваха, 2010. С. 14.
24. Ветохин В.И. Тенденция развития орудий и рабочих органов рыхлителей почвы // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: сб. науч. докладов Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2014. С. 38.
25. Виноградов В.И., Семенов Г.А. Влияние скорости нагружения на величину временного сопротивления почвы // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов: труды. Челябинск, 1970. Вып. № 33. С. 53.
26. Вольский В.А. Определение составляющих силы тягового сопротивления сферического дискового рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 35.
27. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений / Б.А. Воронюк [и др.]. М.: Колос, 1970. С. 393.
28. Войнов В.Н. Обоснование основных конструктивных параметров и режимов работы дискаторов для ресурсосберегающих технологий обработки почвы на примере почвенно - климатических условий Южного Урала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2012. С. 6.
29. Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г. Численное моделирование процессов сдвижения массива горных пород и земной поверхности методом конечных элементов в объемной постановке // Физико-технические проблемы горного производства: научные труды. Донецк, 2001. Вып. 3. С. 12.
30. Герсеванов Н.М. Исследования в области динамики грунтовой массы, механики и прикладной математики // Собрание сочинений. М.: Стройвоенмориздат, 1948. Т. 2. С. 253.
31. Гольдштейн М.И., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Транспорт, 1981. С. 57.
32. Дарков А.В., Шапошников И.Н. Строительная механика. М.: Высшая школа, 1986. С. 458.

33. Дементьев Ю.Н. Практикум по сельскохозяйственным машинам. Кузбассвузиздат, 1997. Ч. 1. С. 22.
34. Джобинашвили Н.И. Разработка технологии и использование технологических средств для межствольной обработки почвы в многолетних насаждениях: автореф. дис. ... канд. с/х наук. Тбилиси, 1978. С. 23.
35. Добротворский И.В. Описание поведения почвы под нагрузкой с помощью метода конечных элементов // Науч.-тех. бюл. ВАСХНИЛ СО, 1984. Вып. 38. С. 18-24.
36. Дробот В.А., Тарасенко Б.Ф. Результаты оценки тяговых сопротивлений почвообрабатывающего рабочего органа с зарубежными аналогами и новая полевая установка для динамометрирования // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно – технической конференции. Минск: Издательство БГАТУ, 2014. С. 122.
37. Дубровский А.А. Рациональные основы научного эксперимента в земледельческой механике // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1968. № 10. С. 1.
38. Дьяков В.П. Зависимость сопротивления почвы от скорости сжатия // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 2. С. 11.
39. Егоров В.Г., Леонова Е.В. Тракторы для высокоинтенсивных и интенсивных технологий производства зерна в ЦРНЗ // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 5. С. 14-19.
40. Инновационная политика технического перевооружения растениеводства / А.А. Ежевский [и др.] // Экономика сельского хозяйства России. 2004. № 6. С. 10-13.
41. Гусеничные уборочные машины / А.М. Емельянов [и др.]. Благовещенск: Издательство ДальГАУ, 2007. С. 25.
42. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. М.: Высшая школа, 1991. С. 28.
43. Зангиев А.А., Шпилько А.В., Левшин А.Г. Эксплуатация машинно-

- тракторного парка. М.: КолосС, 2003. С. 157.
44. Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. Лабораторный практикум по резанию грунтов. М.: Высшая школа, 1969. С. 58.
45. Зенкевич О.П. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1978. С. 104.
46. Золотарев С.А. Аналитические зависимости силового воздействия рабочей поверхности модуля «корпус - заплужник» на пласт почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 1. С. 15-17.
47. Золотаревская Д.И. Изменение реологических свойств и плотности дерново - подзолистой почвы при динамических нагрузках // Почвоведение. 2010. № 3. С. 31.
48. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование и расчет уплотнения почвы в результате динамических нагрузок // Почвоведение. 2011. № 4. С. 27.
49. Золотаревская Д.И. Исследование и расчет уплотнения почвы при работе и после остановки колесного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 33-35.
50. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Актуальность разработки перспективной системы машин и технологий для производства основных видов сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации и Республике Беларусь // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сб. науч. докладов Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2015. С. 11.
51. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система машин и технологий для комплексной механизации производства на период до 2020 года // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 6. С. 6-10.
52. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники / А.Ю. Измайлов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2012. № 3. С. 5-7.

53. К вопросу применения новых наноматериалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин / А.Ю. Измайлов [и др.] // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: сб. докладов XII Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2012. С. 229-234.
54. Использование биметаллических сталей для повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин / А.Ю. Измайлов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2013. № 2. С. 80-81.
55. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники: сборник научных докладов / А.Ю. Измайлов [и др.]. М.: ВИМ, 2011. Т. 1. С. 89-95.
56. Применение наноматериалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин / А.Ю. Измайлов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2013. № 3. С. 75 - 76.
57. Повышение технических характеристик рабочих органов сельскохозяйственных машин / А.Ю. Измайлов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2016. № 4. С. 58–60.
58. Применение теории подобия для моделирования износа почворезущих лезвий в искусственной абразивной среде / А.Ю. Измайлов [и др.] // Российская сельскохозяйственная наука. 2016. № 6. С. 48-51.
59. Энергоемкость обработки почвы при производстве зернобобовых культур / С.И. Камбулов [и др.] // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сборник научных докладов Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2015. С. 86.
60. Карбовский Т., Касимов Б. Обработка почвы при интенсивном возделывании полевых культур. М.: Агропромиздат, 1988. С. 40.
61. Карпенко А.Н., Халанский В.М. Сельскохозяйственные машины. М.: Агропромиздат, 1989. С. 45.

- 62.Клаф Р.У. Метод конечного элемента в решении плоской задачи теории упругости // Расчет строительных конструкций с применением электронных машин: сборник статей по материалам трех конференций, проведенных в США в 1958 - 1953 гг. М.: Издательство литературы по строительству, 1967. С. 143.
- 63.Кленин Н.И., Саун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Колос, 1994. С. 103.
- 64.Ковалев М.М., Поздняков Б.А. Направления технологизации инженерно - технической сферы льняного подкомплекса АПК // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 4. С. 2-3.
- 65.Ковалев М.М. Машинно - технологическая модернизация льняного подкомплекса // Техника и оборудование для села. 2011. № 1. С. 32-34.
- 66.Современные технологии и средства механизации обработки почвы, посева, посадки, внесения удобрений и защиты растений / А.Ф. Кондратов [и др.]. Новосибирск, 2001.
- 67.Короткевич П.С. Сопротивление почв резанию в зависимости от скорости движения и геометрии режущих рабочих органов: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1965. С. 48.
- 68.Кочетов В.Т. Сопротивление материалов. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского университета, 1987. С. 40.
- 69.Кочетов В.Т., Кочетов М.В., Павленко А.Д. Сопротивление материалов. Спб.: БХВ - Петербург, 2004. С. 121.
- 70.Крагельский И.В. Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. С. 23.
- 71.Крутилин В.А. Опыт применения активных рабочих органов для рыхления минеральных почв: материалы НТС ВИСХОМ. М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1970. Вып. 27. С. 409-412.
- 72.Сельскохозяйственные машины и оборудование / И.П. Ксенович [и др.]. М.: Машиностроение, 1998. С. 136.
- 73.Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1995. С. 98.

74. Кудрявец И.П. Продуктивность яблони. М.: Агропромиздат, 1987. С. 93.
75. Кузьмин В.В. К вопросу о квазиоднородности почвы при больших скоростях деформации среза // Вопросы механизации сельского хозяйства: сборник научных трудов. Мелитополь, 1971. Т. XVII. С. 167.
76. Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. М.: Агропромиздат, 1986. С. 276.
77. Кусов Т.Т. Исследование разрушения почвенных комков катками // Тракторы и сельхозмашины. 1959. № 8. С. 22.
78. Кушнарев А.С. К методике определения модулей упругости и сдвига почвы: сборник научных трудов молодых ученых Мелитопольского института механизации сельского хозяйства. Мелитополь, 1968. С. 3.
79. Кушнарев А.С. Дискатор - новое почвообрабатывающее орудие, обеспечивающее переход от традиционной технологии производства сельскохозяйственной продукции к энергосберегающей технологии No-till. Белая Церковь, 2010 / [ndipvt.com.ua/Kusharyov\\_A.S./Kniga\\_o\\_diskatorah.pdf](http://ndipvt.com.ua/Kusharyov_A.S./Kniga_o_diskatorah.pdf).
80. Лаптеев А.А., Мигаль А.Н. Перспективы применения плужных корпусов с регулируемой геометрией в плугах с изменяемой шириной захвата. Минск: Ураджай, 1990. С. 45.
81. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 г. / Ю.Ф. Лачуга [и др.]. М.: Растениеводство, 2012.
82. Почвообрабатывающий и посевной комплекс для энерго-, ресурсосберегающего производства продукции растениеводства: рекомендации к применению / Ю.Ф. Лачуга [и др.]. М.: ООО Столичная типография, 2008. С. 120.
83. Леонова Е.В., Егоров В.Г. Современные решения для точных технологий // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2. С. 257–260.
84. Обоснование и разработка нового плужного лемеха конструкции ВИМ / И.В. Лискин [и др.] // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: сборник научных докладов

- Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2014. С. 103.
85. Лисютин В.П. О направлении силы тяги дисковых почвообрабатывающих рабочих органов // Тракторы и сельхозмашины. 1968. № 2. С. 25.
86. Листопад Г.Е., Демидов Г.К., Зонов Б.Д. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Агропромиздат, 1986. С. 430.
87. Лобачевский Я.П., Колчина Л.М. Современное состояние и тенденции развития почвообрабатывающих машин. М., 2005. С. 116.
88. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 3. С. 18-20.
89. Лобачевский Я.П. Новые почвообрабатывающие технологии и технические средства // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. № 8. С. 30–32.
90. Лобачевский Я.П., Эльшейх А.Х. Обоснование расстановки дисковых рабочих органов в комбинированных почвообрабатывающих агрегатах // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. № 4. С. 22–25.
91. Лобачевский Я.П. Состояние и тенденции развития конструкций отвальных плугов общего назначения. М.: МГАУ, 1999. 27 с.
92. Лобачевский Я.П. Технологии и технические средства для гладкой вспашки. М.: МГАУ, 2001. С. 3.
93. Лобачевский Я.П. Производство и рынок отвальных плугов в западной Европе. Необходимость создания совместных производств плугов // Сборник Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика В.П. Горячкина. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 1998. С. 91-93.
94. Лобачевский Я.П., Эльшейх А.Х. Теоретическое обоснование оптимального расстояния между рыхлительными лапами и дисками орудия с комбинированными рабочими органами // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессио-

- нального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2008. № 4. С. 36-39.
95. Лобачевский Я.П., Панов А.И., Панов И.М. Перспективные направления совершенствования конструкций лемешно-отвальных плугов // Тракторы и сельхозмашины. 2000. № 6. С. 2-5.
96. Лобачевский Я.П., Панов И.М., Кирюхин В.Г. Перспективное направление развития лемешно-отвальных плугов // Тракторы и сельхозмашины. 1983. № 1. С. 3-6.
97. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Горизонтальная составляющая тягового сопротивления плужного корпуса // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. М.: ВИМ, 2015. С. 189-194.
98. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов / Я.П. Лобачевский [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 4. С. 3-8.
99. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 5. С. 17-23.
100. Ловкис З.В. Определение обобщенного показателя качества работы активных рабочих органов // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 1. С. 18.
101. Лурье А.Б., Еникиев В.Г., Теплинский И.З. Курсовое и дипломное проектирование по сельскохозяйственным и мелиоративным машинам. Л.: Агропромиздат, 1991. С. 13.
102. Лурье А.Б., Гусинцев Ф.Г., Давидсон Е.И. Сельскохозяйственные машины. М.: Колос, 1983. С. 10.
103. Любимов А.И., Воцкий З.И., Бледных В.В. Практикум по сельскохозяйственным машинам. М.: Колос, 1997. С. 28.
104. Универсальная технология обработки почвы / Н.К. Мазитов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 25-28.

105. Российская технология обработки почвы и посева на основе собственных конкурентоспособных инновационных машин / Н.К. Мазитов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 7. С. 68-70.
106. Теоретические основы проектирования унифицированных блочно - модульных почвообрабатывающих машин / Н.К. Мазитов [и др.] // Фундаментальные основы научно - технической и технологической модернизации АПК: материалы научно - практической конференции. Казань: ГНУ Татарский НИИ сельского хозяйства, 2013. С. 30-40.
107. Основа успеха - интеграция науки и производства / Н.К. Мазитов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 1. С. 2-7.
108. Влажно-энерго-ресурсосберегающая технология производства зерна в экстремальных условиях с использованием комплекса отечественных машин / Н.К. Мазитов [и др.] // Сборник научных докладов. М.: ВИМ, 2011. Т. 1. С. 73-80.
109. Макарец И.К. Степень крошения почвы при обработке // Земледелие. 1985. № 5. С. 23-24.
110. Макаров В.А., Гаспарян С.В. К вопросу производства органических удобрений в системе повышения плодородия почв // Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства. 2016. № 9. С. 79–85.
111. Максимов Б.И., Юлдашев Н.В. Разрушаемость почвенных комков баллонами – комкодавителями // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1971. № 10. С. 17.
112. Мельников С.В. Измельчение зерна на молотковых дробилках // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1973. № 9. С. 7.
113. Миних Д.В. Теоретическое обоснование формы лобовой поверхности стойки комбинированного сошника // Науч. техн. бюл. ВАСХНИЛ СО. 1985. № 3. С. 6.
114. Миронов В.А., Галкин Н.Н. Определение физико-механических свойств грунтов при проектировании оснований зданий и сооружений:

- пособие к лабораторным работам. Тверь: Изд-во ТГТУ, 2006. С. 25.
115. Миронюк С.К. Новая геометрия лемеха // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1966. № 3. С. 47.
116. Молотников В.Я. Курс сопротивления материалов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2006. С. 27.
117. Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. М.: Машиностроение, 1989. С. 8.
118. Новиков Ю.Ф. Об оптимальной кривизне отвальной поверхности // Материалы НТО ВИСХОМ. М., 1968. Вып. 25. С. 123.
119. Новиков Ю.Ф. Основы теории и механико - технологические исследования процесса вспашки: дис. ... д-ра. техн. наук. Ростов н/Д., 1970.
120. Новиков Ю.Ф. Плотность и напряжения почвы в процессе вспашки // Механизация и электрификация сельского хозяйства .1966. № 2. С. 8.
121. Никифоров П.Е. Работа почвообрабатывающих орудий на повышенных скоростях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1967. № 3. С. 11.
122. Николаев В.А., Попов Д.В. Кинематика и динамика частиц почвы, оказавшихся на уровне центра кромки лезвия лемеха // Техника в сельском хозяйстве. 2010. № 5. С. 6 -8.
123. Нуралин Б.И., Есежанов С.З., Константинов М.М. Технологические приемы обработки почвы на основе синтеза ее оптимальной структуры // Техника в сельском хозяйстве. 2010. № 3. С. 16-17.
124. Норчаев Д.Р. Обоснование параметров энергосберегающего подкапывающего рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 3. С. 11.
125. Огрызков Е.П., Огрызков В.Е., Огрызков П.В. Определение сопротивления плугов по твердости почвы // Техника в сельском хозяйстве. 2005. № 5. С. 7-8.
126. Формирование поверхностной прочности рабочих органов почвообра-

- батывающих машин в области наименьшей интенсивности трения / Н.М. Ожегов, В.А. Ружьев, Д.А. Капошко, С.А. Зимин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 35. С. 270 – 276.
127. Орнатский Н.В. Механика грунтов. М.: Изд-во «Московский университет», 1962. С.192.
128. Осадчий А.П. Механика скалывания и излома почвенного пласта клином: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Волгоград, 1970. С. 3.
129. Пат. 930338097 РФ. Лемех плуга / Аникин А.С., Слюсаренко В.В., Мананникова Т.В. 1997. Бюл. № 29.
130. Пат. 2035849 А01 В 15/04 РФ. Плужный лемех / Аникин А.С., Слюсаренко В.В., Мананникова Т.В. 1995. Бюл. № 28.
131. Пат. 94030020/13 А01В 35/00 РФ. Стрельчатая лапа культиватора / Ахметшин Т.Ф. 1997. Бюл. № 12.
132. Пат. 954006 МПК А 01В 15/04 РФ. Плужный лемех / Бачманов Е.И., Комаров М.И., Кольцов М.В., Стекольников К.Е. 1982. Бюл. № 17.
133. Пат. 2462013 А01В15/04 РФ. Отвальный плуг с регулировкой лемешно - отвальной поверхности рабочих органов / Бледных В.В., Граков Ф.Н., Нечаев П.С. 2011. Бюл. № 5.
134. Пат. 1641208 А 01 В 35/20 РФ. Плоскорежущая лапа / Бледных В.В., Свечников П.Г., Шатруков В.И. 1991. Бюл. № 14.
135. Пат. 2282334 МПК А01В 15/00 РФ. Корпус плуга / Борисенко И.Б. 2006. Бюл. № 13.
136. Пат. 2169998 МПК А01 В 15/00 РФ. Корпус плуга / Бойков В.М., Беднов А.И., Старцев С.А. 1990. Бюл. № 21.
137. Пат. 2002128155/13 А 01 В 21/08 РФ. Рабочий орган дисковой бороны / Булавин С.А., Любин В.Н., Рыжков А.В. 2004. Бюл. № 1.
138. Пат. 132443 Класс 45 а РФ. Плужный корпус, лемех которого подвижно установлен на корпусе и приводится в состоянии вибрации / Бурлаков Н.С. 1960. Бюл. № 1.

139. Пат. 174867 А01В 15/00 РФ. Плужный корпус, лемех которого подвижно установлен на корпусе и приводится в состоянии вибрации / Бурлаков Н.С. 1965. Бюл. № 18.
140. Пат. 2249323 А 01 В 35/26 РФ. Стрельчатая лапа / Л.Н. Бурков Л.Н. 2005. Бюл. № 1.
141. Пат. 1614717, А01В 32/20 РФ. Рабочий орган культиватора - плоскоре-за / Гайпанов Х.С., Булгарнев Г.Г. 1998. Бюл. №1.
142. Пат. 1584768 А 01 В 15/02 РФ. Плужный корпус для работы в закрытой борозде / Деграф Г.А., Марков О.А. 1988. Бюл. № 1.
143. Пат. 1090273 А01В 15/04 РФ. Плуг с регулируемой установкой корпу-сов / Думай Л.Б., Мигель А.Н., Яновский Ю.С., Лептеев А.А., Асябрик И.М. 1984. Бюл. № 2.
144. Пат. 53530 А01В 15/00 РФ. Лемех плуга / Ерохин М.Н., Новиков В.С., Сабуркин Д.А., Азарова И.А. 2006. Бюл. №15.
145. Пат. 1318177 А01В 15/14 РФ. Плуг / Ефимов А.Д., Асябрик И.М. 1987. Бюл. № 1.
146. Пат. 2282336, А 01 В 35/24 РФ. Стрельчатая лапа / Жук А.Ф., Шиши-моров С.А. 2006. Бюл. № 1.
147. Пат. 130172 А01В 15/04 РФ. Плужный лемех / Калашников Ф.И., ДЕРЕ-вянко В.И., Озеров Ю.В., Сучалкин В.Б., Тан А.Я., Катан А.С., Ку-цигин В.Д., Маякин А.В., Поляков В.Н., Еремкин Г.И., Лейначик Е.И. 1984. Бюл. № 47.
148. Пат. 2252516 А01В 15/08 РФ. Плуг / Кислов А.Ф., Щорсткин С.Т. 2005. Бюл. № 1.
149. Пат. 2165133 А01 В 49/02 РФ. Универсальный рыхлитель / Котельни-ков В.Я., Руцкой А.В., Захаров И.С., Рыжков Ф.Н. 2001. Бюл. № 11.
150. Пат. 1380626 А 01 В 35/26 РФ. Почвообрабатывающий рабочий орган / Кушнарев А.С., Шанина З.М. 1988. Бюл. № 10.
151. Пат. 738527 А01В 3/00 РФ. Плуг с автоматическим регулированием па-раметров плужной поверхности / Лаптеев А.А., Бохан Н.И., Мигаль

- А.Н., Короткевич А.В., Филипчук Г.М., Вергейчик Л.А., Ханко Л.Ф. 1980. Бюл. № 18.
152. Пат. 1558315 А01В 15/00 РФ. Плуг / Лаврухин В.А., Суббота Е.М., Данилов А.В., Кирюхин В.Г. 1990. Бюл. № 15.
153. Пат. 144061 Класс 45 а РФ. Плужный корпус, лемех и отвал которого подвижно установлены на стойке и приводятся в состоянии вибрации / Ли С.Д., В.З. Бабин. 1962. Бюл. № 1.
154. Пат. 58003 А01В 7/00 РФ. Дисковое почвообрабатывающее орудие / Макаров С.Г., Чупин П.В., Кобяков И.Д. 2006. Бюл. № 31.
155. Пат. 759249 А01В 15/04 РФ. Лемех почворезущего элемента / Мишин П.В., Рязанов В.Е., Иванов А.А., Павлов В.В., Ю.В. Прокофьев Ю.В. 1992. Бюл. № 33.
156. Пат. 2462852 А 01 В 35/20 РФ. Стрельчатая лапа культиватора / Михальченков А.М., Ковалев А.П., Будко С.И., В.Ф. Комогорцев В.Ф. 2012. Бюл. № 1.
157. Пат. 1470201 А01В 15/04 РФ. Почвообрабатывающее орудие с изменяемой шириной захвата / Мишин П.В., Вайнруб В.И., Мигаль А.Н., Ройтберг В.И. 1989. Бюл. № 13.
158. Пат. 111380 А01В 15/08 РФ. Корпус плуга / Мударисов С.Г., Муфтеев В.Г., Фархутдинов И.М. 2011. Бюл. № 35.
159. Пат. 81619 А01В 15/00 РФ. Лемех плуга / Новиков В.С., Ерохин М.Н., Орстик Л.С., Пучин Е.А., Петровский Д.И., Поздняков Н.А., Мамедов Д.Ф. 2009. Бюл. № 2.
160. Пат. 110894 А01 В 35/20 РФ. Стрельчатая лапа культиватора / Новиков В.С., Валежникова Е.В., Поздняков Н.А., Парамонов Д.П., Шитов А.Н., Ерохин М.Н. 2011. Бюл. № 2.
161. Пат. 2015119929/13 РФ. Комбинированный агрегат для прямого посева зерновых культур / Окунев Г.А., Ружьев Л.Л., Коновалов В.Н., Потатурко П.В., Выползов И.А. 2015. Бюл. № 35.
162. Пат. 1808226 А01В 15/08 РФ. Плужный корпус / Павлоцкий А.С. 1993.

- Бюл. № 13.
163. Пат. 1292673 А01В 15/02 РФ. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия / Редекон Э.Я. 1987. Бюл. № 8.
164. Пат. 2229776 А01В35/06 РФ. Рабочий орган пропашного культиватора / Руденко Н.Е., Захарченко В.Г. 2004. Бюл. № 1.
165. Пат. 1813315 А01В 15/04 РФ. Плужный лемех / Рязанов В.Е., Мишин П.В., Андреев В.И. 1993. Бюл. №17.
166. Пат. 1371530 А01В15/08 РФ. Плужный корпус / Сакун В.А., Барановский А.В., Жилко А.С., Чебан Н.И., Мигаль А.И., Арутин В.В., Кирюхин В.Г. 1988. Бюл. № 5.
167. Пат. 2435342 А01В 15/00 РФ. Корпус плуга / Скурятин Н.Ф., Баглай Д.С., Капустин В.В. 2006. Бюл. № 1.
168. Пат. 161631 А01В 15/00 РФ. Плужный корпус / Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н., Храмовских К.А. 2016. Бюл. № 12.
169. Пат. 2083066 А01В 13/16 РФ. Рабочий орган культиватора / Салдаев А.М., Чамурлиев О.Г. 1997. Бюл. № 1.
170. Пат. 87317 А01В 35/26 РФ. Стрельчатая лапа / Слесарев В.Н., Иванов Н.М., Лынов В.И., Слесарев А.В. 2009. Бюл. № 2.
171. Пат. 2332819 А01В 7/00 РФ. Дисковое орудие / Сохт К.А., Кириченко А.К., Ежов В.А. 2008. Бюл. № 34.
172. Пат. 2562528 А01В 15/04 РФ. Лемех плуга / Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П. 2015. Бюл. № 25.
173. Пат. 2501200 А01В 49/06 РФ. Почвообрабатывающе - посевной агрегат / Стребков Н.Ф., Милюткин В.А. 2013. Бюл. № 35.
174. Пат. 2370931 А01В49/06 РФ. Комбинированный агрегат для обработки почвы и внесения жидких удобрений / Туболев С.С., Ирков И.И., Шеломенцев С.И. 2009. Бюл. № 30.
175. Пат. 2092989 А01В 15/08 РФ. Плужный корпус и способ обработки почвенного пласта / Цапович В.А. 1997. Бюл. № 5.
176. Пат. 1440364 А01В 15/04 РФ. Почвообрабатывающие орудие / Чуданов

- М.А., Халилов М.В. 1988. Бюл. № 44.
177. Пат. №167256 А01В 15/10 РФ. Плужный корпус с прутковым отвалом / Старовойтов С.И., Храмовских К.А., Чемисов Н.Н., Лямзин А.А., Лавров В.И. Бюл. 2016. № 36.
178. Пат. №2444169 А01В 3/36 РФ. Комбинированный агрегат для основной обработки почвы / Лобачевский Я.П., Измайлов А.Ю., Золотарев С.А., Гончаров Н.Т., Сизов О.А., Афонина И.И., Шаров В.В. 2012. Бюл. № 7.
179. Пат. 2600687 А01В 35/20 РФ. Лапа культиватора / Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ахалая Б.Х., Сизов О.А. 2015. Бюл. № 12.
180. Панов И.М. Вопросы развития теории разрушения почвы // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1988. № 11. С. 18-20.
181. Панов И.М., Шмонин В.А. Исследование работы комбинированного плужного корпуса // Тракторы и сельхозмашины. 1969. № 8. С. 29.
182. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв: монография. Киев: Феникс, 2008. С. 13.
183. Пихачев Г.В., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1972. С. 36
184. Подскребко М.Д. Закономерность удельного сопротивления почвы при вспашке // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 2. С. 47.
185. Полевицкий К.А. Сельскохозяйственные машины и орудия. Л., 1953. С. 85.
186. Пындак В.И., Новиков А.Е. Обоснование эффективности глубокой обработки почвогрунтов // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: сб. науч. докладов Международной научно - технической конференции. М.: ВИМ, 2014. С. 65.
187. Основы проектирования и расчет сельскохозяйственных машин / Л.А. Резников, В.Т. Ещенко, Г.Н. Дьяченко [и др.]. М.: Агропромиздат, 1991. С. 99.
188. Рубинин М.В. Сопротивление материалов. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. С. 30.
189. Руденко Н.Е., Кайванов С.Д., Завялик Ф.Н. Скоростной энергосберегающий культиватор // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 7. С. 18-21.

190. Русинов А.В., Слюсаренко В.В. Влияние многократных проходов колес по одному следу на деформацию почвы // Техника в сельском хозяйстве. 2005. № 4. С. 46.
191. Саакян Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных машин. М.: Агропромиздат, 1988. С. 144.
192. Сабликов М.В. Сельскохозяйственные машины. Основы теории и технологического расчета. М.: Колос, 1968. С. 83.
193. Сакун В.А. Закономерности развития мобильной сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1994. С. 13.
194. Сакун В.А. Определение основных параметров плужных корпусов на основе учета прочностных свойств связных задерненных почв // Техника в сельском хозяйстве. 1993. № 2. С. 26.
195. Сакун В.А., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Современный этап и пути дальнейшего развития пахотных агрегатов // Техника в сельском хозяйстве. 1991. № 3. С. 9-12.
196. Сегеда И.В., Колесников Н.В., Миргород М.Я. Обоснование выбора рабочих органов культиватора с учетом физико-механических свойств почвы и агротехнических требований // Теоретические вопросы обработки почвы: доклады на Всесоюзном научно-техническом совещании 17-21 декабря 1968 года. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969. Вып. 2. С. 400.
197. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. С. 392.
198. Практикум по сельскохозяйственным машинам / В.А. Скотников [и др.]. Минск: Изд-во «Ураджай», 1984. С. 7.
199. Ослабление воздействия уплотненного почвенного ядра / С.А. Сидоров, В.К. Хорошенков, Д.А. Миронов, Е.С. Лужнова // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 31.
200. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. С. 48.

201. Синеоков Г.Н. О необходимости систематического изучения технологических свойств почвы // Тракторы и сельхозмашины. 1969. № 10. С. 20.
202. Соколов А.И. К образованию тел скольжения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1972. № 11. С. 18.
203. СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений», 2011
204. Союнов А.С. Обоснование параметров дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2011. С. 5.
205. К формированию матрицы жесткости для плоской задачи теории упругости / С.И. Старовойтов, В.К. Спиридонов, Н.Н. Чемисов, Е.С. Старовойтова // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2011. С. 71-73.
206. Старовойтов С.И. Анализ способов снижения энергоемкости лемеха // Инновационные процессы в АПК: сб. науч. статей V Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов 17-19 апреля. М.: РУДН, 2013. С. 81-82.
207. Старовойтов С.И., Гринь А.М., Лебедев Д.Е. Об углах универсальной стрелчатой лапы // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3. С. 76-82.
208. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. О прогнозировании тягового сопротивления навесного плуга // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. тр. по материалам XXVIII-й международной научно-технической конференции. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2015. С. 119-124.
209. Плужный корпус // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. тр. по материалам IXX-й международной научно-технической конференции / С.И. Старовойтов, А.М. Гринь, А.А. Лямзин, К.А. Храмовских. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2016. С. 109-116.

210. Стародинский Д.З. Пути снижения энергоемкости работы почвенных фрез // Тракторы и сельхозмашины. 1987. № 4. С. 32.
211. Стрельбицкий В.Ф. Силовые характеристики рабочих органов дисковых луцильников и борон // Тракторы и сельхозмашины. 1968. № 1. С. 30.
212. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Государственное издательство физико-механической литературы, 1959. С. 288.
213. Титенок А.В. Совершенствование средств механизации сельскохозяйственного производства в России. Брянск: БГСХА, 1999. С. 202.
214. Тищенко С.С., Гаврильченко А.С., Волик Б.А. К динамике движения сорняков по полольной культиваторной лапе // Конструирование, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. Міжвідомч. науково техн. збірник. Кіровоград: КДТУ, 2003. Вип. 33. С. 95-99.
215. Тищенко С.С., Гаврильченко А.С., Волик Б.А. Проектирование стрельчатых культиваторных лап с криволинейным лезвием на основе логарифмической спирали // Науковий вісник Національного аграрного університета. Кіровоград.: НАУ, 2004. Вип. 73. С. 304-309.
216. Рабочие органы дисковых борон и луцильников / Е.Н. Трубилин [и др.] // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 7. С. 2.
217. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет / Б.Г. Турбин, А.Б. Лурье, С.М. Григорьев [и др.]. Л.: Машиностроение, 1967. С. 92.
218. Устинов А.Н. Сельскохозяйственные машины. М.: Академия, 2003. С. 4.
219. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1989. С. 28.
220. Отечественному сельскому хозяйству - технику нового поколения / М.М. Фирсов, А.Н. Крикунов, В.И. Анискин [и др.]. // Экономика сельского хозяйства России. 2004. № 7. С. 10 -13.
221. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Р.Ш. Хабатов, М.М. Фирсов, Н.Ф. Скурятин [и др.]. М.: ИНФРА-М, 1999. С. 18.

222. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС, 2003. С. 56.
223. Хайлис Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин. Киев: Изд-во УСХА, 1982. С. 7.
224. О прокалывании почвы иглами игольчатой бороны / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев, Л.А. Талах, В.В. Шевчук // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 1. С. 60-62.
225. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. С. 138.
226. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. С. 38.
227. Черепанов С.С. Использование земледельческих агрегатов. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2000. Ч. 1. С.13.
228. Чернышкин В.В. Совершенствование технологического процесса и почвообрабатывающего орудия для основной обработки почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2013. С. 3.
229. Тенденция развития сельскохозяйственной техники за рубежом / В.И. Черноиванов, Л.С. Орсик, В.Ф. Федоренко [и др.] // Научный аналитический обзор по материалам Международной выставки «SIMA – 2007». М., 2007.
230. Чирков Ю.Н. Агрометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 145.
231. Шестаков Н.И., Макаров В.А. Урожайность картофеля в зависимости от приемов подготовки почвы и внесения удобрений // Вестник АПК Ставрополя. 2013. № 2. С. 45-48.
232. Шаров В.В., Лобачевский, Я.П. Прогноз использования почвообрабатывающих машин с активными рабочими органами // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2009. № 1-2. С. 41-43.
233. Шестаков Н.И., Макаров В.А. Урожайность картофеля в зависимости от приемов подготовки почвы и внесения удобрений // Вестник АПК Ставрополя. 2013. № 2. С. 45-48.

234. Янцов Н.Д., Трибуналов М.Н., Вабищевич А.Г. Снижение тягового сопротивления плужного корпуса с одновременным внесением минеральных удобрений // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно – технической конференции. Минск: Изд-во БГАТУ, 2014. С. 217.
235. Яцук Е.П. Ротационные почвообрабатывающие машины. М.: Машиностроение, 1971. С. 91.
236. ASTM D1195-93. Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. 2004.;
237. Chi L., Krushwaha R.L. Three dimensional non – linear finite element analysis of soil failure under a simple narrow tillage tool. St. Joseph, Mich., 1987:27.
238. Ibrahim A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on moldboard plough forces and energy requirement. Computers and Electronics in Agriculture. 2015; 117:258-267.
239. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Horoshenkov V.K. An automated system for the optimization of production processes in agriculture // International Journal of Science and Research. 2016. Т. 5. № 10. С. 592-596.
240. Johnston R.C.R., Birtwistle R. Wheatland Disk Plough Investigations. II Disk Forces. // Journal of Agricultural Research, 1963.-vol.8, N4. PP. 312-326.
241. Pat. №3718819 A01B. Mehrteiliger Pflughurper / Bidell Helmut. 1988.
242. Pat. № 4588034 A01B 13/08. Vibratory plow blade / Emil T. Leonard, Robert G. Drang. 1986.
243. Pat. № 4904332 A01B 35/00. Vibratory Plow / Endar K. Lindstrom, Wichita Kans. 1990.
244. Peumral J.V., Desai C.S. A generalized model for a soil-tillage tool in terracing / St. Joseph. Mich. 1979. p.15.

245. Swick W.C., Perumpral J.V. A model for predicting soil-tool interection. Journal of Terramechanics. 1988. Vol. 25; 1:43-56.
246. Spokas K.A., Forcella F., Archer D.W., Reicosky D.C. SeedChaser:Vertical Soil Tillage Distribution Model. Computers and Electronics in Agriculture. 2007; 57:62-73.
247. Shmulevich I., Asaf Z., Rubinstein D. Interaction between soil and wide cutting blade using the discrete element method. Soil Tillage Research. 2007; 97:37-50.
248. Stafford J.V. Sensing soil failure nide for dynamic implement control. St. Joseph, Mich., 1986:17.
249. Taylor P.A. Field measurement of forces and moments on wheatland plow disk. Tranzaction of ASAE, 1967, vol. 10, N 6, PP. 762-768.

Учебное издание

**Сергей Иванович Старовойтов  
Николай Максимович Белоус  
Владимир Ефимович Ториков  
Александр Михайлович Гринь  
Наталья Петровна Старовойтова**

# **Технологические и теоретические аспекты почворезущих рабочих органов**

**Учебно-методическое пособие**

Редактор Павлютина И.П.



---

Подписано к печати 29.11.2017 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага печатная. Усл. п. л. 5,40. Тираж 550 экз. Изд. № 5450.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ

