

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАТКОВЫХ ПРИСТАВОК  
ДЛЯ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ.  
РЕКОМЕНДАЦИИ**

Минск  
БГАТУ  
2017

Авторы:

И. С. Крук, Ф. И. Назаров, Ю. В. Чигарёв, Г. Ф. Назарова (БГАТУ);  
С. К. Карпович, Л. А. Маринич (МСХП РБ);  
Н. Г. Бакач, Н. Д. Лепешкин (РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»)

**Проектирование** катковых приставок для пахотных агрегатов.  
Рекомендации / И. С. Крук [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2017. – 104 с.  
: ил. – ISBN 978-985-519-886-5.

Представлен обзор конструкций и способов агрегатирования дополнительных почвообрабатывающих орудий и приспособлений к плугам и их рабочих органов. Обоснованы условия совмещения основной и поверхностной обработки почвы. Приведены результаты: теоретических исследований по обоснованию конструктивных и технологических параметров катковых приставок и параметров их установки для различных способов агрегатирования, а также теоретических исследований по обоснованию геометрических и технологических параметров кольчато-прутковых рабочих органов катковых приставок.

Рекомендации предназначены для научных работников, специалистов АПК, преподавателей, аспирантов, магистрантов, слушателей факультетов повышения квалификации и студентов.

Табл. 6. Ил. 48. Библиогр.: 24 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Министерства сельского хозяйства  
и продовольствия Республики Беларусь  
(протокол № 4-17 от 27 декабря 2017 г.).

*Рецензенты:*

академик-секретарь Отделения аграрных наук  
Национальной академии наук Беларуси доктор технических наук,  
доцент, член-корреспондент НАН Беларуси *В. В. Азаренко*  
заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины»  
Белорусского государственного аграрного технического университета  
доктор технических наук, доцент *В. П. Чеботарёв*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕЩЕНИЯ ОСНОВНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ .....	7
1.1. Общие физические свойства почвы. Характеристика почв Республики Беларусь .....	7
1.2. Механическая обработка почвы и требования, предъявляемые к ее качеству .....	11
1.3. Приемы обработки почвы в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур .....	14
1.4. Совмещение основной и поверхностной обработки почвы .....	16
1.5. Почвообрабатывающие рабочие органы дополнительных устройств пахотных агрегатов .....	27
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВМЕЩЕНИЯ ОСНОВНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ....	34
2.1. Силы, действующие на энергетическое средство при выполнении основной обработки почвы .....	34
2.2. Силы, действующие на корпус плуга при вспашке .....	38
2.3. Обоснование ширины захвата катковых приставок. Распределение нагрузок в процессе работы пахотных агрегатов .....	40
2.4. Обоснование параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах в зависимости от закономерностей движения частицы почвы .....	48
2.5. Обоснование параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах в зависимости от закономерностей движения почвенного пласта .....	59
2.6. Обоснование основных конструктивных парамет- ров почвообрабатывающих кольчато-прутковых рабочих органов катковых приставок .....	73
2.7. Взаимодействие уплотняющих рабочих органов кольчато-пруткового катка с почвой .....	77

2.8. Определение напряженного и деформированного состояния в точке почвенного массива при воздействии рабочих органов сельскохозяйственной техники .....	83
2.9. Прочностной расчет уплотняющих элементов почвообрабатывающих кольчато-прутковых катков .....	86
2.10. Конструкции катковых приставок, снижающие вероятность забивания межкаткового пространства почвой .....	95
3. ОХРАНА ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ С КАТКОВЫМИ ПРИСТАВКАМИ .....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	102

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития земледелия в республике минимализация затрат на единицу произведенной продукции при наибольшем экономическом эффекте и сохранении плодородия почвы имеет важнейшее значение. Добиться этого можно в значительной мере за счет разумной системы обработки почвы, основанной на применении комбинированных машин и орудий, способных совмещать две и более технологических операции.

Наиболее энергоемким и трудоемким процессом в технологии возделывания и уборки сельскохозяйственных культур является обработка почвы. Некачественная и несвоевременная обработка почвы может быть причиной целого ряда негативных последствий механизации: снижения плодородия, повышения плотности верхних слоев, усиления эрозионных процессов и возникновения проблемы почвосбережения и экологии почв.

Вспашка с оборотом пласта, несмотря на высокие энергетические затраты, продолжает оставаться преобладающим приемом основной обработки почвы, которая почвы позволяет создавать условия для накопления влаги и сохранения ее для продуктивного использования культурными растениями, бороться с вегетирующей сорной растительностью, регулировать сложение пахотного слоя почвы, обеспечивающего благоприятный тепловой, водный и воздушный режимы.

Качественная и своевременная основная обработка позволяет не только сохранить накопленную почвой влагу, заложить основу будущего урожая, но и снизить затраты на проведение последующих почвообрабатывающих операций, система которых определяется типом и структурой почвы. Так, для тяжелых почв характерен узкий интервал времени, в течение которого возможна их качественная обработка. Вспашка сухой почвы такого типа недопустима, так как пашня получается глыбистой. При более высокой влажности почва практически не крошится, а с наступлением сухой погоды быстро пересыхает, образуются комки больших размеров, которые трудно разрушаются рабочими органами культиваторов, в результате чего пашня становится глыбистой, ухудшается крошение, что приводит к некачественной подготовке почвы к севу и неравномерной заделке семян, и что, в конечном итоге, отражается на

урожае. Поэтому поверхностный слой поля после вспашки тяжелых почв должен быть разрыхлен и выровнен.

Предпосевная обработка почв легкого механического состава должна проводиться в сжатые сроки. Опоздание и частые обработки приводят к иссушению верхнего слоя и большой потере влаги, следовательно, и урожая. Структура данного типа почв позволяет минимизировать количество ее обработок.

Для рациональной загрузки энергетических средств, повышения качества основной обработки и снижения энергетических затрат на выполнение последующих почвообрабатывающих операций в конструкциях плугов широко применяются различные дополнительные устройства для поверхностной обработки почвенных пластов. Устройства обеспечивают разрушение комков и предотвращение образования глыб, более тесное размещение почвенных агрегатов, увеличение капиллярной пористости, создание более однородного состояния обрабатываемого слоя, частичное выравнивание поверхности почвы и сохранение накопленной влаги. С агротехнической точки зрения, применение дополнительных устройств в конструкциях плугов позволяет оптимально использовать время, обеспечивать требуемое качество подготовки почвы к посеву и совмещать агротехнические приемы для борьбы с потерями почвенной влаги. Кроме того, качество обработки верхнего слоя почв легкого и среднего механического состава позволяет подготовить их к посеву за один проход агрегата.

Поэтому разработка технологий и средств механизации, позволяющих качественно и с наименьшими энергетическими и материальными затратами обеспечить подготовку почвы под посев сельскохозяйственных культур, является важной задачей.

Сформулированные и полученные в работе результаты в совокупности с научными положениями вносят определенный вклад в развитие технологий и технического обеспечения механической обработки почвы.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам: члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси доктору технических наук, доценту Азаренко Владимиру Витальевичу и доктору технических наук, доценту Чеботарёву Валерию Петровичу за существенные замечания и благие пожелания.

# 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕЩЕНИЯ ОСНОВНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

## 1.1. Общие физические свойства почвы. Характеристика почв Республики Беларусь

Почва – многофазная дисперсная среда, состоящая из твердых частиц, воды, воздуха и живых организмов, перемешанных между собой в различных соотношениях.

В зависимости от размеров твердые частицы почвы подразделяются на каменные включения (размер частиц более 1 мм) и мелкозем. При определении типа почвы по механическому составу анализируют только мелкозем, который делится на две фракции: физический песок (частицы более 0,01 мм) и физическую глину (частицы менее 0,01 мм). По количеству физической глины различают почвы глинистые (более 50 % глины), суглинистые (50–20 %), супесчаные (20–10 %) и песчаные (менее 10 % физической глины). Чем больше в почве физической глины, тем труднее она в обработке.

К физическим свойствам почвы относят плотность, пористость, пластичность, твердость, липкость, набухание, усадку, связанность почвы, удельное сопротивление, водоудерживающую способность, водопроницаемость, водоподъемную способность, общую воздухоемкость, воздухо содержание, воздухопроницаемость и теплопроводность.

*Плотность почвы* ( $\text{г/см}^3$ ) – масса единицы объема абсолютно сухой почвы при естественном сложении. Данный показатель зависит от минералогического и гранулометрического состава, содержания органических веществ и структуры почвы.

Оптимальные показатели объемной плотности почвы: глинистые и суглинистые – 1,00–1,30; легкосуглинистые – 1,10–1,40; супесчаные – 1,20–1,45; песчаные – 1,25–1,60; торфяные – 0,2–0,4  $\text{г/см}^3$ .

Для пропашных сельскохозяйственных культур оптимальная плотность почв составляет 1,0–1,2  $\text{г/см}^3$ , для культур сплошного сева – 1,3–1,4. Качинский Н.А. предложил следующую оценку плотности суглинистых и глинистых почв с точки зрения ее окультуренности: почва вспушена или богата органическим веществом ( $\rho \geq 1 \text{ г/см}^3$ ), культурная и свежевспаханная пашня ( $\rho = 1,0–1,1 \text{ г/см}^3$ ), уплотненная пашня ( $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ ), сильноуплотненная пашня

( $\rho = 1,3 - 1,4 \text{ г/см}^3$ ), типичные величины для подпахотных горизонтов различных почв (кроме черноземов) ( $\rho = 1,4 - 1,6 \text{ г/см}^3$ ), сильно уплотненные иллювиальные горизонты ( $\rho = 1,6 - 1,8 \text{ г/см}^3$ ).

*Пористость почвы (%)* – суммарный объем всех пор между частицами твердой фазы единицы объема грунта.

Коэффициент пористости  $\varepsilon$  служит для характеристики сложения почв. При  $0,5 < \varepsilon < 1,5$  почва уплотнена, а при  $\varepsilon > 1,5$  – рыхлая.

*Пластичность почвы* – способность почвы необратимо менять свою форму под воздействием внешних сил без нарушения сплошности. Это свойство имеет только влажная почва в определенном диапазоне влажности, т. е. есть верхний и нижний предел пластичности, разность между которыми называется числом пластичности, – величина пластичности. Чем больше это число, тем более пластична почва. Песок имеет число пластичности 0, супесь – 1–7, суглинков – 7–17, глина – более 17.

*Связность ( $\text{г/см}^2$ )* – способность почвы сопротивляться внешнему усилию, стремящемуся разъединить почвенные частицы. Наибольшую связность в сухом состоянии имеют глинистые бесструктурные почвы, наименьшую – песчаные и супесчаные почвы.

*Удельное сопротивление ( $\text{Н/см}^2$ )* – усилие, необходимое на подрезание пласта, его оборот и трение о рабочую поверхность. Показатель зависит от типа почвы, гранулометрического состава, влажности, характера произрастающей растительности. Удельное сопротивление зависит от физико-механических свойств почвы и колеблется в пределах от 2 до 12  $\text{Н/см}^2$ . Почвы с удельным сопротивлением до 3  $\text{Н/см}^2$  считаются легкими, от 3 до 5  $\text{Н/см}^2$  – средними; от 5 до 7  $\text{Н/см}^2$  – среднетяжелыми и от 7 до 12  $\text{Н/см}^2$  – тяжелыми.

*Твердость почвы ( $\text{Н/см}^3$ )* – способность сопротивляться внедрению в нее под давлением какого-либо тела в виде конуса, цилиндра или шара. Высокая твердость – признак плохих физико-химических и агрофизических свойств почв. При высокой твердости снижается прорастание семян, затрудняются проникновение корней в почву и развитие растений вследствие неблагоприятного водного, воздушно-го и теплового режимов. Твердость – важная технологическая характеристика почвы. Твердость прямо пропорциональна удельному сопротивлению почвы при обработке орудиями, следовательно, увеличиваются и энергозатраты.



*Липкость* ( $\text{г/см}^2$ ) – способность почвы прилипать к поверхности различных предметов. Липкость обусловлена взаимодействием твердой фазы почвы с различными предметами через пленку воды. При этом вода одновременно взаимодействует с частицами почвы и с поверхностью соприкасающегося предмета.

Липкость почвы зависит от следующих основных факторов: влажности, дисперсности, свойств материала рабочего органа, чистоты его поверхности и удельного давления.

Почвы по липкости делят на предельно вязкие ( $> 15 \text{ г/см}^2$ ), сильновязкие (5–15), средневязкие (2–5) и слабовязкие ( $< 2 \text{ г/см}^2$ ).

*Набухание* – увеличение объема почвы и грунта в процессе увеличения влажности.

*Усадка* – уменьшение объема почвы при высыхании.

*Водоудерживающая способность* – свойство почвы удерживать в себе определенное количество воды под действием капиллярных и сорбционных сил.

*Водопроницаемость* – способность почвы пропускать воду.

*Водопоъемная способность* – это свойство почвы осуществлять восходящее передвижение содержащейся в ней влаги за счет капиллярных сил.

*Общая воздухоемкость* – максимально возможное количество воздуха, которое помещается в воздушно-сухом грунте ненарушенного строения при нормальных условиях.

*Воздухосодержание* – количество воздуха, содержащегося в почве при определенном уровне увлажнения.

*Воздухопроницаемость* – способность почвы пропускать через себя воздух.

*Теплопоглощающая способность* – способность почвы поглощать и удерживать энергию солнца.

*Теплопроводность* – способность почвы проводить тепло.

*Каменистость почвы.* Камнями в почвоведении называются первичные частицы размером 1 мм и более. Почвы делятся на некаменистые (менее 0,5% камней), слабокаменистые (0,5–5,0%), среднекаменистые (5–10%) и сильнокаменистые (более 10% камней).

По гранулометрическому составу почвообразующие породы делятся на глинистые, суглинистые, супесчаные, песчаные и торфяные. Глинистые породы встречаются ограниченно (0,4%), преимущественно на севере Беларуси. Значительно большее распространение

получили суглинистые породы (20,1 %). Они накапливают больше гумуса, однако плохо пропускают воду и воздух, по этой причине почвы, формирующиеся на них, часто переувлажнены. Легкосуглинистые почвообразующие породы являются наиболее благоприятными в условиях Беларуси, так как удерживают наибольшее количество питательных веществ и имеют сравнительно устойчивый водный режим.

Самыми распространенными породами (45,6 %), являются разные по генезису супесчаные, которые встречаются по всей территории страны. Песчаные породы (21,2 %) более характерны для юга Беларуси и центральной части республики, занимая в Гомельской и Брестской областях более 40 % территории. Они легкопроницаемы для воды и воздуха, но содержат мало питательных веществ, поэтому характеризуются наименьшим плодородием. Торфяные породы (12,7 %) встречаются повсеместно, но наиболее крупные их массивы находятся на Полесье.

На территории Беларуси преобладают почвы дерново-подзолистые – 62,4 %, дерново-подзолистые заболоченные – 14,6, торфяно-болотные – 13,4, аллювиальных дерновых и дерновых заболоченных почв – 5,9 %.

В смешанных лесах с травянистым и мохово-травянистым наземным покровом подзолистый и дерновый процессы почвообразования протекают одновременно, что приводит к формированию дерново-подзолистых почв, которые обладают благоприятными для растений свойствами и повышенным плодородием.

Дерновые заболоченные почвы формируются преимущественно под луговой, а также под лесной растительностью особого состава. Преобладают леса черноольховые и широколиственные (ясеневые, кленовые) с дубом, на севере – еловые с ольхой серой и травянистым покровом. Для луговой растительности характерно участие в травостое мягких злаков (полевица белая, мятлик луговой и др.) и мелких осок. На таких почвах существуют лучшие по продуктивности луга, использование которых возможно без осушительных мелиораций. В Беларуси на долю дерновых заболоченных почв приходится около 10,2 % общей площади сельскохозяйственных земель.

Болотно-подзолистые почвы развиваются в понижениях рельефа или приурочены к плоским равнинам, где накапливаются поверхностные воды. На рыхлых почвообразующих породах Полесья они образуются в местах близкого залегания грунтовых вод. Формиру-

ются болотно-подзолистые почвы под сосновыми долгомошно-черничными, еловыми и березовыми долгомошными, багульниковыми, сфагновыми лесами, особенно по краям верховых болот.

Торфяно-болотные почвы занимают примерно пятую часть территории Беларуси. Торфяно-болотные почвы – это почвы гидроморфного ряда; их происхождение и развитие связано с условиями постоянного избыточного увлажнения: по меньшей мере, в течение 200 дней в году влажность верхнего слоя почв превышает величину наименьшей влагоемкости.

Физические свойства почвы оказывают всестороннее влияние на рост растений, определяют затраты на механическую обработку.

## **1.2. Механическая обработка почвы и требования, предъявляемые к ее качеству**

Механическая обработка – воздействие на почву рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий с целью обеспечения оптимальных условий для возделываемых сельскохозяйственных культур.

Основные задачи механической обработки почвы: сохранение и повышение ее плодородия с целью получения высокой урожайности сельскохозяйственных культур; изменение структуры обрабатываемого слоя почвы для создания благоприятного водного, воздушного, теплового и питательного режимов; уничтожение сорняков, а также возбудителей болезней и вредителей сельскохозяйственных культур; заделка в почву растительных остатков и удобрений; предотвращения эрозионных процессов; создание оптимальных условий для заделки семян на оптимальную глубину, ухода за посевами и уборки урожая.

При механической обработке в почве проходят следующие процессы: крошение, рыхление, уплотнение, перемешивание, оборачивание, выравнивание, создание микрорельефа.

Вспашка – основной прием механической обработки почвы, осуществляемый отвальными и безотвальными рабочими органами плугов. Качественная основная подготовка почвы под посев является основой для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

В результате крошения уменьшаются размеры почвенных структурных отдельностей, меняется взаимное расположение

почвенных комков и частиц, которые отделяются друг от друга. При крошении изменяется общая рыхлость обработанного слоя, увеличиваются пористость и аэрация.

При рыхлении изменяется взаимное расположение отдельностей и увеличивается объем почвы, создается рыхлый пахотный, а в некоторых случаях – и подпахотный слой. Рыхление улучшает водо- и воздухопроницаемость почвы, усиливает микробиологическую деятельность. Во взрыхленной почве быстрее разлагаются растительные остатки, интенсивнее накапливаются элементы минерального питания.

При уплотнении изменяется расположение почвенных отдельностей с уменьшением объема почвы. В результате разрушаются глыбы, более тесно размещаются почвенные агрегаты, увеличивается капиллярная пористость. Уплотненная почва быстрее прогревается. Допосевное уплотнение почвы способствует равномерному распределению семян по глубине, послепосевное – лучшему соприкосновению их с почвенными частицами, вследствие чего семена быстро набухают и дают дружные и более ранние всходы. Кроме того, улучшаются условия ухода за посевами и уборки урожая.

В результате перемешивания изменяется взаимное расположение почвенных отдельностей, обеспечивается более однородное состояние обрабатываемого слоя почвы. Перемешивают почву для равномерного распределения в пахотном слое органических и минеральных удобрений, мелиорантов.

При оборачивании верхние и нижние слои (горизонты) почвы перемещаются в вертикальном направлении. При этом в пахотный слой заделывают пожнивные остатки растений, дернину (при распашке целинных земель или сеяных многолетних трав), органические и минеральные удобрения, мелиоранты, осыпавшиеся семена сорняков, возбудителей болезней и вредителей сельскохозяйственных культур.

В результате выравнивания уменьшаются неровности поверхности. В засушливых зонах прием способствует уменьшению испарения и сохранению влаги в почве. На выровненных полях семена заделываются более равномерно, создаются благоприятные условия при уходе за посевами и уборке урожая.

Критерии, по которым оценивается качество обработки почвы, определены *агротехническими требованиями*.

Обработку почвы следует выполнять в установленные сроки, при этом желательно последующие технологические приемы не разрывать во времени.

Необходимо соблюдать заданную глубину обработки; отклонение не должно превышать 1–2 см.

Не допускаются огрехи или пропуски. Поскольку огрехи чаще всего появляются в результате небрежного вождения трактора, то о них судят по виду следов рабочих органов машин и орудий. Следы должны быть прямолинейными.

Рабочие органы в конце обрабатываемого участка поля следует включать и выключать на одной линии; допускаемое отклонение – не более 0,5 м.

Концы участка обрабатывают так же аккуратно, как и основной участок, на котором не должна просматриваться пестрота в каком-либо показателе качества (например, глыбистости, гребнистости поверхности, заделке сорной растительности и навоза).

При любой обработке желательно получить комочки почвы размером 1–10 мм и нежелательно – частицы размером менее 0,25 мм. Эти показатели зависят от вида обработки и свойств почвы.

В верхнем рыхлом слое почвы, подготовленной к посеву, не должно содержаться комков размером более 3 см, гребнистость поверхности пашни должна быть не более 3–4 см.

К каждому виду обработки почвы предъявляются свои специфические требования, так как она проводится различными сельскохозяйственными машинами, в разных почвенно-климатических условиях и в разное время года.

Так, прикатывание не допускается проводить на пересохших и переувлажненных почвах. На пересохших почвах после прохода катка поверхностный слой сильно разрыхлен и подвержен ветровой эрозии. На переувлажненных почвах после прохода катка почва переуплотняется, что приводит к потере урожая и увеличению затрат на проведение последующих операций. Рекомендуется проводить обработку почвы в состоянии физической спелости, когда обеспечиваются хорошее выравнивание, крошение и уплотнение почвы, а так же снижаются затраты топлива на 10–14 %. На почвах легкого механического состава физическая спелость почвы наступает при влажности 40–70 %, на тяжелых и глинистых – 50–65 %.

### **1.3. Приемы обработки почвы в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур**

Выделяют следующие виды механической обработки почвы под посев сельскохозяйственных культур: основная, поверхностная и специальная.

Основная обработка – это обычно первая, наиболее глубокая обработка почвы после возделывания предшествующей культуры. Ее проводят плугами с оборотом или без него.

Поверхностная обработка проводится перед посевом, в процессе или после посева на глубину не более 14 см. Ее выполняют лущильниками, культиваторами, боронами, мотыгами, катками, фрезами с целью рыхления, перемешивания или уплотнения почвы, подрезания сорняков и заделки удобрений.

Специальная обработка нужна при освоении новых земель, а также чтобы создать некоторые специфические условия для нормального произрастания растений. К ней относится вспашка кустарниково-болотными плугами, плантажная и ярусная обработка, рыхление на большую глубину, фрезерование почв, нарезание гряд и др.

Минимальная обработка почвы – обработка, обеспечивающая снижение энергетических затрат путем уменьшения числа и глубины обработок, совмещение операций в одном рабочем процессе или уменьшения обрабатываемой поверхности поля и применения при необходимости гербицидов.

Противоэрозионная обработка – это обработка с созданием водозадерживающего микрорельефа на пашне и с сохранением ветрозадерживающих пожнивных остатков.

Мульчирующая обработка сочетает в себе приемы механической обработки с покрытием поверхности почвы измельченными растительными остатками.

К основным приемам обработки почвы относят вспашку, культивацию, фрезерование, боронование, лущение, прикатывание и др.

Вспашка – оборачивание и рыхления слоя почвы, подрезания подземной части сорных растений, заделка семян сорняков, удобрений и пожнивных остатков. Наиболее энергоемкий прием обработки почвы, однако он дает наилучшие результаты по уничтожению сорной растительности и по заделке удобрений в почву. Выполняют плугами.

Качество вспашки в значительной степени зависит от формы отвалов, которая влияет на оборачивание, крошение и рыхление пахотного слоя. Плуги по форме отвала делятся на винтовые, цилиндрические, полувинтовые, культурные и комбинированные.

Выделяют следующие виды вспашки:

– культурная вспашка выполняется плугом с предплужниками. Культурная вспашка позволяет качественно заделать в почву растительные остатки, так как предплужники, установленные перед корпусами плуга, срезают верхний слой пласта и сбрасывают его на дно борозды. Оборот пласта при этом более полный;

– оборот пласта – это вспашка, при которой пласт оборачивается на 180°;

– гладкая вспашка – вспашка без свальных гребней и развальных борозд осуществляется оборотными, поворотными или фронтальными плугами;

– безотвальная вспашка – вспашка корпусами без отвалов или плоскорезными корпусами. При такой обработке отсутствует один из главных признаков вспашки – оборот пласта, поэтому безотвальную вспашку еще называют глубоким рыхлением. Применяется на почвах, подверженных ветровой эрозии;

– гребневая вспашка – вспашка, когда пласты почвы от корпусов одного и того же плуга укладываются на разную высоту за счет различной длины отвалов или стоек корпусов плуга. Гребневая вспашка применяется на склонах для борьбы с водной эрозией.

Культивация – прием обработки, обеспечивающий уничтожение сорняков за счет подрезания, вычесывания и присыпания земель, а также рыхление и перемешивание почвы.

Фрезерование – рыхление и интенсивное перемешивание почвы. Глубоко фрезеруют чаще всего задернелые и болотные почвы, которые нельзя рыхлить плугами. Этот прием применяют для обработки почвы в садах, междурядьях пропашных культур и перед посевом культур в полевых севооборотах, если почвы не засорены камнями.

Боронование – универсальный прием поверхностной обработки почвы с целью крошения, перемешивания, выравнивания поверхности, вычесывания сорняков, заделки минеральных удобрений, разрушения корки на посевах после перезимовки и обильных дождей и прореживание загущенных посевов.

Плоскорезная обработка проводится вместо культивации или вспашки с целью рыхления почвы и подрезании корневищ сорняков на почвах, подверженных эрозии.

Лущение и дискование – приемы, применяемые для мелкого рыхления с оборотом пластов почв, обработка которых зубowymi боронами или культиваторами затруднена. В этих случаях используют дисковые рабочие органы. Главное назначение лущения стерни – провоцирование всходов сорняков для их последующей заделки. Лущение можно выполнять не только дисковыми, но и лемешными (плужного типа) лущильниками.

Прикатывание – прием обработки почвы катками, обеспечивающий уплотнение, крошение глыб и, частично, выравнивание поверхности.

Наибольшее распространение в современной земледелии уделяется системе минимальной обработки почвы, выполняемой комбинированными агрегатами.

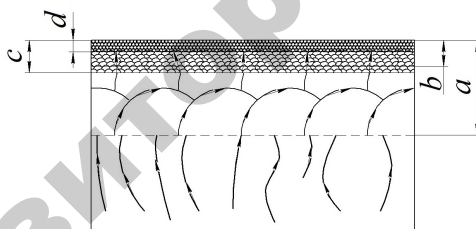
#### **1.4. Совмещение основной и поверхностной обработки почвы**

Агротехникой возделывания определяется рабочая скорость движения агрегата, которая при вспашке (в зависимости от состояния и типа почвы) не должна превышать 6–9 км/ч, при прикатывании – 12 км/ч. При вспашке на максимально допустимых скоростях пласт крошится на более мелкие фракции, что положительно влияет на качество обработки. При прикатывании на максимальных скоростях улучшается крошение поверхностного слоя почвы, но она уплотняется на меньшую глубину. Чтобы исключить данный недостаток, увеличивают давление катка на почву посредством увеличения массы грузов. Значит, рабочая скорость движения пахотного агрегата с приставкой должна быть в пределах 6–9 км/ч, что позволит меньше догружать катки дополнительной нагрузкой. Однако на некоторых типах почв неизбежно возникает необходимость ее увеличить.

Как правило, главной частью агрегата, совмещающего операции основной и предпосевной обработки почвы, является лемешный плуг, оборудованный гидропневматическим или механическим защитным устройством корпуса. Вспомогательными частями агрегата



являются сменные устройства для дополнительной поверхностной обработки вспаханных пластов почвы (рыхление, выравнивание, уплотнение). С целью улучшения процесса основной обработки почвы и снижения энергетических затрат на последующие технологические операции в конструкциях плугов широко применяются различные дополнительные устройства для поверхностной обработки почвенных пластов. Они обеспечивают крошение, рыхление, частичное выравнивание и уплотнение верхнего слоя обороченного пласта (рис. 1.1). При этом происходит разрушение и предотвращение образования глыб, более тесное размещение почвенных агрегатов, увеличение капиллярной пористости, создается более однородное состояние обрабатываемого слоя и частичное выравнивание поверхности почвы. Уплотненная почва быстро прогревается, что позволяет провести последующие технологические операции в более сжатые сроки и обеспечивает сохранение влаги в нижних слоях. Кроме того, качественная обработка верхнего слоя почв легкого механического состава рабочими органами приставки позволяет уменьшить количество последующих обработок и сократить сроки подготовки к посеву, а значит сохранить влагу в почве и провести ранний сев.



Поэтому, с агротехнической точки зрения, применение дополнительных устройств в конструкциях плугов позволяет оптимально использовать время подготовки почвы к посеву, совместить агротехнические приемы для борьбы с потерями почвенной влаги, сократить количество почвообрабатывающих операций при обработках почв легкого механического состава и снизить затраты энергии

на обработку почв тяжелого механического состава. Следует отметить, что распространенные приспособления не обеспечивают одинаковую обработку одних и тех же почв при различных климатических условиях, еще в большей мере это касается различных типов почв – легких и тяжелых. Значит, одним из основных требований к проектированию конструкций и рабочих органов почвообрабатывающих приспособлений к пахотным агрегатам является обеспечение требуемого качества обработки различных почв вне зависимости от климатических условий.

Плотность обрабатываемого слоя при механической обработке претерпевает значительные изменения. Диапазон изменения плотности при вспашке плугом чернозема обыкновенного достигает  $0,31–0,36 \text{ г/см}^3$ . Для исследуемого типа почвы (дерново-подзолистая) плотность после вспашки находится в пределах  $87–91 \text{ г/см}^3$ .

Поскольку накопление и расход влаги, ее передвижение по горизонтам почвы происходят в соответствии с законами влаготеплопереноса, в засушливых районах необходимо системой обработок создать мульчирующий верхний слой, а на глубине 5–6 см сформировать уплотненный слой с меньшим эффективным размером капилляров относительно основной массы почвы, способствующий снижению потерь влаги на испарение. Если верхний слой почвы излишне уплотнен, испарение увеличивается многократно и на большую глубину, поэтому необходимо поддерживать верхний слой (0–5 см) в постоянно сухом и рыхлом состоянии (плотность  $0,7–0,9 \text{ г/см}^3$ ). Независимо от способа основной обработки почвы плотность слоя ниже 5–10 см желательно поддерживать на уровне от  $1,10$  до  $1,15 \text{ г/см}^3$ , но не более  $1,30 \text{ г/см}^3$ . Такая двухслойная структура пахотного горизонта обеспечивает сохранение влаги в почве от излишнего испарения и не препятствует накоплению ее при выпадении осадков. Для выявления оптимальных параметров и режимов работы машины наиболее рационально выбрать единственный параметр оптимизации, а на другие характеристики процесса наложить ограничения.

В настоящее время широкое применение в конструкциях пахотных агрегатов получили приставки, рабочими органами которых являются различные катки. В зависимости от способа агрегатирования их можно разделить на: навешиваемые спереди трактора (рис. 1.2, а), навешиваемые на раму плуга (рис. 1.2, б) и прицепные (рис. 1.2, в).



*Рис. 1.2.* Виды приставок и способы их установки на пахотных агрегатах:  
*а* – навешиваемые спереди трактора; *б* – прицепные;  
*в* – навешиваемые на раму плуга

Работают такие агрегаты следующим образом. Плуг подрезает, перемещает, оборачивает и (частично или полностью) крошит пласт почвы. Затем рабочие органы приспособлений либо сразу, либо при следующем проходе агрегата крошат, рыхлят и уплотняют верхний слой обороченного пласта (рис. 1.3). Крошение и рыхление поверхности пласта особенно важно при обработках тяжелых почв (рис. 1.3, *б*), а уплотнение – легких (рис. 1.3, *в*). В связи с этим применяются различные конструкции рабочих органов приставок: на тяжелых почвах – дисковые рабочие органы, которые позволяют создать оптимальный водно-воздушный и тепловой режимы; при обработке легких почв используются катки, которые выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы, сохраняя в нем влагу.



*Рис. 1.3.* Состояние тяжелых и легких почв после обработки:  
*а* – тяжелые почвы после вспашки; тяжелые (*б*) и легкие (*в*) почвы после вспашки  
с одновременной обработкой поверхности почвенного пласта  
катковыми приставками

Широкое распространение в настоящее время получили прицепные (см. рис. 1.2, б) и приставки, навешиваемые на раму плуга (см. рис. 1.2, в).

Прицепные приставки позволяют выдерживать постоянную глубину хода рабочих органов и не требуют наличия дополнительных гидравлических магистралей в тракторе. Однако при их использовании предъявляются требования к квалификации механизатора, так как во время разворота приставки отсоединяются от плуга и после разворота при помощи специального устройства-ловителя вновь присоединяются к нему. Кроме того, глубина хода их рабочих органов определяется массой приставки, и для их транспортировки необходимо наличие дополнительных устройств.

Эти недостатки устранены в конструкциях навесных приставок. Однако в большинстве случаев имеет место неравномерность глубины хода рабочих органов на полях, имеющих почвы с различными физико-механическими свойствами, так как глубина хода рабочих органов регулируется после остановки агрегата.

Для качественной вспашки различных фонов в республике освоено производство плугов нового поколения для гладкой вспашки. Производство приставок, монтируемых на раме плугов, освоено на ДП «Минойтовский ремонтный завод» (ПД-1,6; ПД-2,0; ПД-3,6) (рис. 1.4, а).



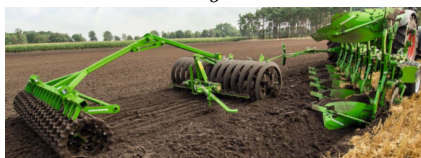
а



б



в



г

Рис. 1.4. Пахотный агрегат с дополнительными почвообрабатывающими устройствами: приставка ПД-2,0 к пятикорпусному плугу ППО-5-40К (а); каток-уплотнитель *Packomat* (б); каток-уплотнитель *Flexpack* (в); пакер *C-Pack 900* (г)

Использование дополнительных почвообрабатывающих устройств в конструкциях оборонных плугов давно и довольно широко используется в странах Европы. Например, компания *Kverneland* использует с оборотными плугами интегрированный каток-уплотнитель *Packomat*, который присоединяется прямо к плугу (рис. 1.4, б). Эта комбинация является одновременно эффективной и экологически благоприятной. Прилагая давление в 1000 кг, клиновидные диски прокладывают свой путь через борозды, дробят комья, выравнивают и уплотняют почву, что обеспечивает быстрое восстановление капиллярности почвы. При этом следует подчеркнуть особую актуальность соблюдения сроков обработки почвы.

Катки-уплотнители *Flexpack* фирмы *Lenken* автоматически адаптируются к рабочей ширине захвата плуга, так как рама уплотнителя проходит параллельно раме плуга (рис. 1.4, в).

Фирма *Amazone* выпускает пакер *C-Pack 900* с автоматически улавливающей штангой при смене направления движения агрегата (рис. 1.4, з). Использование пакера в составе пахотного агрегата позволяет на легких и средних почвах за один проход формировать готовое семенное ложе.

В настоящее время хозяйства республики переходят на вспашку почв многокорпусными плугами, агрегатируемыми тракторами мощностью 250–350 л. с. Для соблюдения равномерности глубины пахоты необходимо устойчивое движение трактора данного тягового класса. В этом отношении должно соблюдаться требование определенной загрузки передних ведущих колес (не менее 20 % от эксплуатационной массы трактора). Лишь один трактор из рассмотренных моделей – *Fend-930* с передним балластом 1800 кг – обеспечивает продольную устойчивость с коэффициентом 20 %. Трактор «Беларус-3022» с балластом 1300 кг обеспечивает коэффициент устойчивости на уровне 12,4 %. Для 20 % значения коэффициента требуется передний балласт 1794 кг.

Многие компании в Западной Европе используют вместо балласта дополнительные приспособления для вспашки, монтируя их на переднюю навеску трактора. Например, английская фирма *Dowdeswell* поставляет фронтальный каток-почвоуплотнитель (рис. 1.5). Катковое приспособление работает следующим образом. Для того чтобы начать обработку первого прохода, вспаханного плугом, каток переводится из транспортного положения в рабочее

(левое – при работе левооборотных корпусов; правое – при работе правооборотных корпусов) с помощью гидросистемы трактора через гидроцилиндры механизма оборота. При этом каток крошит комки и выравнивает поверхность, обработанную при предыдущем проходе агрегата. После завершения прохода механизатор из кабины трактора поднимает каток в транспортное положение вместе корпусами плуга. Производит разворот трактора, а затем переводит каток и корпуса плугов в очередное рабочее положение.



Рис. 1.5. Фронтальный каток-почвоуплотнитель

При выполнении основной обработки почвы трактором с передним ВОМ возможно использование активных роторных культиваторов (рис. 1.6).

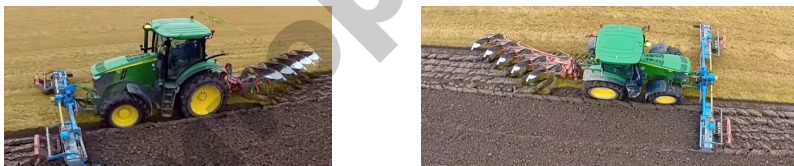


Рис. 1.6. Активные роторные культиваторы на передней навеске пахотного агрегата

Английская фирма *Kvikagro* выпускает для оборотного плуга приставку *Kvik-pak parallel* (рис. 1.7). Приставка состоит из телескопической рамы и движется из стороны в сторону в зависимости от работы корпусов плуга (лево- или правооборачивающими). При работе левооборачивающими корпусами приставка перемещается влево по ходу движения агрегата (рис. 1.7, а) для усадки и дополнительной обработки пласта. Перемещение приставки осуществляется с помощью лебедки, приводимой в движение гидромотором от гидравлической системы трактора (рис. 1.7, б). При работе правооборачивающими корпусами приставка перемещается вправо по ходу движения агрегата (рис. 1.7, в).

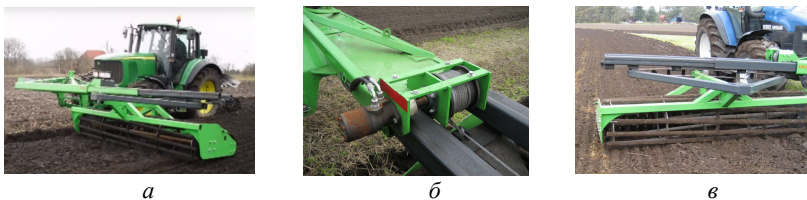


Рис. 1.7. Телескопическая приставка *Kvik-pak parallel* для передней навески пахотного агрегата с оборотным плугом

Отечественными учеными изучались вопросы использования в конструкциях пахотных агрегатов различных дополнительных приспособлений для поверхностной обработки почвы (рис. 1.8).

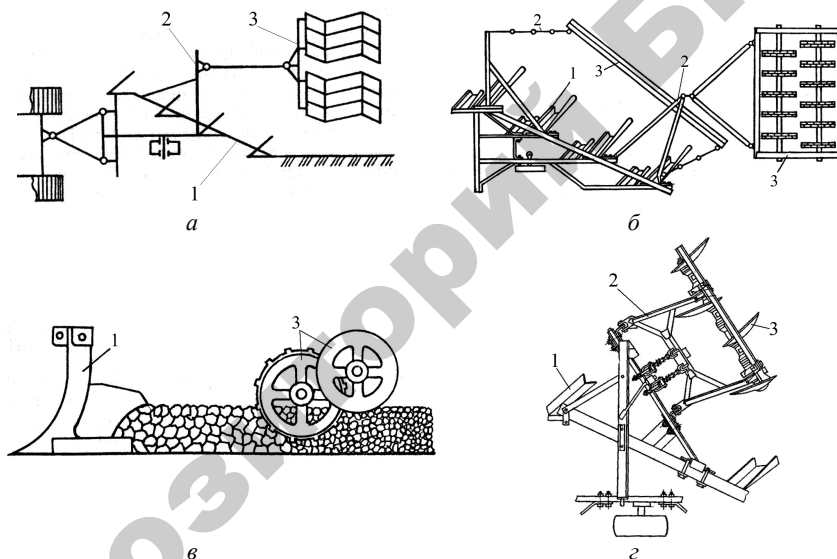


Рис. 1.8. Схемы приспособлений для поверхностной обработки почвенного пласта в конструкциях пахотных агрегатов с использованием: а – зубчатых борон, б, в – катковых приставок, г – дисковой секции бороны

Комбинированный агрегат, содержащий зубчатые бороны (рис. 1.8, а) используется для обработки легких и средних почв. Плуг подрезает и оборачивает пласт почвы, а зубчатые бороны крошат верхний слой и частично выравнивают гребнистую и глыбистую поверхность пашни. Зубчатые бороны рыхлят, не уплотняя,

верхний слой почвы и не обеспечивают качественной разделки грунта тяжелого механического состава, поэтому наиболее эффективными считаются приспособления, включающие дисковые и катковые рабочие органы (рис. 1.8, б, в, г).

Комбинированный пахотный агрегат с приспособлением (рис. 1.8, б) позволяет выравнивать поверхность поля с уплотнением верхнего слоя. Он включает в себя плуг 1, сцепное устройство 2, приспособления 3 в виде волокуши и кольчато-шпоровых катков. Волокуша выравнивает верхний слой почвы, а каток обеспечивает эффективное дробление и уплотнение почвенных агрегатов. При движении комбинированного агрегата плуг подрезает и оборачивает пласт почвы. Волокуша, вследствие установки под углом к движению агрегата, создает перемещение почвы вдоль ее полки, что обеспечивает заполнение бороздок между гребнями, частичное разрушение непрочных комков и выравнивание поверхности.

В сухую погоду на суглинистых и глинистых почвах эффективно применяется комбинированный агрегат с приставкой, содержащей измельчающие, выравнивающие и уплотнительные катки (рис. 1.8, в), при этом ряд первых установлен ниже вторых, что обеспечивает лучшее крошение твердых глыб. При движении агрегата корпуса плуга 1 подрезают и оборачивают пласт, катки первого ряда разрушают крупные глыбы, а на мелкие комки воздействуют катки второго, дробя их и уплотняя почву.

Для обработки почв на склонах эффективным является использование приспособления со сферическими дисками (рис. 1.8, г). При движении агрегата поперек склона корпуса плуга подрезают и оборачивают пласт, а диски образуют на поверхности вспаханного поля сеть углублений – лунок овальной формы.

Отмечено, что применение комбинированного пахотного агрегата дает возможность загрузить трактор на 90 %, что позволяет эксплуатировать его в зоне рациональных значений тяговой характеристики. Кроме того, применение передней навески трактора позволяет при подготовке почвы к посеву снизить затраты труда на 36 %, расход топлива – на 21, прямые эксплуатационные затраты – на 21 и повысить производительность на 57 % по сравнению с базовым агрегатом, выполняющим данную работу за два прохода.



В табл. 1.1 приведены основные агротехнические требования, предъявленные к обработке почвы плугами и комбинированными пахотными агрегатами. Из анализа ее показателей можно сделать вывод, что использование приставок в составе пахотных агрегатов положительно влияет на крошение, выравнивание и уплотнение поверхностного слоя почвы, не ухудшая качества выполнения основной операции – вспашки.

**Таблица 1.1.** Требования к качеству обработки почвы

Показатели качества выполнения технологического процесса	Значение по СТБ 1388–2003	
	для плуга	плуга с приставкой
Глубина обработки, см	14–27	14–27
Отклонение от заданной глубины вспашки, см	2, не более	2, не более
Гребнистость поверхности пашни, см	5, не более	4, не более
Заделка растительных и пожнивных остатков, %	98, не менее	98, не менее
Глубина заделки растительных и пожнивных остатков, см	10, не менее	10, не менее
Крошение пласта на фракции размером до 50 мм, %	70, не менее	90, не менее
Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	нет данных	1,00–1,30

Некоторые эксплуатационные показатели отечественных и зарубежных пахотных агрегатов по результатам испытаний приведены в табл. 1.2. Испытания для всех агрегатов проводились на дерново-подзолистых почвах при абсолютной влажности 16–18 %.

Из данных результатов испытаний (табл. 1.2) можно сделать следующие выводы: у пахотных агрегатов, в состав которых входят навесные приставки, расход топлива увеличивается в среднем на 2–4 %, а производительность возрастает, что приводит к сокращению трудозатрат. Также следует учитывать, что применяемые в агрегатах навесные приставки осуществляют дробление глыб и уплотнение верхнего слоя почвы, а так же выравнивание и рыхление его пружинными зубьями, что улучшает качество основной обработки. Схожий эффект после обработки почвы в ходе испытаний достигался комплексом машин: плуг и культиватор (без катков).

**Таблица 1.2.** Техничко-экономическая оценка пахотных агрегатов

Состав агрегата		Эксплуатационные показатели агрегата		
Трактор	Сельскохозяйственная машина	Производительность, га/ч	Расход топлива, кг/га	Затраты труда, чел.-ч/га
<i>Полунавесные плуги</i>				
Беларус-1221	ППО-4-40	0,92	13,6	1,087
Беларус-1221	ППО-4-40 с приставкой ПД-1,6	1,07	14,0	0,917
Беларус-1523.3В	ППО-5-40	1,26	13,0	0,794
Беларус-1523.3В	ППО-5-40 с приставкой ПД-2,0	1,27	13,5	0,787
Беларус-4522	ПО-(8+4)-40	3,34	16,6	0,299
Беларус-4522	ПО-(8+4)-40 с приставками	3,48	16,8	0,287
Клаас Arion-640	пяतिकорпусный плуг VariOpal с прикатывающим V-образным катком (Lemken)	1,4	15,3	0,714
Клаас Arion-640	пяतिकорпусный плуг VariOpal (Lemken)	1,6	11,3	0,625
<i>Культиваторы</i>				
Беларус-1221	КПС-6М	3,69	4,1	0,271
Беларус-1523.3В	КП-9 с боронами пружинными	8,8	3,2	0,114
Беларус-2103	КП-9 с боронами пружинными	9,3	4,5	0,108

Сравнив эксплуатационные показатели агрегата Беларус-1221 + ППО-4-40 с приставкой ПД-1,6 и комплекса машин Беларус-1221 + ППО-4-40 и Беларус-1221 + КПС-6М, получили результат: удельный расход топлива для комплекса машин возрос на 3,7 кг/га, а трудозатраты повысились на 0,441 чел.-ч/га.

Сравнив эксплуатационные показатели агрегата Беларус-1523.3В + ППО-5-40 с приставкой ПД-2,0 и комплекса машин Беларус-1523.3В + ППО-5-40 и Беларус-1523.3В + КП-9 с боронами пружинными, получили результат: удельный расход топлива для комплекса машин возрос на 2,7 кг/га, а трудозатраты повысились на 0,121 чел.-ч/га.

Сравнив эксплуатационные показатели агрегата Беларус-4522 + ПО-(8+4)-40 с приставкой и комплекса машин Беларус-4522 + ПО-(8+4)-40 и Беларус-2103 + КП-9 с боронами пружинными, получили

результат: удельный расход топлива для комплекса машин возрос на 4,3 кг/га, а трудозатраты повысились на 0,12 чел.-ч/га.

Следовательно, применение приставки позволяет исключить операцию культивации для почв легкого и среднего механического состава из предпосевной подготовки, что снизит на 20–25 % энергетические затраты и на 15–20 % – трудовые.

В конструкциях дополнительных устройств для поверхностной обработки почвы в пахотных агрегатах используются различные рабочие органы.

### 1.5. Почвообрабатывающие рабочие органы дополнительных устройств пахотных агрегатов

При обработке пересохших, спекающихся и тяжелых почв применяются дисковые рабочие органы. К основным преимуществам дисков перед лемешными, лапчатыми и другими рабочими органами того же назначения можно отнести медленное изнашивание, меньшую подверженность забиванию и простоту эксплуатации.

Плоские диски (рис. 1.9, *а*) применяются в качестве дисковых ножей плугов для обработки почв, подверженных, в основном, ветреной эрозии.

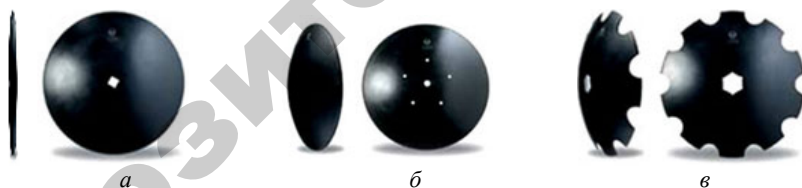


Рис. 1.9. Типы дисковых рабочих органов:  
*а* – плоский; *б* – сферический; *в* – вырезной

Сферические диски (рис. 1.9, *б*) применяются для крошения задернелых пластов и глыб, весенней предпосевной обработки почвы.

Режущая кромка диска, установленного под углом к направлению движения, в процессе работы отрезает полоску почвы и поднимает ее на внутреннюю сферическую поверхность, в результате чего почва крошится, частично оборачивается и перемешивается. С увеличением угла атаки диски глубже погружаются в почву,

ее крошение возрастает, с увеличением угла наклона диска к вертикали несколько улучшается оборот и перемешивание пласта почвы.

Вырезные диски (рис. 1.9, в) применяются как для первичной обработки тяжелых задерненных почв, так и для разделки связных пластов, поднятых при вспашке болотных и кустарниково-болотных земель. Они более интенсивно воздействуют на почву, лучше перерезают корни растений.

Для удаления почвы, налипающей на вогнутую поверхность дисков, применяют скребки (рис. 1.10).

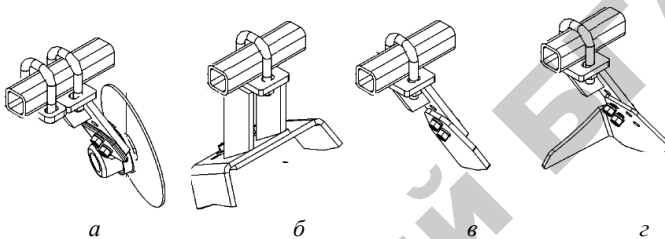


Рис. 1.10. Типы скребков для очистки дисков:  
 а – вращающийся; б – скребок подшипниковой опоры;  
 в – стандартный чистик; г – угловой чистик

При обработке почвы возникает необходимость ее рыхления, выравнивания и перемешивания поверхностного слоя, уничтожения сорняков. Для этой цели чаще всего применяют зубовые рабочие органы (рис. 1.11).

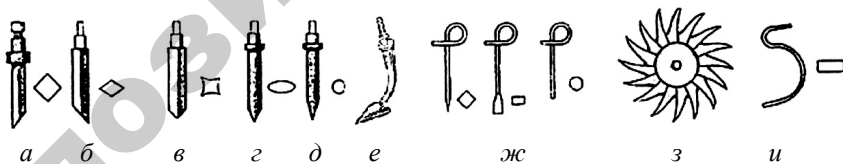


Рис. 1.11. Типы зубовых рабочих органов:

- а – квадратный зуб тяжелой и средней борон;
- б – ромбовидный зуб пастбищной бороны;
- в – зуб фасонного сечения качающейся вибрационной бороны;
- г – эллипсовидный зуб тяжелой бороны;
- д – круглый зуб легкой бороны;
- е – лапчатый зуб;
- ж – зубья сетчатой бороны;
- з – игольчатый диск мотыги;
- и – зуб пружинной бороны

Форма и размеры поперечного сечения зуба влияют на качество работы и тяговое сопротивление. Зуб работает в почве как клин;

с увеличением толщины зуба и угла возрастает интенсивность рыхления частиц почвы. Для поверхностного рыхления почвы зуб с большим углом (от 60 до 90°, в зависимости от почвенных условий) выгодней по затрате тягового усилия. Для работ, требующих не рыхления, а разрезания, рациональней тонкий зуб с малым углом.

Зубья бывают разной формы. Круглый зуб (рис. 1.11, д) давит на почву выпуклой стороной, легко сминает и перетирает во время работы частицы, обращая их в пыль. Граненые, прямоугольные и квадратные зубья (рис. 1.11, а) работают удовлетворительно только тогда, когда движутся вперед острым ребром. Если же они направлены вперед гранью, то сминают почву хуже, чем круглые зубья. Наиболее рациональная форма зубьев – сплюснутая, с острыми ребрами впереди. Такие зубья легко врезаются в почву и разбивают ее на комочки.

Зубья устанавливают вертикально, с наклоном вперед или с наклоном назад. Наклон зуба вперед способствует его заглублению, применяется для обработки тяжелых задернелых почв. При установке зуба с наклоном назад уменьшается глубина обработки, применяется для заделки семян и удобрений.

Глубину хода можно регулировать изменением давления на зубья, накладывая на раму добавочные грузы. Зубья могут быть соединены с рамой жестко, шарнирно или через пружинную стойку. На глубину хода влияет также угол наклона тяги к горизонту: при увеличении этого угла глубина обработки уменьшается, а при уменьшении – увеличивается.

По нагрузке, приходящейся на один зуб, зубные бороны подразделяют на три группы: тяжелые зубные бороны, средние зубные бороны и легкие зубные бороны. Тяжелые бороны применяют для дробления глыб после вспашки, обработки лугов и пастбищ. Средние – для разбивания комьев, уничтожения всходов сорняков, боронования всходов зерновых и технических культур. Легкие – для разрушения поверхностной корки, выравнивания поверхности поля перед посевом заделка семян и минеральных удобрений.

Для уплотнения и выравнивания почвы, дробления глыб, разрушения почвенной корки применяют катки (рис. 1.12). Рабочая поверхность данных рабочих органов разнообразна и предназначена для выполнения различных функций. Для поверхностной обработки почвы широко используются катки, рабочая поверхность которых разнообразна и предназначена для выполнения различных функций.

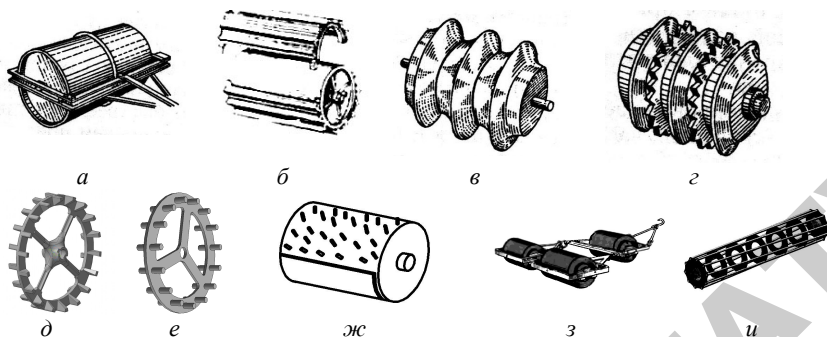


Рис. 1.12. Конструкции рабочих органов почвообрабатывающих катков

Гладкий цилиндрический почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1.12, *а*) предназначен для уплотнения верхнего слоя почвы.

Гладкорубчатый почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1.12, *б*) представляет собой гладкий цилиндрический каток, на который надет кожух с ребристой поверхностью. В отличие от гладкого катка, который, как правило, вдавливает комки в почву, он способен их дробить.

Кольчатый почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1.12, *в*) состоит из колец с клиновидной рабочей поверхностью. Его острые узкие клинья, глубоко врезаются в почву, уплотняют ее нижний слой. Образовавшиеся после прохода гребешки очень непрочны и быстро осыпаются в канавки, образуя рыхлый мульчирующий поверхностный слой почвы. Для очистки канавок колец от застрявших комьев секции кольчатых катков выполняют сдвоенными, т. е. из двух батарей, расположенных одна за другой так, что ребра (клинья) одного ряда располагаются против канавок другого. Вращаясь навстречу одна другой, они раздавливают застрявшие почвенные комки и удаляют налипшую почву. При однорядном расположении батарей применяют скребки.

Кольчато-зубчатый рабочий орган (рис. 1.12, *г*) состоит из набора чередующихся колец с клиновидной и зубчатой рабочими поверхностями. Такой каток уплотняет слой почвы на глубину до 7 см и рыхлит поверхностный слой толщиной до 4 см. Диаметр клиновидных колец – 350, зубчатых – 366 мм. От налипшей почвы и растительных остатков кольца очищаются в результате вращения их с различной скоростью. Для лучшей обработки почв с неровным

микрорельефом и их очистки предусмотрена возможность перемещения колец в радиальном направлении (до 10 мм).

Кольчато-шпоровый рабочий орган (рис. 1.12, *д*) представляет собой набор колец, снабженных шпорами (осевыми выступами). Шпоры, углубляясь, уплотняют нижний подповерхностный слой почвы, выходя из нее, разрыхляют верхний поверхностный слой. В конструкциях рабочих органов почвообрабатывающих катков используются шпоры прямоугольного, треугольного и круглого сечений, которые при внедрении в почву ведут себя по-разному. Диаметр колец – 545 и 520 мм, удельное давление в зависимости от массы балласта – 27–47 Н/см.

Кольчато-прутковый почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1.12, *е*) является разновидностью кольчато-шпорового и представляет собой набор колец, снабженных прутками цилиндрической формы. Прутки, углубляясь, уплотняют нижний подповерхностный слой почвы, а выходя из нее, разрыхляют верхний поверхностный слой.

Борончатый каток (рис. 1.12, *ж*) представляет собой цилиндр, снабженный зубьями, которые размещены по винтовой линии. Под действием давления катка почва уплотняется, зубья рыхлят ее поверхностный слой и разрушают корку. Диаметр катка – 160 мм, диаметр и длина зуба, соответственно, – 16 и 30 мм, длина секции – 650 мм.

Водоналивной гладкий каток (рис. 1.12, *з*) предназначен для уплотнения поверхностного слоя почвы до или после посева, прикапывания зеленых удобрений перед запашкой. Каток трехсекционный; каждая секция имеет вращающийся гладкий пустотелый цилиндр диаметром 700 и длиной 1400 мм, вместимостью 500 л. Цилиндры заполняют водой. Изменением количества воды регулируют удельное давление катка на почву в пределах от 23 до 60 Н/см. Для очистки цилиндров от прилипшей почвы служат чистики, прижимаемые к поверхности цилиндров пружинами. Ширина захвата катка – 4 м.

Продольно-прутковые катки сварной конструкции (рис. 1.12, *и*) собраны в однорядную секцию и посредством рычагов присоединяются к раме агрегата. Шарнирно-подпружиненное соединение катков с рамой агрегата обеспечивает копирование микрорельефа поля катками в продольном направлении и предохраняет от поломок

при встрече с препятствиями. Катки служат для поверхностной обработки разрыхленной рабочими стойками почвы, выравнивания и уплотнение ее на глубине 5–8 см. Конструкция катков обеспечивает качество выравнивания и прикатывания поверхности почвы за счет спиралевидной формы прутков.

Анализируя конструкции рабочих органов, следует отметить, что для обработки почв тяжелого механического состава могут быть использованы в связке с плугом в качестве приставки кольчато-шпоровые катки, кольчато-зубчатые катки, кольчатые катки, борончатые катки, и бороны как дисковые, так и зубчатые. Для почв легкого механического состава наиболее эффективно применять плуг с катковыми приставками, так как они хорошо уплотняют поверхностный слой почвы, препятствуя испарению влаги из нее.

При навешивании приставок на раму плуга существует ограничение по массе, и традиционные методы регулировки давления катков на почву неприемлемы. Конструктивная особенность, возникающая при данном способе агрегатирования, позволяет регулировать давление рабочих органов приставки на почву, изменяя ее положение относительно плуга в вертикальной плоскости. Для этого применяют ступенчатые и бесступенчатые способы регулирования. На основе вышесказанного нами предложена конструкция механизма навешивания приставки, которая позволяет изменять ее положение относительно плуга в вертикальной плоскости.

Пахотный агрегат (рис. 1.13) состоит из секции рабочих органов 1 приставки, закрепленной на раме 2 при помощи кронштейнов 3 и 5, закрепленных на балке 6, которая прикреплена шарнирно к раме 7 плуга 8. Между балкой 6 и кронштейном 3 установлен гидроцилиндр 4.

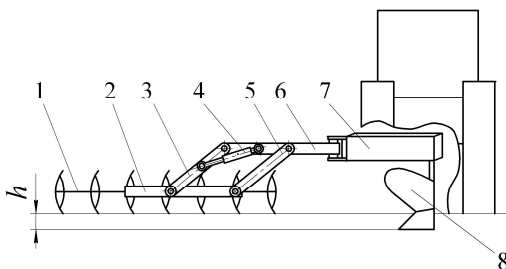


Рис. 1.13. Схема механизма крепления приставки к раме плуга



Механизм регулировки величины давления рабочих органов на почву в данном агрегате работает следующим образом. Перед началом работы определяется тип почвы и устанавливается требуемое положение рабочих органов приставки относительно корпусов плуга. Для этого штоком гидроцилиндра 4 нижний шарнир кронштейна 3 в вертикальной плоскости перемещается по дуге. При перемещении вниз значение  $h$  уменьшается, значит, воздействие агрегата на кронштейн 3 и на рамку 2 с секцией рабочих органов 1, возрастает. В данном случае для обеспечения необходимого давления рабочих органов на почву используется вес агрегата, что дает требуемое качество обработки почвы за один проход и снижает затраты энергии на выполняемый технологический процесс. При перемещении нижнего шарнира кронштейна 3 по дуге вверх, значение  $h$  увеличивается и давление рабочих органов на почву будет уменьшаться.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВМЕЩЕНИЯ ОСНОВНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

### 2.1. Силы, действующие на энергетическое средство при выполнении основной обработки почвы

Рассмотрим общий случай движения трактора на подъем по поверхности, расположенной под углом  $\alpha$  (рис. 2.1) к горизонтальной плоскости, со скоростью  $v_T$  и с нагрузкой  $F_{кр}$  на крюке (тяговое сопротивление), приложенной на высоте  $h_{кр}$  и расположенной под углом  $\gamma_{кр}$  к горизонтали. При этом нагрузка  $F_{кр}$  на крюке будет изменяться в зависимости от степени неоднородности почвы, неровности поверхности поля, нестабильности заглубления рабочих органов сельскохозяйственной машины, скорости движения и других факторов.

Для удобства расчетов направление силы тягового сопротивления продлевается до пересечения с плоскостью, проходящей через ось ведущих колес. Получим условную точку прицепа, расположенную на расстоянии

$$h'_{кр} = h_{кр} + l_{кр} \operatorname{tg} \gamma_{кр},$$

где  $l_{кр}$  – продольное расстояние от действия точки прицепа до оси ведущих колес.

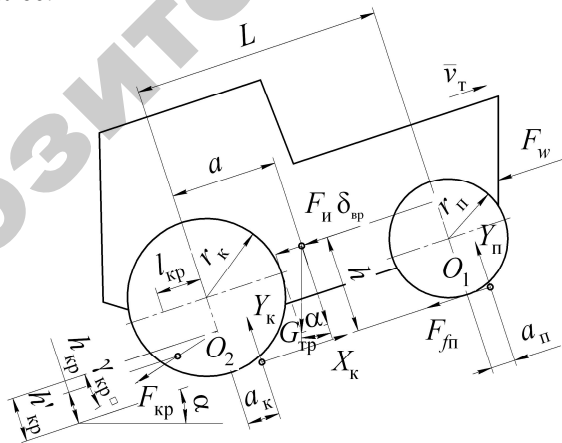


Рис. 2.1. Схема сил, действующих на трактор

Сила тяжести (вес) трактора  $G_{\text{тр}}$  (Н), приложенная в центре тяжести и направленная вертикально вниз, определяется по формуле

$$G_{\text{тр}} = m_{\text{тр}} g,$$

где  $m_{\text{тр}}$  – масса трактора, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Сила тяжести раскладывается на две составляющие:  $G_{\text{тр}} \cos \alpha$  (перпендикулярна направлению движения) и  $G_{\text{тр}} \sin \alpha$  (параллельна направлению движения).

Сила сопротивления воздуха  $F_w$ , приложенная в центре парусности, который расположен на одной высоте  $h_{\text{цп}}$  с центром тяжести, зависит от площади и формы лобовой поверхности трактора, шероховатости и площади трущихся о воздух поверхностей трактора, от обтекаемости ободов трактора и определяется по формуле

$$F_w = k_w \rho_v S_T v_T^2,$$

где  $k_w$  – коэффициент обтекаемости;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\rho_v = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>;  $S_T$  – площадь лобовой поверхности трактора (площадь проекции контура трактора на плоскость, перпендикулярную направлению движения), м<sup>2</sup>.

Равнодействующая нормальных реакций почвы на ведомые колеса  $Y_{\text{п}}$ , приложенная на расстоянии  $a_{\text{п}}$  по ходу движения от геометрической оси ведомых колес, перпендикулярна направлению движения. При этом она создает момент сопротивления качению ведомых колес  $M_{f_{\text{п}}} = Y_{\text{п}} a_{\text{п}}$ .

Равнодействующая нормальных реакций почвы на ведущие колеса  $Y_{\text{к}}$  (сцепной вес), приложенная на расстоянии  $a_{\text{к}}$  по ходу движения от геометрической оси ведущих колес, перпендикулярна направлению движения. При этом она создает момент сопротивления качению ведомых колес  $M_{f_{\text{к}}} = Y_{\text{к}} a_{\text{к}}$ .

Сила сопротивления перекачиванию трактора  $F_f$  параллельна направлению движения и приложена в одной из точек контакта колеса с почвой на расстоянии, равном его радиусу. При этом сила равна сумме сил сопротивления перекачиванию ведомых и ведущих колес  $F_{f_{\text{п}}} + F_{f_{\text{к}}}$ . Она направлена против движения и обусловлена необратимыми деформациями почвы под колесами, гистерезис-

ными потерями в пневмошинах, потерями на трение при скольжении ведомых колес. Ее величина определяется по формуле  $F_f = G_{\text{тр}} f \cos \alpha$  ( $f$  – коэффициент сопротивления перекачиванию трактора по почве. В зависимости от состояния агрофона для пахоты  $f = 0,06 - 0,1$ ).

Касательная сила тяги ведущих колес трактора  $F_{\text{кф}}$ , равнодействующая реакций почвы, приложенных к ведущим колесам по всем их поверхностям соприкосновения с почвой, параллельных заданному вектору скорости движения трактора и направленных в сторону этого движения, создается в пятне контакта колеса с почвой каждого ведущего колеса на расстоянии, равном радиусу колеса  $r_{\text{к}}$ . Эта сила создает ведущий момент

$$M_{\text{вед}} = (F_{\text{кф}} - F_{f_{\text{к}}})r_{\text{к}} + Y_{\text{к}}a_{\text{к}}.$$

Разность сил  $F_{\text{кф}} - F_{f_{\text{к}}} = X_{\text{к}}$  (толкающая сила) предназначена для преодоления тяговых сопротивлений агрегатируемых орудий и сопротивления качению ведомых колес трактора и приложена к оси ведущих колес.

Касательную силу тяги можно определить по формуле  $F_{\text{кф}} = \varphi_{\text{исп}} Y_{\text{к}}$  ( $\varphi_{\text{исп}}$  – коэффициент использования сцепного веса  $Y_{\text{к}}$ ). Предельное значение касательной силы тяги равна  $F_{\text{кфmax}} = \varphi_{\text{сц}} Y_{\text{к}}$  ( $\varphi_{\text{сц}}$  – коэффициент сцепления движителя с почвой. В зависимости от состояния агрофона для пахоты  $f = 0,7 - 0,9$ ).

Значения нормальных реакций  $Y_{\text{к}}$  и  $Y_{\text{п}}$  на задние и передние колеса трактора существенно влияют не только на показатели их тягово-сцепных свойств ( $f = \frac{F_f}{(Y_{\text{п}} + Y_{\text{к}})}$  и  $\varphi_{\text{исп}} = \frac{F_{\text{к}}}{Y_{\text{к}}}$ , для тракторов с одним ведущим мостом, или  $\varphi_{\text{исп}} = \frac{F_{\text{к}}}{(Y_{\text{п}} + Y_{\text{к}})}$ , для тракторов с двумя ведущими мостами), но и на показатели тормозных свойств, управляемость, устойчивость и прочность ходовой системы.

На распределение нормальных нагрузок между передними и задними колесами существенно влияет продольная координата

центра тяжести трактора. В колесных тракторах с задними ведущими колесами центр тяжести располагается ближе к задним колесам так, чтобы  $Y_{к ст} = (0,65-0,7)G_{тр}$ . Уменьшение веса, приходящего на задние колеса, ухудшает сцепные свойства трактора, а уменьшение веса, передаваемого передними колесами, отрицательно влияет на его управляемость и продольную устойчивость. При работе с навесными орудиями следует учитывать влияние силового воздействия орудий на трактор, поэтому важным является анализ зависимости нормальных реакций почвы на колеса трактора от конструктивных и эксплуатационных показателей агрегатов.

Для повышения тягово-сцепных свойств трактора необходимо уменьшить реакции почвы  $Y_n$  на опорные колеса орудия. Однако известно, что при малом значении  $Y_n$  нарушается агротехника выполняемой технологической операции (выглубляются орудия, неравномерность глубины обработки и др.). Поэтому необходимо корректировать, регулировать значение реакции  $Y_n$  либо ликвидировать опорные колеса, достигая условия агротехники другим способом, например, регулированием и стабилизацией тягового сопротивления  $R_x$  и силы  $R_x \cdot \text{tg} \theta$ .

Значения  $Y_n$  можно корректировать тремя способами: изменением положения мгновенного центра вращения; изменением положения опорных колес; регулированием силы гидроцилиндра, т. е. регулированием давления в гидроцилиндре навесной системы.

В большинстве случаев при выполнении пахоты тракторы идут правыми колесами по дну борозды, образованной за предыдущий проход, а левыми – по поверхности необработанного поля (или наоорот). Вследствие возникающего при этом поперечного наклона трактора нормальные реакции почвы распределяются между его правыми и левыми колесами неравномерно – правые (бороздные) колеса нагружаются больше левых (полевых). Неравномерность распределения нормальных реакций усугубляется из-за силового воздействия, оказываемого навесным плугом. В частности, существенно влияние при этом опорного колеса плуга, которое идет по необработанному полю и создает под действием вертикальной реакции почвы момент, догружающий бороздные и разгружающий полевые колеса трактора. В связи с этим правые и левые ведущие колеса оказываются в разных условиях сцепления с почвой, что отрицательно влияет на тяговые свойства трактора.

Чем больше нагружено опорное колесо плуга, тем сильнее оно влияет на неравномерность распределения вертикальных реакций почвы между правыми и левыми колесами трактора. Поэтому на пахоте особенно необходима корректировка нагрузки на опорное колесо плуга с целью ее снижения до возможного минимума. Наибольшие нормальная нагрузка на ведущие колеса трактора и сила тяги достигаются, когда в сельскохозяйственной машине нет опорных колес. Однако в этом случае усложняется обеспечение глубины обработки почвы в заданных пределах. При работе с позиционно-силовым регулятором увеличивается производительность трактора, больше сцепной вес трактора и меньше буксование ведущих колес, чем при работе с опорными колесами на навесном орудии. Однако при этом ухудшается равномерность глубины обработки почвы.

## 2.2. Силы, действующие на корпус плуга при вспашке

Элементарные силы сопротивления почвы, действующие во время пахоты на рабочую поверхность плужного корпуса, сводятся к результирующей силе и паре сил. Эту пространственную силовую характеристику плужного корпуса можно заменить тремя эквивалентными составляющими суммарного сопротивления почвы  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$ , действующими во взаимно перпендикулярных плоскостях и не проходящими через одну точку.

Сопротивления почвы, возникающие при работе плужного корпуса на его рабочей поверхности и на лезвии лемеха, не приводятся к одной равнодействующей силе. Однако в каждой плоскости проекций суммарное воздействие на корпус элементарных сил сопротивления почвы может быть представлено одной результирующей силой определенной величины и направления.

В горизонтальной плоскости проекций (рис. 2.2, а) на корпус действует сила  $R_{xy}$ , образующая с осью  $Ox$  угол  $\zeta$ . Величина данного угла у стандартного корпуса культурной формы в зависимости от свойств почвы может изменяться в пределах  $15\text{--}25^\circ$ . Сила  $R_{xy}$  пересекает лезвие лемеха на расстоянии  $l$ , равном  $0,4$  ширины захвата корпуса.

Продольная горизонтальная сила  $R_x$  (проекция силы  $R_{xy}$  на ось  $Ox$ ) определяется по формуле

$$R_x = ka_{\text{пл}}b_{\text{пл}},$$

где  $k$  – удельное сопротивление почвы, Н/м<sup>2</sup>;  $a_{\text{пл}}$  – высота пласта, м;  $b_{\text{пл}}$  – ширина пласта, м.

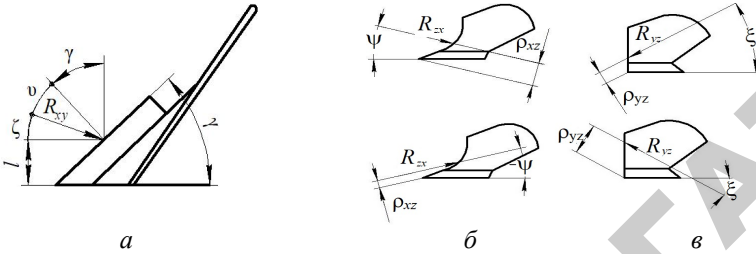


Рис. 2.2. Схема сил, действующих на корпус плуга

Сила  $R_x$  проходит на расстоянии  $z \approx 0,5a$  от дна борозды и  $y = 0,4b$  от стенки борозды.

Поперечные и вертикальные составляющие зависят от величины продольной силы, и для культурного корпуса они принимаются:

$$R_y = (0,25 - 0,45)R_x \approx 0,35R_x \text{ или } R_y = \frac{R_x}{3}; R_z \approx \pm 0,25R_x.$$

В вертикальной плоскости проекций на корпус действует сила  $R_{xz}$ , образующая угол  $\psi$  с осью  $Ox$ , и на плотных почвах при работе плуга с затупленными лемехами угол  $\psi$  может иметь отрицательный знак (рис. 2.2, б). При расчетах угол  $\psi$  принимают равным  $\pm 12^\circ$ . Для суглинистых почв при отсутствии залипания угол  $\psi$  равен  $6-8^\circ$ . Расстояние  $\rho_{xz}$  от носка лемеха до прямой, являющейся продолжением силы  $R_{xz}$ , равно примерно  $1/2$  глубины пахоты при положительных и  $1/3$  глубины при отрицательных значениях угла  $\psi$ . Сила  $R_{yz}$ , действующая на корпус в поперечной плоскости проекций (рис. 2.2, в) равна геометрической сумме сил  $R_x$  и  $R_y$ :

$$R_{yz} = R_x (\text{tg}^2 \zeta + \text{tg}^2 \psi)^{\frac{1}{2}}.$$

Направление силы  $R_{yz}$  характеризуется величиной угла  $\xi$ , тангенс которого равен  $\text{tg} \xi = \frac{\text{tg} \zeta}{\text{tg} \psi}$ .

Расстояние  $\rho_{yz}$  от носа лемеха до прямой, являющейся продолжением силы  $R_{yz}$ , равно примерно 0,5 глубины пахоты при положительных и 0,75 глубины при отрицательных значениях угла  $\xi$  (рис. 2.5, в).

Вертикальная составляющая в зависимости от остроты лемеха, плотности и влажности почвы может быть направлена вниз или вверх.

При пахоте с предплужниками тяговое сопротивление плуга может увеличиться до 10 %. Примем, что сопротивление предплужника равно  $R_x'' \approx 0,35R_x$  и основного корпуса –  $R_x' \approx 0,70R_x$ . Тогда сопротивление дискового ножа равно  $R_n \approx 0,25R_x$ , но соответственно уменьшается нагрузка на плужный корпус и предплужник. Давление на опорное колесо навесного плуга примерно равно весу плуга и может несколько изменяться в зависимости от направления и величины вертикальных  $R_z$  сопротивления почвы.

Силы сопротивления почвы, действующие на основные корпуса и предплужники, передаются через стойки на раму плуга в виде изгибающих и крутящих моментов, продольных и поперечных сил. Поперечные составляющие силы, действующие на плужный корпус и предплужник, уравниваются реакцией стенки борозды, передаваемой на полевую доску.

### **2.3. Обоснование ширины захвата катковых приставок. Распределение нагрузок в процессе работы пахотных агрегатов**

Выделим ряд условий, возникающих при установке приставок. Основными условием эффективной работы катковых приставок является отсутствие необработанных пластов почвы и отсутствие повторного прохода рабочих органов приставки по уже пройденному или невспаханному участкам.

Поэтому для качественной и согласованной работы рабочих органов комбинированного пахотного агрегата необходимым является соблюдение условия:

$$b = b_n, \quad (2.1)$$

где  $b$  – ширина захвата плуга, м;  $b_n$  – ширина захвата приставки, м.



Рассмотрим агрегат, состоящий из навесного плуга и приставки, навешанной спереди трактора (рис. 2.3, а).

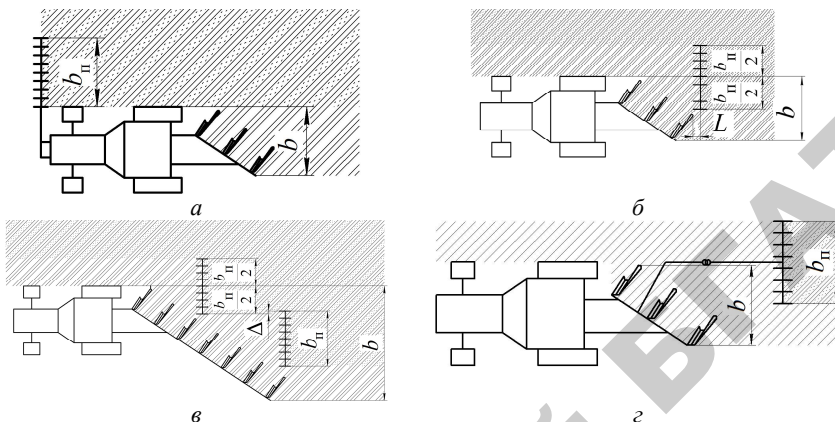


Рис. 2.3. Схема установки приставки:

спереди трактора (а); навешенные на раму навесного (б) и полунавесного (в) плуга; прицепная (г);  $b$  – ширина захвата плуга;  $b_{п}$  – ширина захвата приставки;  $\Delta$  – перекрытие

Для комбинированного пахотного агрегата с установленной на передней навеске трактора приставкой определим величину нормальных реакций, действующих со стороны почвы на колеса трактора  $Y_k$  и  $Y_{п}$  (рис. 2.4). Для этого следует записать уравнение равновесия агрегата относительно точки опоры одного из колес и вертикальную ось.

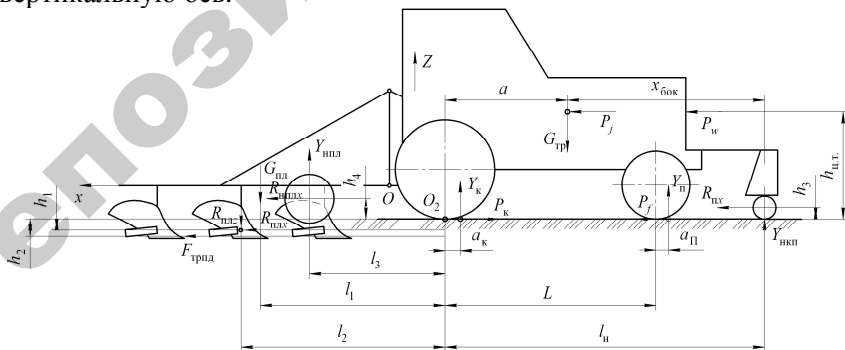


Рис. 2.4. Схема сил, действующих на пахотный комбинированный агрегат

Уравнение равновесия (уравнение моментов сил) относительно точки  $O_2$  запишем в следующем виде:  $\sum M_{O_2}(k) = 0$ ;

$$Y_{\text{нкп}}l_{\text{н}} + R_{\text{плх}}h_3 + P_w h_{\text{ц.т.}} - G_{\text{т}}a + Y_{\text{п}}(a_{\text{п}} + L) + Y_{\text{к}}a_{\text{к}} - Y_{\text{нпл}}l_3 + R_{\text{нплх}}h_4 + \quad (2.2)$$

$$+ G_{\text{пл}}l_1 - R_{\text{плх}}h_1 + R_{\text{пл}}l_2 - F_{\text{трплд}}h_2 = 0;$$

$$\sum F_{\text{кз}} = 0. \quad R_{\text{пл}} + Y_{\text{нкп}} - G_{\text{т}} + Y_{\text{п}} + Y_{\text{к}} + Y_{\text{нпл}} - G_{\text{пл}} = 0. \quad (2.3)$$

Из данных уравнений (2.2) и (2.3) можно определить реакции ведущих и ведомых колес  $Y_{\text{к}}$  и  $Y_{\text{п}}$  и их зависимость от величины реакции  $Y_{\text{п}}$ .

Запишем для нашего случая уравнения моментов сил, действующих на пахотный агрегат в поперечной плоскости относительно точки присоединения плуга (рис. 2.5).

$$\sum M_o(k) = 0;$$

$$-R_{\text{ппп}} \frac{B_{\text{тр}}}{2} + R_{\text{ппл}} \frac{B_{\text{тр}}}{2} + R_{\text{ппр}} B_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{тр}} + R_{\text{ппр}} (h_{\text{пр}} - h'_{\text{пр}}) - \quad (2.4)$$

$$- G_{\text{пр}} B_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{тр}} - G_{\text{пр}} (h_{\text{пр}} - h'_{\text{пр}}) \sin \alpha_{\text{тр}} - G_{\text{тр}} h_{\text{цт}} = 0;$$

Зная соотношения между  $R_{\text{ппп}}$  и  $R_{\text{ппл}}$ , можно определить допустимую нагрузку на приставку  $G_{\text{пр}}$ , позволяющую эффективно использовать вес трактора, не создавая трудностей при управлении энергетическим средством.

Рассмотрим пахотный агрегат, на котором приставка устанавливается на раму навесного плуга (см. рис. 2.3, б).

При данном способе установки одна половина приставки обрабатывает только что обернутый слой почвы, а вторая – половину предыдущего ряда.

Анализируя данную схему, можно выделить основное условие эффективной работы комбинированного пахотного агрегата: почва, сходящая с отвалов корпусов плуга, должна осесть на поле до прохода рабочих органов приставки, т. е. не попадать на ее рабочие органы.

Рассмотрим пахотный агрегат, на котором приставка установлена на раму многокорпусного полунавесного плуга (см. рис. 2.3, в).

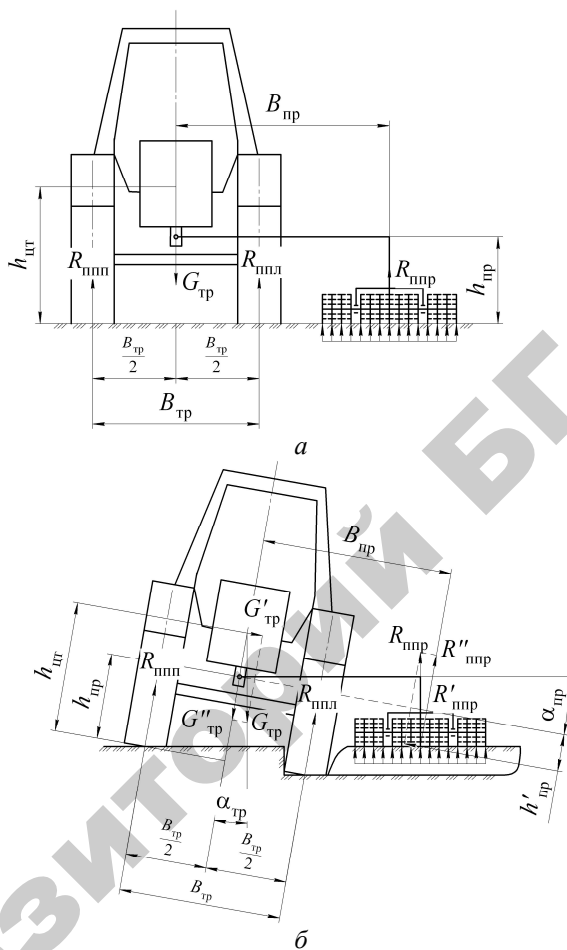


Рис. 2.5. Схема сил, действующих на трактор и приставку в поперечной плоскости при движении вне борозды (а) и в борозде (б)

Анализируя данную схему, можно выделить условия эффективной работы для приставки, установленной на раму многокорпусного плуга, – отсутствие необработанного пласта почвы; почва должна сойти с отвала корпуса плуга и осесть на поле до прохода рабочих органов приставки для обеспечения качественной обработки почвы по всей ширине захвата приставки; при работе должно отсутствовать перекрытие  $\Delta$  от проходов приставок.

Рассмотрим силы, действующие на плуг с приставкой (рис. 2.6). Запишем для нашего случая уравнения моментов сил, действующих на пахотный агрегат в горизонтальной плоскости относительно точки присоединения плуга:

$$\sum M_{O(k)}=0; \quad -R_{\text{п}}B_{\text{пп1}} - \sum_{i=1}^n R_{xy}h_i + \sum_{i=1}^n R_{\text{пд}}h_{\text{пди}} + R_{\text{к}}h_{\text{к}} = 0, \quad (2.5)$$

где  $h$  – плечи сил  $R_{xy}$ ;  $h_{\text{пд}}$  – плечо реакции полевой доски.

$$\sum M_{O(k)}=0; \quad -R_{\text{п}}B_{\text{пп1}} - \sum_{i=1}^n R_{xy}h_i + \sum_{i=1}^n R_{\text{пд}}h_{\text{пди}} + R_{\text{к}}h_{\text{к}} = 0. \quad (2.6)$$

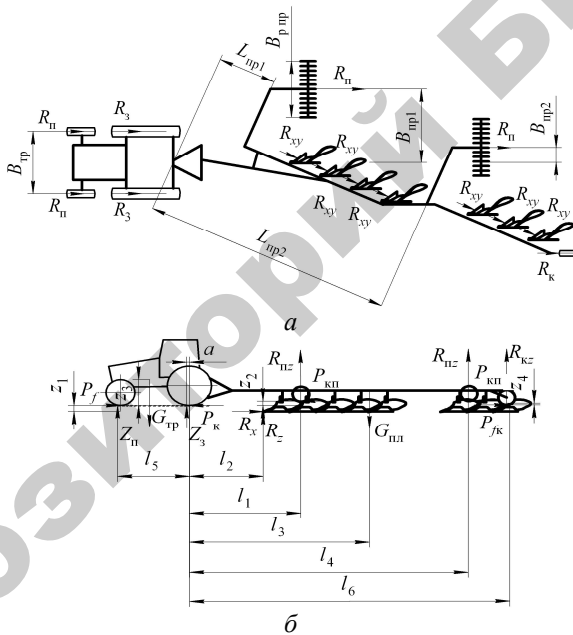


Рис. 2.6. Схема сил, действующих на пахотный агрегат с закрепленными на раме плуга приставками в плоскости: а – горизонтальной; б – вертикальной

Для нашего случая уравнение моментов сил, действующих на пахотный агрегат в вертикальной плоскости относительно точки опоры заднего колеса, примет следующий вид:

$$\sum M_O(k) = 0; \quad (2.7)$$

$$-Z_{п1}l_5 + G_{тп}l_7 + Z_3a + \sum_{i=1}^n R_z l_{2i} + \sum_{i=1}^n R_x z_1 + R_{пз}l_1 - P_{кп}z_2 - G_{пш}l_3 + R_{пз}l_4 - P_{кп}z_2 + R_{кз}l_6 + P_{фк}z_4 = 0,$$

где  $l_2$  – плечо силы  $R_z$ ;  $z_1$  – плечо силы  $R_x$ .

Используя данные системы уравнений, можно определить условие наименьшего усилия, оказываемого плугом на полевые доски корпусов, а также усилия, создаваемые на катковых приставках в вертикальной плоскости при поддержании плуга в горизонтальном положении в ходе работы агрегата.

Условием качественной работы прицепной приставки (см. рис. 2.3, з) является равенство ширины ее захвата и ширины захвата плуга, т. е.  $b = b_{п}$ . При этом может использоваться один из способов агрегатирования приставки: сзади плуга, сбоку (обработка участка поля, вспаханного при предыдущем проходе агрегата), сбоку (частичная обработка участка поля, вспаханного при предыдущем проходе агрегата и частичная – свежевспаханного).

При установившемся движении на плуг в горизонтальной плоскости действуют следующие силы: сила сопротивления почвы на рабочей поверхности корпуса и лезвии лемеха ( $R_n$ ), реакции стенки борозды на полевую доску ( $N_d$ ), силы трения полевой доски о стенку борозды ( $F$ ), силы тяги ( $P_{кр}$ ), силы сопротивления перекатыванию колес ( $R_п$ ,  $R_6$ , и  $R_3$ ) (рис. 2.7, а).

Реакция стенки борозды на полевую доску зависит от составляющей силы  $R_{кз}$ , направленной перпендикулярно движению плуга  $R_2$ . Сила  $R_2$  стремится переместить плуг влево, в результате чего возникает сила реакции  $N_d$  почвы на полевую доску. В значительной мере реакция  $N_d$  зависит от направления линии действия силы тяги  $P_{кр}$  трактора. Лучшее направление линии тяги в горизонтальной плоскости будет в том случае, когда она проходит через продольную ось трактора, а сила тяги  $P_{кр}$  и равнодействующая сила сопротивления  $R$  расположены на одной линии.

Полное давление полевой доски на стенку борозды можно определить по формуле

$$N_d = \frac{P_{кр}}{l_m + n} \left[ \frac{\eta l_m}{\text{tg}(\theta + \varphi)} + D' \right],$$

где  $\theta$  – угол, образованный лезвием лемеха и стенкой борозды, град;  
 $\varphi$  – угол отклонения силы  $R_k$  от нормали, град;  $D'$  – расстояние  
 между линиями действия сил  $P_{кр}$  и  $R$ , м,

$$D' = \frac{B_{тр} - B_{п}}{2} + d,$$

где  $B_{тр}$  – ширина колеи трактора, м;  $B_{п}$  – ширина захвата плуга, м;  $d$  –  
 расстояние от стенки борозды до правого колеса трактора, м;  $l_m$  –  
 расстояние от точки прицепа до линии действия силы  $R_2$ ;  $l_n$  – рас-  
 стояние от линии действия силы  $R_2$  до точки приложения реакции  
 почвы на полевую доску (точка  $A$ );  $\eta$  – коэффициент (0,50–0,65).

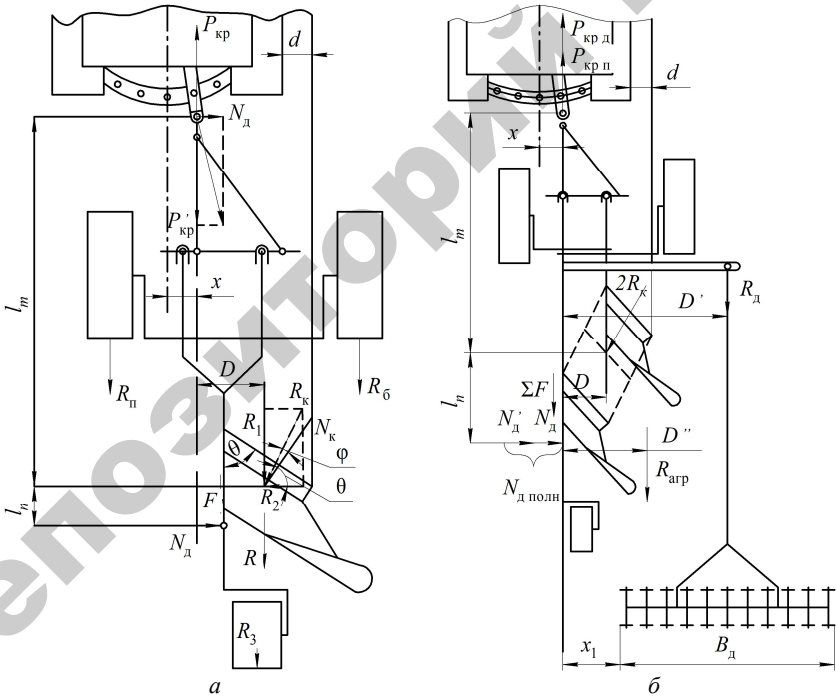


Рис. 2.7. Схема сил, действующих в горизонтальной плоскости на пахотный агрегат без орудий для дополнительной обработки почвенных пластов (а) и с ними (б)

Полное сопротивление определяется по формуле

$$R = P_{кр} = ka_{пл}B_{п}.$$

Установка дополнительного почвообрабатывающего оборудования в конструкциях плугов влечет за собой дополнительное давление на стенку борозды, что сказывается на устойчивости плуга в горизонтальной плоскости. Величина возникающих дополнительных динамических нагрузок определяется местом крепления и способом агрегатирования оборудования.

Для случая крепления дополнительного почвообрабатывающего оборудования (рис. 2.7, б) возникает дополнительный момент

$$M_{доп} = R_{д}D',$$

где  $R_{д}$  – сила сопротивления дополнительного оборудования, Н;  
 $D'$  – плечо силы  $R_{д}$ , м.

Тогда сила полного давления полевой доски на стенку борозды будет равна

$$N_{д.полн} = \frac{R_{п}[\eta l_{м} \operatorname{ctg}(\theta + \varphi) + D] + R_{д}D'}{l_{м} + l_{п}}.$$

При этом

$$D' = \frac{B_{тр} + B_{д}}{2} - B_{п} + d + x_1 - x,$$

где  $B_{д}$  – ширина захвата дополнительного оборудования, м;  $x_1$  – ширина борозды, м.

Геометрические размеры приставок выбираются в зависимости от способа установки их на пахотных агрегатах и ширины захвата плуга. При этом следует учитывать, что важными показателями параметров установки, влияющими на энергоемкость процесса, являются перекрытие хода приставок, наименьшее расстояние установки почвообрабатывающих рабочих органов катковых приставок относительно корпуса плуга.

Поэтому важным условием эффективной работы установленной на раму многокорпусного плуга приставки является отсутствие необработанного пласта почвы; почва должна сойти с отвала корпуса плуга и осесть на поле до прохода рабочих органов приставки для обеспечения качественной обработки почвы по всей ширине захва-

та приставки; при работе должно отсутствовать перекрытие  $\Delta$  от проходов приставок.

Геометрические размеры приставок выбираются в зависимости от способа установки их на пахотных агрегатах и ширины захвата плуга. При этом следует учитывать, что важными показателями параметров установки, влияющими на энергоемкость процесса, являются перекрытие хода приставок и наименьшее расстояние в направлении движения между осью приставки и корпусом плуга.

Наименьшее расстояние установки дополнительных устройств определяется условием полного оседания частиц почвы, которым была передана энергия движения корпуса плуга до начала воздействия на почву рабочих органов дополнительных орудий (рис. 2.8), т. е. в момент соприкосновения рабочего органа дополнительного устройства почвенный пласт должен быть неподвижен.

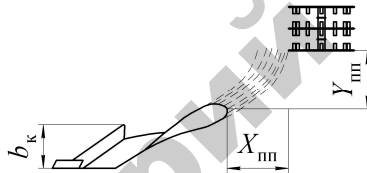


Рис. 2.8. Схема установки дополнительных почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга

Как показывают эксперименты, нерациональная установка почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга влияет на энергоемкость, материалоемкость и качество выполнения технологического процесса. Поэтому определение траектории движения частиц почвы по поверхности плуга и дальности их отбрасывания является одной из первоочередных задач.

#### **2.4. Обоснование параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах в зависимости от закономерностей движения частицы почвы**

Дальность отбрасывания частиц почвенного пласта отвалом определяется скоростью движения агрегата, типом и параметрами отвала, размерами и состоянием пласта и другими факторами.



В настоящее время плуги оснащаются тремя типами отвалов: культурным, полувинтовым и винтовым.

Для изучения закономерностей оборачивания и отбрасывания почвенного пласта корпусом плуга примем следующие допущения: скорость агрегата со временем не меняется, поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны  $R_{отв}$ . Пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала (рис. 2.9, а).

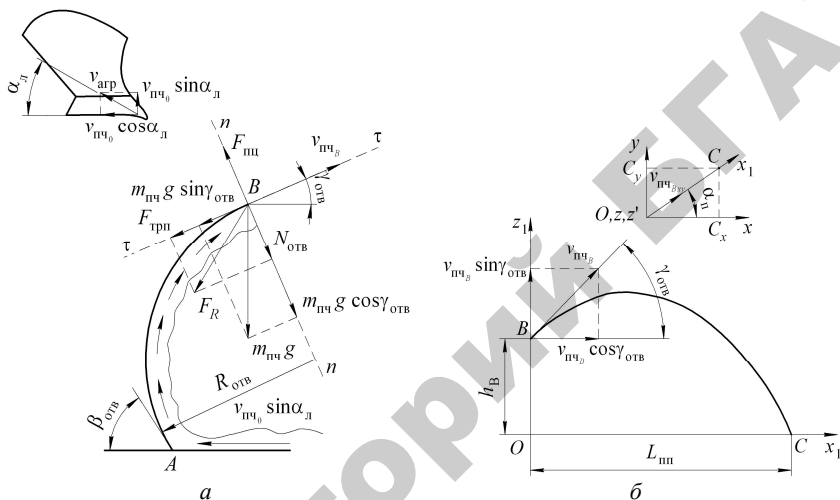


Рис. 2.9. Расчетная схема движения частицы почвы по отвалу корпуса плуга (а) и ее падения на поверхность поля (б)

Данное движение рассматривается как относительное (система отсчета связана с отвалом). При подрезании слоя почвы величина относительной скорости принимается равной величине скорости агрегата:  $v_{пч_0} = v_{арг}$ . Слой почвы начинает двигаться по рабочей поверхности корпуса со скоростью  $v_{пч_0} \sin \alpha_{л}$  ( $v_{арг}$  – скорость агрегата, м/с;  $\alpha_{л}$  – угол наклона кромки лемеха к направлению движения агрегата (плуга)), движение вдоль отвала осуществляется со скоростью  $v_{л_0} \cos \alpha_{л}$ .

Рассмотрим движение частицы почвы массой  $m_{пч}$  (кг) по поверхности отвала (линия  $AB$ ). В верхней точке  $B$  отвала (рис. 2.9, а)

на частицу действуют сила тяжести, центробежная сила инерции, сила реакции отвала и сила трения.

Сила тяжести

$$G_{\text{пч}} = m_{\text{пч}} g, \quad (2.8)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Данную силу разложим на две составляющие:  $m_{\text{пч}} g \sin \gamma_{\text{отв}}$  – направленную по касательной к поверхности отвала  $\tau-\tau$ , и  $m_{\text{пч}} g \cos \gamma_{\text{отв}}$ , направленную по нормали  $n-n$  к указанной поверхности ( $\gamma_{\text{отв}}$  – угол наклона касательной, проведенной к поверхности отвала в точке  $B$ , к горизонту, град).

Центробежная сила инерции

$$F_{\text{инц}} = \frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}0}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}}, \quad (2.9)$$

где  $R_{\text{отв}}$  – радиус кривизны поверхности отвала в рассматриваемом сечении (радиус окружности, по которой построена парабола отвала), м.

Радиус кривизны должен обеспечивать условие полного размещения почвенного пласта на поверхности отвала, не допуская пересыпания почвы через верхний обрез. Необходимо, чтобы отвальный пласт не задирался нижним обрезом.

Для плугов общего назначения принимается условие:

$$R_{\text{отв}_{\min}} \leq R_{\text{отв}} \leq R_{\text{отв}_{\max}}. \quad (2.10)$$

Минимальный и максимальный радиусы определяются по следующим формулам:

$$R_{\min} = \frac{b_k}{\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_{\text{лем}}\right) \cos \gamma_{\text{лем}}}; \quad (2.11)$$

$$R_{\max} = \frac{b_k \sqrt{k^2 - 1}}{k^2 (\cos \varepsilon_{\text{лем}} - \cos \theta_R)}, \quad (2.12)$$

где  $b_k$  – ширина захвата корпуса, м;  $\varepsilon_{\text{лем}}$  – угол между лемехом и дном борозды, град;  $\gamma_{\text{лем}}$  – угол между лезвием лемеха и стенкой борозды, град;  $k$  – количество корпусов, шт.;

$\theta_R$  – угол (град), определяемый из равенства:

$$\operatorname{tg}\theta_R = \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{\cos \gamma_{\text{лем}}}. \quad (2.13)$$

При невыполнении неравенства (2.10) минимальный радиус определяется по выражению

$$R_{\text{отв, min}} = \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k(\cos \epsilon_{\text{лем}} + \sin \Delta \epsilon_{\text{лем}})}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta \epsilon_{\text{лем}}$  – дополнительный угол, на который увеличивается дуга окружности для обеспечения большого прогиба крыла отвала (для культурных отвалов  $\Delta \epsilon_{\text{лем}} = 4-5^\circ$ , для скоростных –  $\Delta \epsilon_{\text{лем}} = 5-8^\circ$ , полувинтовых –  $\Delta \epsilon_{\text{лем}} = 8-10^\circ$ ).

Сила реакции отвала  $N$  направлена по нормали.

Сила трения  $F_{\text{трп}}$ , направленная по касательной к поверхности отвала, определяется по формуле

$$F_{\text{трп}} = f_{\text{трп}} N, \quad (2.15)$$

где  $f_{\text{трп}}$  – коэффициент трения почвы о поверхность отвала (табл. 2.1)

**Таблица 2.1.** Расчетные значения коэффициента трения  $f_{\text{трп}}$  и угла трения  $\phi_1$

Типы почв	$f_{\text{трп}}^*$	$\phi_1$
Песчаные и супесчаные рыхлые (сыпучие)	0,25–0,35	14°–19°30′
Песчаные и супесчаные связные	0,50–0,70	26°30′–35°
Легко- и среднесуглинистые	0,35–0,50	19°30′–26°30′
Тяжелые суглинки и глины	0,40–0,90	22°–42°

\* – меньшие значения  $f_{\text{трп}}$  для всех типов почв, за исключением связных песчаных, соответствуют низкой, а большие – высокой влажности почвы: большее значение  $f_{\text{трп}}$  у песчаных связных почв соответствует низкой влажности почвы.

Величина коэффициента трения зависит от механического состава и влажности почвы, шероховатости рабочих поверхностей, материала рабочих органов, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения почвы (рис. 2.10).

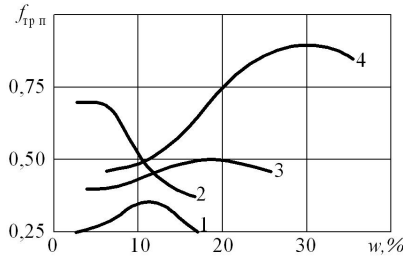


Рис. 2.10. Графики изменения коэффициента трения в зависимости от влажности и механического состава почвы:

1 – песчаная; 2 – супесчаная; 3 – средние суглинки; 4 – тяжелые суглинки и глина

Спроектировав указанные силы на нормаль  $n-n$  и касательную к поверхности отвала  $\tau-\tau$ , получим уравнения равновесия системы в следующем виде:

$$\frac{m_{пч} v_{пч}^2 \sin^2 \gamma_{отв}}{R_{отв}} - m_{пч} g \cos \gamma_{отв} - N = 0, \quad (2.16)$$

$$m_{пч} a_{пч} = F_{тр п} + m_{пч} g \sin \gamma_{отв}, \quad (2.17)$$

где  $v_{пч}$  – скорость частицы почвенного пласта, м/с.

Из равенства (2.16) при  $N = 0$  можно определить критическую для рассматриваемого поперечного сечения скорость движения агрегата, при которой частица будет достигать верхней кромки отвала:

$$v_{пчкр} = \sqrt{\frac{R_{отв} g \cos \gamma_{отв}}{\sin^2 \gamma_{отв}}}. \quad (2.18)$$

Если скорость движения агрегата меньше критической скорости для данного сечения  $v_{пч} > v_{пчкр}$ , то частица сваливается с отвала, а перед отвалом почва может сгуживаться. При условии  $v_{пч} < v_{пчкр}$  обеспечивается отбрасывание слоя пласта без сгуживания.

Дальность отброса частиц почвы от оси пути зависит от величины относительной скорости движения пласта по отвалу и углов наклона вектора указанной скорости к горизонту и к направлению движения плуга. Кроме того, пласт почвы имеет переносную скорость  $v_{арп}$  вместе с движением плуга. Эта скорость определяет отброс частиц по направлению движения.

Для определения относительной скорости из уравнения (2.16) выразим силу  $N$  и подставим в равенство (2.17). Учитывая равенство (2.15), получим

$$m_{\text{пч}} a_{\text{пч}} = f_{\text{тр}_n} \frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} m_{\text{пч}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + m_{\text{пч}} g \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (2.19)$$

Разделив правую и левую часть равенства на  $m_{\text{пч}}$ , получим

$$a_{\text{пч}} = f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \quad (2.20)$$

или

$$a_{\text{пч}} = \frac{dv_{\text{пч}}}{dt} = f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}.$$

Данное выражение можно представить в следующем виде:

$$\frac{v_{\text{пч}} dv_{\text{пч}}}{f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = dx,$$

или

$$\int \frac{v_{\text{пч}} dv_{\text{пч}}}{f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = \int dx. \quad (2.21)$$

$$\frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр}_n} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right| = x + C_1.$$

При начальных условиях  $x_0 = 0$   $v_0 = v_{\text{пч}_0}$ ,

$$C_1 = \frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр}_n} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}_0}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right|.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр}_n} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right| = x + \\ & + \frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр}_n} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр}_n} \frac{v_{\text{пч}_0}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр}_n} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right| \end{aligned}$$

ИЛИ

$$v_{\text{ПЧ}}^2 = e \frac{2f_{\text{ТП}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} x \cdot \left( v_{\text{ПЧ}_0}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}}.$$

Скорость в момент отрыва частицы от кромки отвала получим при  $x = s_{\text{ПЧ}}$  :

$$v_{\text{КОН}}^2 = e \frac{2f_{\text{ТП}} s_{\text{ПЧ}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} \cdot \left( v_{\text{ПЧ}_0}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}}$$

ИЛИ

$$v_{\text{ПЧ}_B} = v_{\text{КОН}} = \left[ e \frac{2f_{\text{ТП}} s_{\text{ПЧ}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} \cdot \left( v_{\text{ПЧ}_0}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{ТП}_n} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.22)$$

где  $s_{\text{ПЧ}}$  – длина траектории движения частицы почвы, м.

Рассмотрим относительное движение частицы пласта, вылетевшей с верхней кромки отвала (см. рис. 2.9, б). Для упрощения считаем, что верхняя кромка отвала параллельна нижней кромке, а частица вылетела под углом  $\gamma_{\text{отв}}$  к горизонту и под углом  $\alpha_{\text{П}}$  к направлению движения плуга. То есть плоскость полета частицы расположена в плане (приблизительно) под углом  $\alpha_{\text{П}}$  к продольной оси пути. Для определения наименьшего расстояния установки приставки нам необходимо связать координатную ось с носком лемеха корпуса плуга и спроецировать точку падения частицы пласта на оси  $Oy$  и  $Ox$ . Расстояния, измеренные по данным осям, будут определять наименьшее расстояние между корпусом плуга и ближайшим рабочим органом катковой приставки.

Для упрощения исследований на начальном этапе рассмотрим движение частицы в плоскости  $z_1 O x_1$ , ось  $O_1 x_1$  которой повернута в плоскости  $x O y$  на угол  $\alpha_n$  относительно оси  $Ox$ , соответствующий проекции угла вылета частицы на плоскость  $x O y$ .

Из анализа дифференциальных уравнений движения частицы по относительным координатным осям  $Ox_1$ ,  $Oz_1$  получаются уравнения движения частицы в параметрической форме (с независимым параметром времени  $t$ ). Поскольку траектория движения на этом участке не определена, уравнения движения будем составлять для декартовых координат (см. рис. 2.9, б). Задача сводится к частному случаю исследований закономерностей движения тела, брошенного под углом к горизонту.

В начале движения частица находится в точке  $B$ , при этом:

$$t_0 = t_B = 0; \quad x_0 = x_{пч_B} = 0; \quad \dot{x}_{пч_B} = v_{пч_B} \cos \gamma_{отв}. \quad (2.23)$$

$$z_1 = z_{пч_B} = 0; \quad \dot{z}_{пч_B} = v_{пч_B} \sin \gamma_{отв}. \quad (2.24)$$

В конце движения частица почвы находится в точке  $C$ , причем

$$t_C = t; \quad z_{пч_C} = h_B. \quad (2.25)$$

Запишем дифференциальные уравнения движения частицы в общем виде:

$$m_{пч} \ddot{x}_{пч_B} = \sum_{k=1}^n F_{kx}; \quad m_{пч} \ddot{z}_{пч_B} = \sum_{k=1}^n F_{kz}.$$

Для нашего случая  $m_{пч} \ddot{x}_{пч_B} = 0$ ;  $m_{пч} \ddot{z}_{пч_B} = -m_{пч} g$ . Откуда

$$\ddot{x}_{пч_B} = 0; \quad (2.26)$$

$$\ddot{z}_{пч_B} = -g. \quad (2.27)$$

Интегрируем методом разделения переменных:

$$\dot{x}_{пч_B} = \frac{dv_{пч_{Bx}}}{dt}, \quad \frac{dv_{пч_{Bx}}}{dt} = 0. \quad \dot{z}_{пч_B} = \frac{dv_{пч_{Bz}}}{dt}, \quad \frac{dv_{пч_{Bz}}}{dt} = -g.$$

$$\dot{x}_{пч_B} = v_{пч_{Bx}} = \frac{dv_{пч_{Bx}}}{dt}, \quad (2.28)$$

$$\dot{z}_{пч_B} = v_{пч_{Bz}} = v_{пч_{Bz}} \sin \gamma_{отв} - gt, \quad (2.29)$$

Выражения (2.21) и (2.22) представляют собой уравнения для проекций скорости полета частицы.

Перепишем уравнения еще раз, подставив соответственно:

$$v_{\text{пч}_B} = \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dx}{dt} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}}; \quad (2.30)$$

$$v_{\text{пч}_B} = \frac{dz}{dt}, \quad \frac{dz}{dt} = v_{\text{пч}_B} \sin \gamma_{\text{отв}} - gt, \quad (2.31)$$

Проинтегрировав еще раз, получим

$$x_{\text{пч}_B} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}} t; \quad (2.32)$$

$$z_{\text{пч}_B} = v_{\text{пч}_B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2}. \quad (2.33)$$

Выражения (2.32) и (2.33) являются уравнениями движения тела на участке  $BC$ .

Учитывая начальные условия, получим

$$x_{\text{пч}_C} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}} t; \quad (2.34)$$

$$z_{\text{пч}_C} = v_{\text{пч}_B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2} + h_B, \quad (2.35)$$

где  $h_B$  – расстояние от поверхности почвы до верхней кромки отвала, м.

Исключив параметр  $t$ , получим уравнение траектории относительного движения частицы почвы:

$$z_{\text{пч}_C} = x_{\text{пч}_C} \operatorname{tg} \gamma_{\text{отв}} - \frac{gx_{\text{пч}_C}^2}{2v_{\text{пч}_B}^2 \cos^2 \gamma_{\text{отв}}} + h_B. \quad (2.36)$$

В точке падения частицы на плоскость  $z_C = 0$ . Приравняв правую часть последнего уравнения к нулю и решив получившееся квадратное уравнение, получим относительную координату в точке  $C$  на плоскости  $xOy$ , куда падают частицы почвы.

$$x_{\text{пч}_C} = \frac{v_{\text{пч}_B}}{2g} (v_{\text{пч}_B} \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + \cos \gamma_{\text{отв}} \sqrt{v_{\text{пч}_B}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + 2gh_B}). \quad (2.37)$$

Подставляя в данную зависимость равенство (2.22), определим расстояние, на котором частица почвы упадет в точку на плоскости  $xOy$ . Чтобы определить расстояния между корпусом плуга и крайними рабочими органами катковой приставки, необходимо спроецировать расстояние  $Ox_C$  на координатные оси:



$$Y_{\text{пч min}} = x_{\text{пч c}} \sin \alpha_{\text{п}} ; \quad (2.38)$$

$$X_{\text{пч min}} = x_{\text{пч c}} \cos \alpha_{\text{п}} . \quad (2.39)$$

Из полученных зависимостей следует, что расстояние падения частиц почвенного пласта определяется (по степени убывания) параметрами корпусов плуга, скоростью агрегата, типом и состоянием почвы.

Рабочими органами для основной обработки почвы являются корпуса плугов. Лемех и отвал образуют рабочую поверхность корпуса плуга. Наиболее распространенной классификацией рабочих поверхностей и плужных корпусов является разделение их на цилиндрические, культурные, полувинтовые и винтовые. Основным признаком для классификации являются степень и характер воздействия рабочей поверхности на почвенный пласт.

Основные параметры различных типов рабочих поверхностей отечественных корпусов плуга приведены в табл. 2.2.

**Таблица 2.2.** Характеристики рабочих поверхностей корпусов плуга

Тип рабочей поверхности	Глубина обработки $a$ , см	Ширина захвата корпуса $b_{\text{к}}$ , см	$\gamma_{\text{лем}}$ , град	$\epsilon_{\text{лем}}$ , град	$\Delta\epsilon_{\text{лем}}$ , град
Культурная	18–25	25–40	40–45	25–30	4–5
Полувинтовая	18–25	30–45	35–40	22–27	8–10
Скоростная	18–25	30–40	38	27	2–4

На основании данных табл. 2.2, для различных типов рабочих поверхностей корпусов плуга построены графики зависимости дальности отбрасывания почвы от скорости движения агрегата ( $v_{\text{агр}} = v_{\text{пч o}}$ ) и состояния почвы ( $f_{\text{тр п}}$ ). (рис. 2.11, 2.12)

В Беларуси наиболее распространены зарубежные корпуса фирмы *Kverneland* № 28. Данный корпус предназначен для работы на всех типах почвы. Имея большую длину, он создает более плоский профиль для улучшенной вспашки. Пригоден для ведения пахоты глубиной от 15 до 30 см и шириной борозды от 35 до 50 см. Подставив основные параметры в формулы (2.22) и (2.37), получили зависимости для корпуса *Kverneland* с шириной захвата 35 см (рис. 2.11).

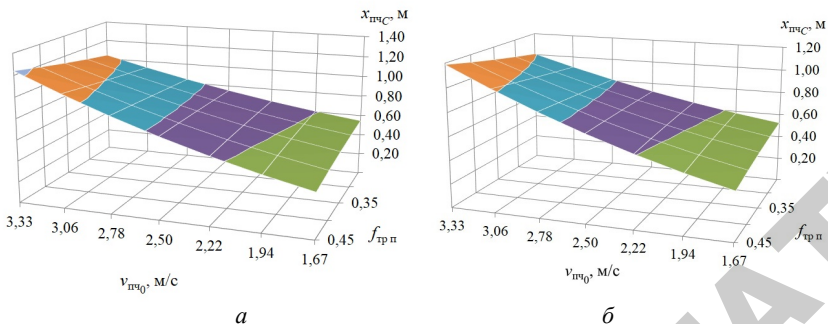


Рис. 2.11. Графическая зависимость дальности полета частицы почвы от скорости движения агрегата  $V_{пч0}$  и состояния почвы для полувинтовой (а) и скоростной (б) рабочей поверхности

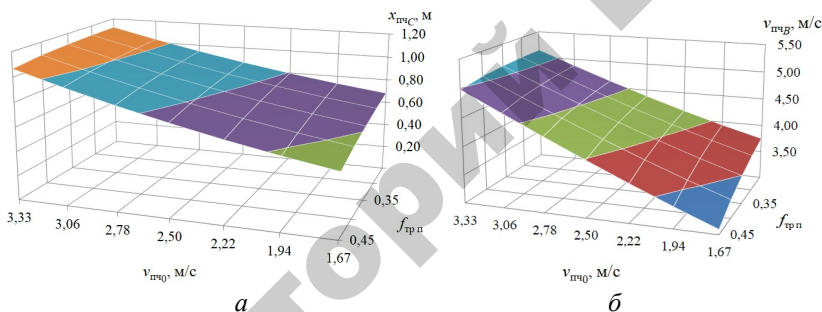


Рис. 2.12. Графическая зависимость начальной скорости (а) и дальности (б) полета частицы почвы от скорости движения агрегата  $v_0$  и состояния почвы для рабочей поверхности корпуса Kverneland № 28

Из полученных зависимостей следует, что наибольшее влияние на дальность полета частицы оказывают форма рабочей поверхности, скорость движения агрегата и свойства почвы. С ростом начальной скорости движения агрегата влияние коэффициента трения на дальность полета частицы уменьшается.

Из данных рис. 2.12 видно, что при выходе с корпуса плуга у частицы почвы скорость значительно возрастает, и такой рост скорости противоречит данным, полученным опытным путем. Это связано с тем, что при расчетах рассматривалась частица почвы, а не весь пласт. То есть формула (2.22) не учитывает взаимодействие между частицами, и для ее коррекции необходимо ввести коэффи-

циент, учитывающий связность почвы (экспериментально установлено что данный коэффициент принимает значение в пределах 0,4–0,6 в зависимости от состояния почвы).

Тогда формула (2.22) примет окончательный вид:

$$v_{\text{пч.в}} = k_{\text{п}} \left[ \left( e^{2 f_{\text{тпн}} s_{\text{оч}} \frac{\sin \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}}} \left( v_{\text{пч.о}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тпн}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тпн}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.40)$$

где  $k_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий взаимодействие частиц пласта.

Для получения более точной математической зависимости связывающей скорость плуга со скоростью схождения почвы с отвала плуга, необходимо рассмотреть движение пласта по поверхности отвала.

## **2.5. Обоснование параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах в зависимости от закономерностей движения почвенного пласта**

Дальность отбрасывания частиц почвенного пласта отвалом определяется скоростью движения агрегата, типом и параметрами отвала, размерами и состоянием пласта. В предыдущем разделе для изучения закономерностей оборачивания и отбрасывания почвенного пласта корпусом плуга были приняты следующие допущения: пласт принимается за материальную точку, скорость агрегата со временем не меняется, поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны. В результате чего в зависимость (2.22) был введен корректирующий коэффициент и формула приобрела окончательный вид (см. формулу (2.40)).

Почвенный пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала. Данное движение рассматривается как относительное, подвижная система отсчета связана с отвалом. При подрезании слоя почвы начальная величина относительной скорости принимается равной величине скорости агрегата. Так как отвал имеет довольно сложную конфигурацию, определять его

поверхность как окружность можно с большим приближением. В нашем случае кривизна отвала описывается не радиусом окружности, а уравнениями циклоиды, которую образуют точки окружности радиуса  $r_{ц}$  (рис. 2.13).

Рассмотрим частицу почвы массой  $m_{пч}$  на поверхности отвала. Свяжем с точкой подвижную систему координат  $(\tau, n)$ . Ось  $\tau$ - $\tau$  – касательная к циклоиде,  $n$ - $n$  – нормаль. Точка движется вдоль касательной к траектории движения, которая в каждый момент времени меняет направление. Запишем уравнение движения относительно оси  $\tau$ - $\tau$ . На точку будут действовать: сила тяжести  $G = m_{пч} g$ , сила внутреннего трения частиц пласта почвы  $F_{тр} = \mu \dot{s}$  ( $\mu$  – коэффициент сопротивления (вязкости), Н·с/м;  $\dot{s}$  – скорость почвенного пласта, м/с,  $s = \overset{\frown}{BM}$  – путь, пройденный точкой  $M$  за время  $t$ , м), сила тяги  $F_{\tau}$  и центробежная сила инерции  $\bar{F}_{ц}^{ин} = -m_{пч} \bar{a}_n$  ( $a_n$  – нормальное ускорение). Здесь и далее точками над буквами обозначаем производную по времени  $t$ , а штрихами – производную по  $x$ . Сила сопротивления обусловлена внутренним трением движения частиц пласта почвы (крошение, перемешивание, переупаковка порового пространства).

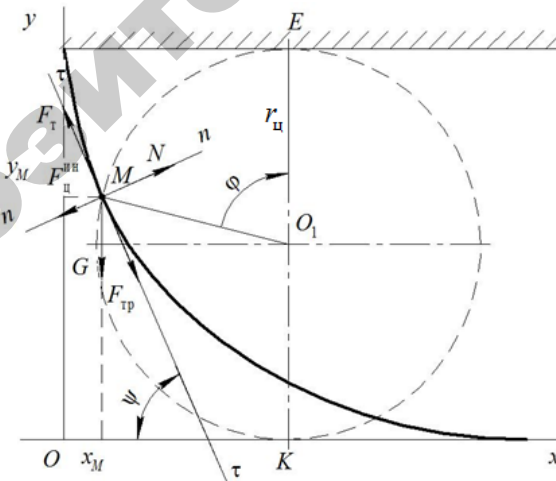


Рис. 2.13. Кинематика движения почвенного пласта

Имеем

$$m_n \frac{d^2 s}{dt_1^2} = -m_n g \sin \psi - F_{\text{тр}} + F_{\tau}, \quad (2.41)$$

где  $\psi$  – угол наклона касательной, проведенной к циклоиде в точке  $M$ , к горизонту, град;  $m_n$  – масса пласта, кг.

Учитывая, что  $F_{\text{тр}} = \mu \mathfrak{R}$ , уравнение (2.41) можно записать в следующем виде:

$$m_n \frac{d^2 s}{dt_1^2} = -m_n g \sin \psi - \mu \frac{ds}{dt_1} + F_{\tau}.$$

Данное уравнение содержит три переменные:  $s$ ,  $t_1$ ,  $\psi$ . Предположим, что поверхность отвала может быть описана уравнением «перевернутой» циклоиды, где  $r_{\text{ц}}$  – радиус катящегося по горизонтальной линии (потолку) круга (рис. 2.13):

$$\left. \begin{aligned} x &= r_{\text{ц}} (\varphi + \sin \varphi), \\ y &= r_{\text{ц}} (1 + \cos \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

где  $\varphi$  – угол между прямой, проведенной из центра круга  $O_1$ , перпендикулярно потолку, и отрезком, соединяющим точку  $M$  и центр круга  $O_1$ , град.

Из системы уравнений (2.42) составим выражение для производной:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{r_{\text{ц}} \sin \varphi}{r_{\text{ц}} (1 - \cos \varphi)} = -\frac{2 \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}}{2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = -\text{ctg} \frac{\varphi}{2}. \quad (2.43)$$

В то же время дифференциал дуги циклоиды есть выражение

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx. \quad (2.44)$$

Подставив выражение (2.43) в равенство (2.44), получим дифференциал дуги циклоиды:

$$ds = \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}} dx. \quad (2.45)$$

Из первого уравнения (2.42) найдем

$$dx = r_u (1 - \cos \varphi) d\varphi = 2r_u \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (2.46)$$

Тогда равенство (2.45) примет следующий вид:

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}} 2r_u \sin^2 \frac{\varphi}{2} d\varphi = 2r_u \sin \frac{\varphi}{2} d\varphi. \quad (2.47)$$

После интегрирования (2.47), получим путь проходимого точкой почвы по плугу:

$$s = \int_0^{\varphi} 2r_u \sin \frac{\varphi}{2} d\varphi = 4r_u \cos \frac{\varphi}{2} \Big|_0^{\varphi} = 4r_u (1 - \cos \frac{\varphi}{2}). \quad (2.48)$$

Отсюда

$$\cos \frac{\varphi}{2} = 1 - \frac{s}{4r_u}. \quad (2.49)$$

Согласно данным (рис. 2.13), можно записать:

$$\frac{dy}{dx} = -\operatorname{tg} \psi.$$

Учитывая равенство (2.43), путем простых преобразований получим

$$\sin \psi = \operatorname{tg} \psi \cos \psi = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} = \frac{-\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \quad (2.50)$$

$$= \frac{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}}} = \cos \frac{\varphi}{2}.$$

Сравнивая равенства (2.49) и (2.50), получим

$$\sin \psi = 1 - \frac{s}{4r_u}. \quad (2.51)$$

Уравнение движения (2.41) частицы почвы по поверхности плуга с учетом (2.51) запишем в виде

$$m_n \ddot{s} = -m_n g \left(1 - \frac{s}{4r_u}\right) - \mu \dot{s} + F_T, \quad \dot{s} = \frac{ds}{dt_1}; \quad \ddot{s} = \frac{d^2s}{dt_1^2}.$$

Уравнение преобразуем к виду

$$\ddot{s} = -g + \frac{gs}{4r_u} - \frac{\mu}{m_n} \dot{s} + \frac{F_T}{m_n}. \quad (2.52)$$

Введем обозначение:

$$A = \frac{\mu}{m_n}; \quad B = \frac{g}{4r}; \quad D = \frac{F_T}{m_n}. \quad (2.53)$$

Тогда равенство (2.52) с учетом равенства (2.53) приводят к уравнению

$$\ddot{s} + A\dot{s} - Bs = \Phi, \quad (2.54)$$

где  $\Phi = D - g$ .

Решение уравнения (2.54) запишем в виде суммы:

$$s = s_1 + s_2,$$

где  $s_1$  – общий интеграл уравнения;  $s_2$  – частный интеграл уравнения.

Решение однородного уравнения

$$\ddot{s} + A\dot{s} - Bs = 0. \quad (2.55)$$

находим в виде  $s_1 = e^{\lambda t_1}$ .

Характеристическое уравнение  $\lambda^2 + A\lambda - B = 0$  имеет корни

$$\lambda_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B}}{2}. \quad (2.56)$$

Поэтому решение уравнения (2.55) имеет вид

$$s_1 = c_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 e^{\lambda_2 t_1}, \quad (2.57)$$

где  $t_1$  – время движения почвы по корпусу плуга, с.

Частное решение запишем в виде

$$s_2 = E (E = \text{const}). \quad (2.58)$$

Так как  $\mathfrak{S}_2 = 0$ ,  $\mathfrak{S}_2 = 0$ , то из уравнения (2.54) получим

$$s_2 = E = -\frac{\Phi}{B} = 4r_u \left( 1 - \frac{D}{g} \right). \quad (2.59)$$

С учетом равенств (2.57) и (2.59), решение уравнения (2.54) будет следующим:

$$s = c_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 e^{\lambda_2 t_1} + E. \quad (2.60)$$

В начальный момент времени  $t_0 = 0$ ,  $s_0 = 0$ ,  $\mathfrak{S}_0 = v_{\text{арп}} \cdot \cos \psi = v_{n0}$ . Продифференцируем равенство (2.60) по  $t_1$ :

$$\mathfrak{S} = c_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1}. \quad (2.61)$$

Подставив начальные условия в равенства (2.60) и (2.61), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = -E, \\ \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = v_{n0}. \end{cases} \quad (2.62)$$

Данная система имеет решение, так как

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{vmatrix} = -\sqrt{A^2 + 4B} \neq 0.$$

Решая систему уравнений (2.62), найдем

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -E & 1 \\ v_{n0} & \lambda_2 \end{vmatrix} = -E\lambda_2 - v_{n0} = -(E\lambda_2 + v_{n0});$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -E \\ \lambda_2 & v_{n0} \end{vmatrix} = v_{n0} + E\lambda_1.$$

Следовательно:

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{E\lambda_2 + v_{n0}}{\sqrt{A^2 + 4B}}, \quad (2.63)$$

$$c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{v_{n0} + E\lambda_1}{-\sqrt{A^2 + 4B}}. \quad (2.64)$$



Подставив  $c_1$  и  $c_2$  в равенство (2.60), получим уравнение движения пласта почвы по поверхности плуга:

$$s = \frac{E\lambda_2 + v_{n0}}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{v_{n0} + E\lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1} + E. \quad (2.65)$$

Взяв производную по времени равенства (2.65), получим скорость движения пласта:

$$\dot{s} = \frac{(E\lambda_2 + v_{n0})\lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{(v_{n0} + E\lambda_1)\lambda_2}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1}. \quad (2.66)$$

Преобразуем равенства (2.65) и (2.66) к виду:

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E\lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} + v_{n0} e^{\lambda_1 t_1} - v_{n0} e^{\lambda_2 t_1} - E\lambda_1 e^{\lambda_2 t_1} \right] + E = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E(\lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t_1}) + v_{n0} (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1}) \right] + E, \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E\lambda_2 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + v_{n0} \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - v_{n0} \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} - E\lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} \right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E\lambda_1 \lambda_2 (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1}) + v_{n0} (\lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1}) \right]. \end{aligned} \quad (2.68)$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} \lambda_1 \lambda_2 &= \left( -\frac{A}{2} + \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) \left( -\frac{A}{2} - \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) = \left( -\frac{A}{2} \right)^2 - \left( \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right)^2 = \\ &= \frac{A^2}{4} - \frac{A^2 + 4B}{4} = -B = -\frac{g}{4r}. \end{aligned}$$

$$E = 4r_{\text{н}} \left( 1 - \frac{D}{g} \right) = 4r_{\text{н}} \left( 1 - \frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{н}} g} \right),$$

$$E\lambda_1 \lambda_2 = \left( 4r_{\text{н}} - \frac{4r_{\text{н}} F_{\text{т}}}{m_{\text{н}} g} \right) \left( -\frac{g}{4r_{\text{н}}} \right) = \frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{н}}} - g.$$

Из физических соображений должно выполняться условие:

$$\frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{н}}} - g > 0 \Rightarrow F_{\text{т}} > m_{\text{н}} g. \quad (2.69)$$

Из приведенных выше рассуждений следует, что  $F_{\tau} > m_{\text{пч}} g$ , т. е. сила тяги пласта почвы должна быть больше его силы тяжести. Анализ равенств (2.67) и (2.68) показывает, что  $s$  и  $\delta$  будут расти, если  $F_{\tau} > m_{\text{пч}} g$ , т. е. сила тяги пласта почвы должна быть больше ее силы тяжести в каждой точке траектории движения по поверхности отвала. Для определения силы тяги вдоль плуга составим уравнения равновесия относительно касательной и нормальной осей.

Рассмотрим систему сил, действующих на материальную точку пласта. Силу тяги агрегата разложим на две составляющие вдоль осей  $F_{\tau}$  и  $F_n$ :

$$\sum F_{\text{кт}} = 0; \quad F_{\tau} - F_{\text{тр}} - m_{\text{пч}} g \sin \psi = 0; \quad (2.70)$$

$$\sum F_{\text{кн}} = 0; \quad N - F_n - m_{\text{пч}} g \cos \psi = 0, \quad (2.71)$$

где  $m_{\text{пч}}$  – масса материальной точки пласта, кг.

Откуда сила тяги

$$F_{\tau} = F_{\text{тр}} + m_{\text{пч}} g \sin \psi = f_{\text{трп}} N + m_{\text{пч}} g \sin \psi. \quad (2.72)$$

Определим  $N$

$$N = F_n + m_{\text{пч}} g \cos \psi = F_0 \sin \psi + m_{\text{пч}} g \cos \psi, \quad (2.73)$$

где  $F_0$  – сила тяги плуга, Н.

Подставив равенство (2.73) в (2.72), получим силу тяги

$$F_{\tau} = f_{\text{трп}} F_0 \sin \psi + m_{\text{пч}} g (f_{\text{трп}} \cos \psi + \sin \psi). \quad (2.74)$$

При  $\psi = 0$ , сила тяги, действующая на пласт почвы, будет равна тяге плуга в случае покоя:

$$F_{\tau} = f_{\text{трп}} m_{\text{пч}} g = N f_{\text{трп}} = F_{\text{тр}}. \quad (2.75)$$

Вход пласта на плуг происходит при  $30^\circ$ , сход – при  $90^\circ$ .

При  $\psi = \frac{\pi}{2}$  из равенства (2.73) имеем

$$F_{\tau} = f_{\text{трп}} F_0 + m_{\text{пч}} g. \quad (2.76)$$

При сходе пласта с поверхности плуга  $f = 0$ , следовательно:

$$F_{\tau} = m_{\text{пч}} g. \quad (2.77)$$

В формулах (2.67) и (2.68) разложим  $e^{\lambda_i t}$  ( $i = 1, 2$ ) в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами. Тогда равенство (2.67) можно записать в виде

$$s = \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E \left[ I_2 (1 + I_1 t_1) - I_1 (1 + I_2 t_1) \right] + v_{n0} (1 + I_1 t_1 - 1 - I_2 t_1) \right] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ E(I_2 - I_1) + v_{n0} \right] + \frac{t_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[ v_{n0} (I_1 - I_2) \right]. \quad (2.78)$$

Откуда найдем время движения пласта почвы по отвалу корпуса плуга:

$$t_1 = \frac{s\sqrt{A^2 + 4B} - E(I_2 - I_1) - v_{n0}}{v_{n0}(I_1 - I_2)}. \quad (2.79)$$

Зная время движения пласта по отвалу (см. формулу (2.79)), по формуле (2.68) можно определить его скорость  $v_n$  вдоль траектории  $s$ , в том числе скорость на кромке отвала в момент времени  $t_1$  будет равна  $v_0$ .

С помощью формул (2.53), (2.68), (2.73), (2.79) можно исследовать кинематику движения пласта, зависимость изменения скорости пласта по поверхности плуга в зависимости от изменения угла  $\psi$ .

Как видно из данных (рис. 2.14), скорость точек пласта относительно корпуса плуга в начальный момент времени резко падает, что связано с началом деформации почвенного пласта на лемехе плуга (сгруживание), далее почва попадает на отвал и начинает ускоряться.

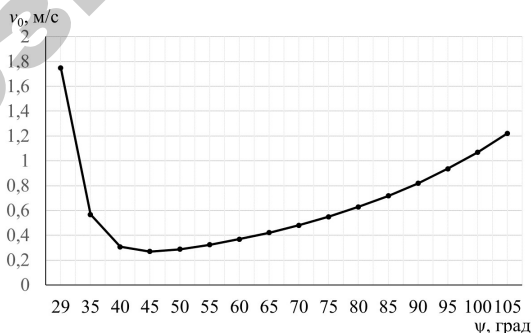


Рис. 2.14. График зависимости скорости движения пласта от его положения на корпусе плуга (угла  $\psi$ )

Согласно данным (рис. 2.15), сила тяги пласта на поверхности плуга по траектории циклоиды так же растет до  $85^\circ$ , после чего начинает падать.

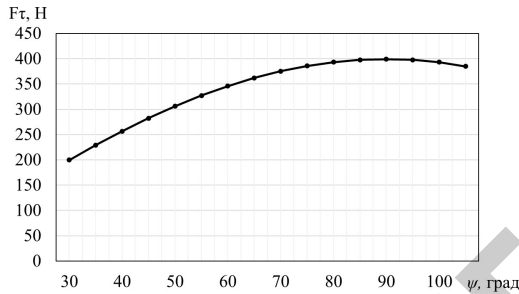


Рис. 2.15. График зависимости силы тяги от угла наклона траектории циклоиды

При построении графиков учитывался максимальный возможный путь материальной точки пласта. Построены графики зависимости изменения скорости движения пласта от скорости агрегата (рис. 2.16) и пути, пройденного по траектории (рис. 2.17).

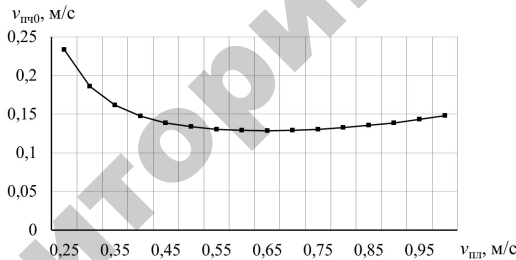


Рис. 2.16. График зависимости скорости движения пласта на выходе с отвала от скорости движения плуга

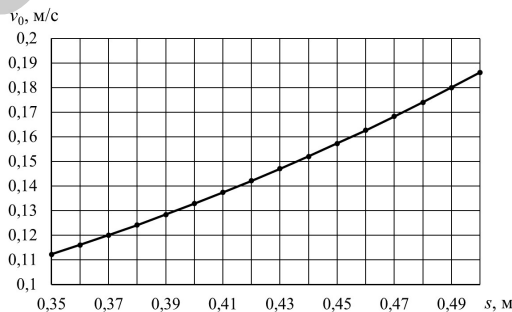


Рис. 2.17. График зависимости скорости  $v_0$  от длины пути  $s$

Полученные выше параметры движения частиц почвы были связаны с ее относительным движением по отношению к движущемуся плугу. Далее частица пласта вылетает с верхней кромки отвала, двигаясь в пространстве относительно неподвижной системы координат (рис. 2.18). Начальная скорость полета частицы пласта будет равна ее конечной скорости на кромке отвала, которую можно получить из формулы (2.66) или (2.67), подставив в нее время движения частицы почвы по отвалу.

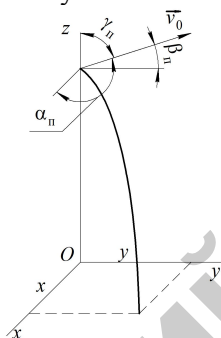


Рис. 2.18. Траектория движения пласта почвы

Полет пласта почвы при отсутствии сил сопротивления воздуха можно описать уравнениями движения:

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x} &= 0, \\ m_n \ddot{y} &= 0, \\ m_n \ddot{z} &= -mg. \end{aligned} \quad (2.80)$$

После интегрирования

$$\left. \begin{aligned} x &= c_1, \\ x &= c_1 t_2 + c_2, \\ y &= c_3, \\ y &= c_3 t_2 + c_4, \\ z &= -gt_2 + c_5, \\ z &= -\frac{gt_2^2}{2} + c_5 t_2 + c_6, \end{aligned} \right\} \quad (2.81)$$

где  $t_2$  – время полета частицы почвы, с; при  $t_2 = 0$ ,  $z = h_0$ ,  $v = v_0$ , где  $v_0$  – скорость пласта почвы на кромке отвала, м/с;  $h_0$  – высота от поверхности почвы до кромка отвала, м.

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= v_0 \cos \alpha_n; x_0 = 0, \\ y_0 &= v_0 \cos \beta_n; y_0 = 0, \\ z_0 &= v_0 \cos \gamma_n; z_0 = z_0 = h_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.82)$$

Найдем  $c_i$  ( $i = 1-6$ ):

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= v_0 \cos \alpha_n, \\ c_2 &= 0, \\ c_3 &= v_0 \cos \beta_n, \\ c_4 &= 0, \\ c_5 &= v_0 \cos \gamma_n, \\ c_6 &= h_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.83)$$

Подставим значения из равенств (2.83) в равенства (2.81). Получим уравнения движения:

$$\left\{ \begin{aligned} x &= v_0 t_2 \cos \alpha_n, \\ y &= v_0 t_2 \cos \beta_n, \\ z &= -\frac{gt_2^2}{2} + v_0 t_2 \cos \gamma_n + h_0. \end{aligned} \right. \quad (2.84)$$

Из первых двух уравнений (2.84) получим

$$x + y = v_0 t_2 (\cos \alpha_n + \cos \beta_n),$$

откуда

$$t_2 = \frac{x + y}{v_0 (\cos \alpha_n + \cos \beta_n)}. \quad (2.85)$$

Подставим равенство (2.85) в третье уравнение (2.84), получим уравнение траектории:

$$z = -\frac{g(x + y)^2}{2v_0^2 (\cos \alpha_n + \cos \beta_n)^2} + \frac{\cos \gamma_n (x + y)}{\cos \alpha_n + \cos \beta_n} + h_0 \quad (2.86)$$

Определим время падения пласта почвы из третьего уравнения (2.84), принимая  $z = 0$ :

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{gt_2^2}{2} + v_0 t_2 \cos \gamma_n + h_0, \\ gt_2^2 - 2v_0 t_2 \cos \gamma_n - 2h_0 &= 0, \end{aligned}$$

$$t_2 = \frac{2v_0 \cos \gamma_{\Pi} \pm \sqrt{4v_0^2 \cos^2 \gamma_{\Pi} + 8gh_0}}{2g}. \quad (2.87)$$

Время падения будет соответствовать положительному значению выражения (2.87). Как видно из формулы (2.91), время падения частицы почвы на поле зависит от скорости на кромке отвала, высоты корпуса плуга и угла между осью  $Oz$  и вектором скорости на кромке отвала. При  $\gamma_{\Pi} = \frac{\pi}{2}$ , имеем минимальное время падения, т. е.

$$t_2 = \frac{\sqrt{2gh_0}}{g}. \quad (2.88)$$

Графики изменения времени падения пласта почвы, построенные по зависимостям (2.87) (при  $v_0 = 2,7$  м/с) и (2.88), представлены на рис. 2.19.

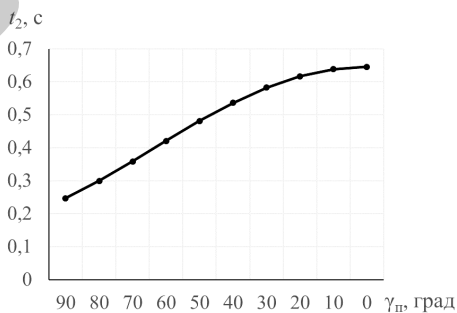
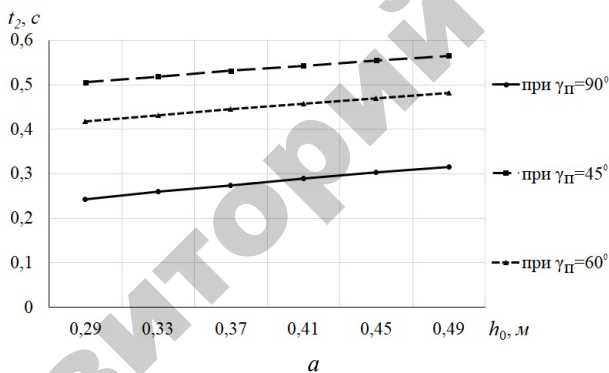


Рис. 2.19. Графики зависимости времени полета  $t$  частицы от высоты  $h_0(a)$  угла  $\gamma_{\Pi}$  (б)

Полагая, что поступательное движение плуга осуществляется вдоль оси  $y$  определим координату  $(x; y)$  места падения пласта почвы на поле. Учитывая зависимость (2.88), из первых двух уравнений (2.84) получим

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \alpha_{\text{п}}, \\ y = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \beta_{\text{п}}. \end{cases} \quad (2.89)$$

Отметим, что углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  задаются конструктивными параметрами плуга (крючки отвала). Полученные значения координат будут показывать точку, ближайшую к корпусу, поэтому к окончательному значению необходимо добавить высоту пласта (глубину обработки).

На рис. 2.20 представлены данные зависимости дальности полета частицы от скорости корпуса плуга.

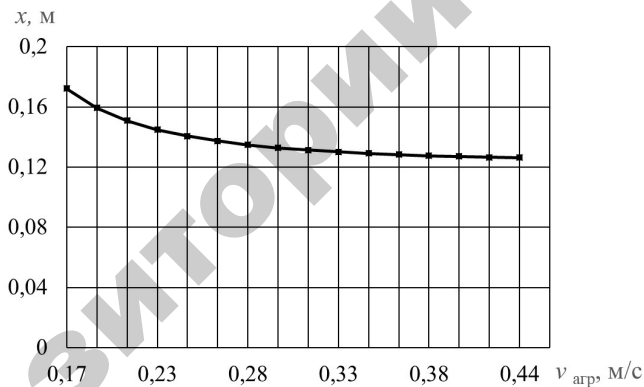


Рис. 2.20. График зависимости дальности полета частицы от скорости движения корпуса плуга

Полученные уравнения позволяют определить дальность полета частицы. Для уточнения полученных зависимостей необходимо в полевых или лабораторных условиях провести эксперимент.

На энергозатраты, металлоемкость и качество обработки почвы при совмещении операций основной и поверхностной обработки наибольшее влияние оказывает способ установки, режимы работы и конструктивные параметры рабочих органов приставок.



## 2.6. Обоснование основных конструктивных параметров почвообрабатывающих кольчато-прутковых рабочих органов катковых приставок

Наиболее универсальными в применении являются кольчато-шпоровые катки с различными формами уплотняющих элементов, которые качественно крошат, выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы (рис. 2.21). На качество выполняемого технологического процесса влияют конструкция, геометрические размеры катков, кинематические и динамические параметры их работы, а также состояние обрабатываемого агрофона. В настоящее время в конструкциях рабочих органов почвообрабатывающих катков используются шпору прямоугольного, треугольного и круглого сечений, которые при внедрении в почву ведут себя по-разному.



Рис. 2.21. Кольчато-шпоровый (а) и кольчато-прутковый (б) рабочие органы почвообрабатывающих катков

Кольчато-прутковый рабочий орган состоит из диска, на котором вдоль кромки закреплены уплотняющие элементы. Обоснуем выбор формы и геометрических параметров уплотняющего элемента.

При внедрении штампа (шпору) прямоугольного сечения в почву (рис. 2.22, а), под ним образуется почвенный клин, вдоль сторон которого происходит движение частиц почвы. Примем, что угол при основании клина равен углу внутреннего трения почвы  $\varphi_1$ . Найдем высоту образующегося почвенного клина  $h_{\text{кл}}$

$$h_{\text{кл}} = \frac{b_{\text{ш}}}{2} \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (2.90)$$

где  $b_{\text{ш}}$  – ширина шпору, м.

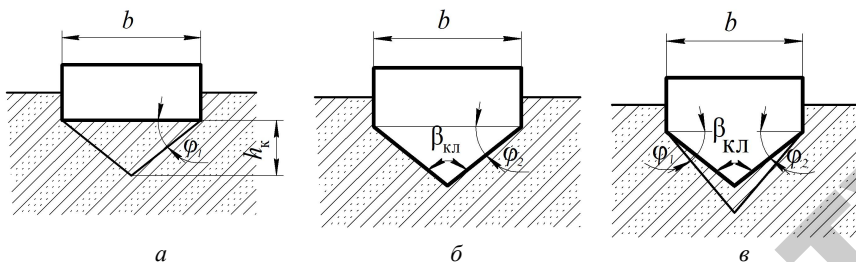


Рис. 2.22. Схемы внедрения в почву шпор различной формы:  
 а – прямоугольной; б, в – треугольной

При внедрении штампа треугольного сечения (уголок) в почву (рис. 2.22, б), почвенный клин под штампом не будет образовываться, если угол при основании клина  $\varphi_1$  будет больше угла трения почвы о металл  $\varphi_2$ . Из этого следует, что угол при вершине клина выбирается из условия

$$\beta_{\text{кл}} \leq 180 - 2\varphi_2. \quad (2.91)$$

Если угол при вершине  $\beta_{\text{кл}} > 180 - 2\varphi_2$ , то на поверхности штампа образуется почвенный клин с углом при основании  $\varphi_1$  (рис. 2.22, в).

После того, как клин сформировался, дальнейшее заглубление шпору будет влиять только на глубину распространения уплотнения, а плотность почвы увеличиваться не будет. Поэтому для достижения максимального значения плотности шпору необходимо заглубить в почву на высоту клина.

При одновременном воздействии на почву двух прямоугольных шпор (рис. 2.23) глубина пересечения создаваемых ими зон уплотнений определяется по формуле

$$h_1 = \frac{b_{\text{ш}}}{2} \operatorname{tg}\varphi_1 + \left( \frac{l}{2} - \frac{b_{\text{ш}}}{2} \right) \operatorname{ctg}\varphi_1$$

или

$$l = \frac{2 \cdot h_1 - b_{\text{ш}} \operatorname{tg}\varphi_1 + b_{\text{ш}} \operatorname{ctg}\varphi_1}{\operatorname{ctg}\varphi_1}, \quad (2.92)$$

где  $l$  – расстояние между уплотняющими элементами, м.

Задавая  $h_1$ , можно определить расстояние между шпорами.

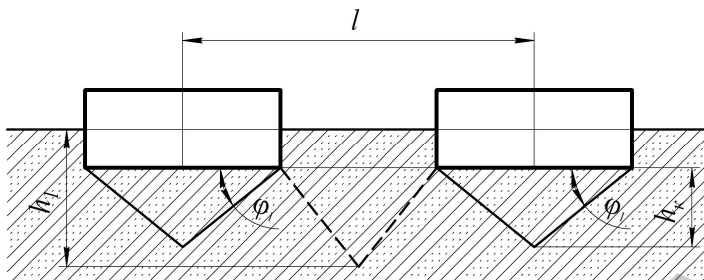


Рис. 2.23. Схема одновременного воздействия двух шпор на почву

Ширина шпоры  $b_{ш}$  для кольчато-шпоровых катков определяется из прочностных и технологических условий. Углы трения зависят от физико-механических свойств и состояния почвы (значения коэффициента берем из табл. 2.1 и 2.3).

Таблица 2.3. Значения коэффициента внутреннего трения в зависимости от типа почв

Типы почв			
Супесь	Суглинок средний	Суглинок тяжелый	Глина легкая
0,8	1,0	1,1	1,2

Расстояние между шпорами треугольного сечения для случая, когда  $\beta > 180 - 2\varphi_2$ , определяется по формуле (2.92). Для случая, когда  $\beta \leq 180 - 2\varphi_2$ , расстояние между шпорами определяется по формуле

$$l = 2 \cdot h_1 \operatorname{ctg} \left( \frac{\beta}{2} \right) - b_{ш} \operatorname{ctg}^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) + b_{ш}. \quad (2.93)$$

При внедрении шпоры круглого сечения (прутка) в почву (рис. 2.24) клин будет формироваться на дуге  $AB$ , ограниченной центральным углом, равным  $2\varphi_3$ . Его высота определяется по формуле

$$h_k = r_{пр} \sin \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b}{2} \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (2.94)$$

где  $b = 2r_{пр} \cdot \sin \varphi_2$ ;  $b$  – ширина основания клина, м;  $r_{пр}$  – радиус прутка, м.

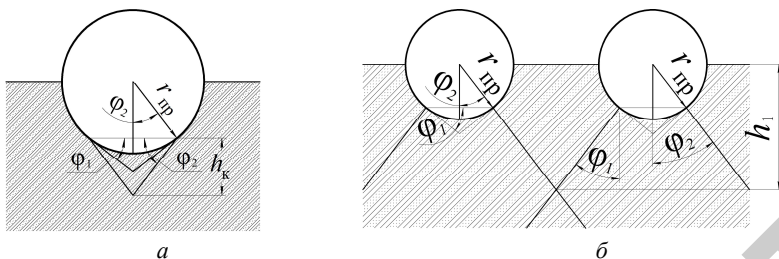


Рис. 2.24. Схема внедрения шпор круглого сечения в почву

Максимальная плотность почвы в зоне уплотнения прутка достигается при его заглублении на глубину, равную радиусу. Дальнейшее его заглубление ведет лишь к увеличению глубины распространения уплотнения.

$$h_1 = r_{\text{пр}} \cos \varphi_2 + \left( \frac{l}{2} - r_{\text{пр}} \sin \varphi_2 \right) \operatorname{ctg} \varphi_1$$

или

$$l = \frac{2(h_1 - r_{\text{пр}} \cos \varphi_2 + r_{\text{пр}} \sin \varphi_2 \operatorname{ctg} \varphi_1)}{\operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (2.95)$$

Для определения расстояния  $r_{\text{уст}}$ , на которое удалены центры прутков относительно центра диска (радиуса окружности) рассмотрим случай, когда в почву внедряется только один пруток, и глубина его погружения равна его радиусу.

Из данных рис. 2.25 определим расстояние между прутками

$$l^2 = 2r_{\text{уст}}^2 - 2r_{\text{уст}}^2 \cos 2\alpha_1. \quad (2.96)$$

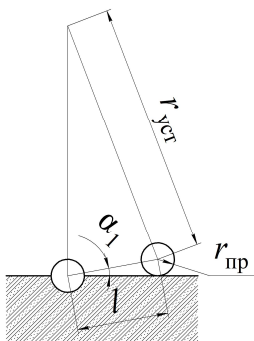


Рис. 2.25. Схема к определению расстояния между центром диска и центрами прутков кольчато-пруткового катка

Зная, что  $\cos 2\alpha_1 = 1 - 2\sin^2 \alpha_1$ , после несложных преобразований уравнения (2.96), получим

$$r_{\text{уст}}^2 = \frac{l^2}{2r_{\text{пр}}}. \quad (2.97)$$

Для шпор уравнение примет вид

$$r_{\text{уст}} = \frac{l^2}{b_{\text{ш}} \operatorname{tg} \varphi_1}. \quad (2.98)$$

В результате исследований получены выражения для обоснования конструктивных параметров кольчато-шпоровых катков в зависимости от конструктивных особенностей шпор, прочностных и технологических условий и физико-механических свойств почвы.

Исследования показали, что применение штампов круглого сечения (прутков) в качестве уплотняющих элементов позволяет получить лучшие результаты по уплотнению почвы.

## 2.7. Взаимодействие уплотняющих рабочих органов кольчато-пруткового ката с почвой

Рассмотрены некоторые кинематические и силовые аспекты взаимодействия прутка с почвой. Все прутки равноудалены друг от друга и закреплены на диске на расстоянии  $r_{\text{уст}}$  относительно его геометрического центра. Радиус самого диска обозначим через  $R_{\text{д}}$ . Рассмотрим процесс вхождения прутка в почву в плоскости  $xOy$ . Обозначим через точку  $B$  момент вхождения его в почву. Уравнения движения точки  $B$  в почве (рис. 2.26):

$$\begin{cases} x = x_0 + \zeta; & (0 \leq \zeta \leq CB'; \quad x_0 = AC); \\ y = y_0 + \eta; & (0 \leq \eta \leq BC; \quad y_0 = OK) \end{cases} \quad (2.99)$$

или

$$\begin{cases} \zeta = x - x_0 = x - R_{\text{д}} \sin \alpha; & (AC \leq x \leq AB'); \\ \eta = y - y_0 = y - R_{\text{д}} \cos \alpha; & (0 \leq y \leq OA), \end{cases} \quad (2.100)$$

где  $\alpha$  – угол, который определяет положение прутка при вхождении в почву, град,  $\alpha = \omega t$  ( $\omega$  – угловая скорость диска,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время, с).

Исходя из данных рис. 2.26, для точки  $B'$  уравнения (2.100) можно записать в виде

$$\zeta = r_{\text{ycr}} \alpha - r_{\text{ycr}} \sin \alpha = r_{\text{ycr}} (\alpha - \sin \alpha); \quad (2.101)$$

$$\eta = r_{\text{ycr}} - r_{\text{ycr}} \cos \alpha = r_{\text{ycr}} (1 - \cos \alpha). \quad (2.102)$$

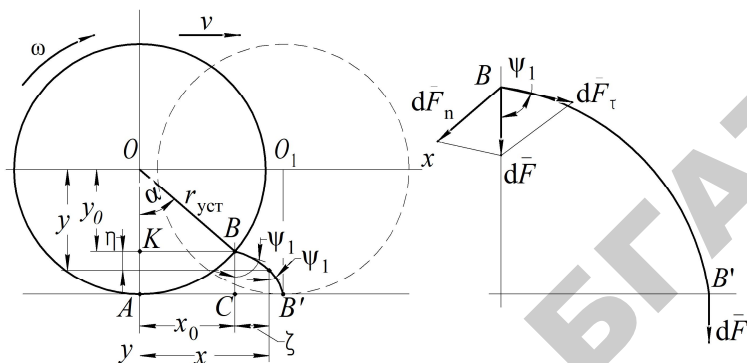


Рис. 2.26. Схема к определению кинематических параметров движения уплотняющих рабочих органов кольчато-прутового катка и закономерностей воздействия их на почву

Траекторией движения прутка в почве в плоскости  $xOy$ , согласно уравнениям (2.101) и (2.102), будет циклоида. При движении вдоль циклоиды пруток переупаковывает частицы почвы, изменяя пористость и плотность. Вектор скорости движения прутка вдоль траектории будет проходить по касательной к траектории циклоиды  $BB'$ . При этом угол  $\psi_1$  между касательной и прямой  $BC$  будет меняться, т. е. он зависит от времени  $\psi_1 = \psi_1(t)$ . Примем, что  $\psi_1 = bt$  ( $b = \frac{d\psi_1}{dt}$  – угловая частота движения точки  $B$  по циклоиде).

$$v = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad (2.103)$$

где  $\xi = \dot{x} - b r_{\text{ycr}} \cos \psi_1$ ,  $\eta = \dot{y} + b r_{\text{ycr}} \sin \psi_1 = b r_{\text{ycr}} \sin \psi_1$ .

При неравномерном движении диска по полю  $\omega \neq \text{const}$  ускорение прутка вдоль траектории будет определяться уравнением

$$a = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad (2.104)$$

где  $\xi = \ddot{x} - b \frac{dr_{\text{ycr}}}{dt} \cos \psi_1 + b^2 r_{\text{ycr}} \sin \psi_1$ ;  $\eta = \ddot{y} + b \frac{dr_{\text{ycr}}}{dt} \sin \psi_1 + b^2 r_{\text{ycr}} \cos \psi_1$ .

Таким образом, переупаковка твердых и жидких частиц почвы под прутком происходит со скоростью и ускорением согласно уравнениям (2.103) и (2.104). Так как в процессе работы диска может возникать его скольжение и проскальзывание, то и прутки, жестко закрепленные на нем, при взаимодействии с почвой будут участвовать в указанных процессах. В этом случае прутки будут иметь удлиненные или укороченные траектории уплотнения почвы, которые определяются уравнениями

$$\zeta = x - \lambda r_{\text{уст}} \sin \alpha, \quad (2.105)$$

$$\eta = y - \lambda r_{\text{уст}} \cos \alpha, \quad (2.106)$$

где  $\lambda$  – отношение радиусов воображаемого диска к реальному ( $\lambda > 1$  при скольжении и  $\lambda < 1$  – при буксовании). Обозначим коэффициент скольжения через  $k$ , коэффициент буксования через  $\delta$ . Так как  $k = \lambda - 1$ ,  $\delta = \lambda + 1$ , тогда уравнение движения прутка при скольжении диска будет имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + k)r_{\text{уст}} \sin \alpha, \\ \eta = y - (1 + k)r_{\text{уст}} \cos \alpha. \end{cases} \quad (2.107)$$

При буксовании диска имеем

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + \delta)r_{\text{уст}} \sin \alpha, \\ \eta = y - (1 + \delta)r_{\text{уст}} \cos \alpha. \end{cases} \quad (2.108)$$

Вариант буксования не рассматривается, так как вероятность его возникновения ничтожно мала. Отметим, что скольжение диска – не редкое явление при обработке почвы.

Рассмотрим силовую схему взаимодействия прутка с почвой. Будем считать, что втулка заглубляется в почву под действием силы

$$F = P + F_d, \quad (2.109)$$

где  $P$  – вес кольчато-пруткового катка,  $H$ ;  $F_d$  – вспомогательная сила,  $H$ .

Со стороны почвы данной силе будет противодействовать реакция почвы, которая будет расти с увеличением глубины заглубления втулки.

Обозначим результирующую силу, приходящуюся на один пруток при заглублении в почву, через  $d\bar{F}$ , которую разложим на две составляющие: одна –  $d\bar{F}_\tau$  направлена по касательной вдоль траектории (циклоиды), другая –  $d\bar{F}_n$  – по внутренней нормали к траектории.

Примерно можно считать, что в точке  $B$  угол между  $d\bar{F}$  и  $d\bar{F}_\tau$  равен  $\alpha$ , т. е.  $\psi_1 = \alpha$ . Тогда

$$dF_\tau = dF \cos \psi_1, \quad dF_n = dF \sin \psi_1. \quad (2.110)$$

В процессе движения точки  $B$  по траектории углы  $\alpha$  и  $\psi_1$  будут меняться, приближаясь к нулю в точке  $B'$ . Таким образом влияние касательной и нормальной силы на переупаковку почвенных частиц вдоль траектории движения втулки будет разное.

Так как угол  $\varphi$  в точке  $B'$  будет равным нулю, то основное уплотнение почвы проходит при действии касательной силы, максимальное значение которой будет в точке  $B'$ .

Примем, что уплотняющей поверхностью прутка является ее нижняя поверхность. Тогда площадь контакта прутка с почвой будет равна

$$S = \pi l_{\text{пр}} \frac{d_{\text{пр}}}{2}, \quad (2.111)$$

где  $l_{\text{пр}}$  и  $d_{\text{пр}}$  – соответственно, длина и диаметр прутка, м.

Будем считать, что уплотняющее воздействие на почву оказывает только нижняя часть прутка площадью  $S$ , которая контактирует с почвой, поэтому можно записать:

$$dF = g_c S d_{\text{пр}} h_{\text{пр}} = g_c \frac{\pi l_{\text{пр}} d_{\text{пр}}}{2} dh, \quad (2.112)$$

где  $g_c$  – коэффициент объемного смятия (удельное уплотнение), учитывающий свойства почвы,  $\text{Н/см}^3$ . Его значения (в зависимости от агрофизического состояния почвы) приведены в табл. 2.4;  $dh$  – элементарное значение заглубления прутка в почву, м,

Отметим, что произведение  $g_c dh$  играет роль элементарного напряжения в зоне контакта прутка с почвой.



**Таблица 2.4.** Значение  $g_c$  (Н/см<sup>3</sup>) в зависимости от состояния почвы

Состояние почвы			
рыхлая	уплотненная		
	среднего механического состава	тяжелого механического состава	сухая, тяжелого механического состава
0,5–1,5	3,0–8,0	6,0–10,0	12,0–20,0

Для касательной силы согласно равенствам (2.110) и (2.112) имеем

$$\int_0^{\frac{P_1}{2}} dF_\tau = \int_0^h g_c \frac{\pi l_{np} d_{np}}{2} \cos \psi_1 dh, \text{ т. е. } F_\tau = g_c \frac{\pi l_{np} d_{np} h}{2} \cos \psi_1. \quad (2.113)$$

Аналогично для нормальной силы будем иметь

$$F_n = g_c \frac{\pi l_{np} d_{np} h}{2} \sin \psi_1. \quad (2.114)$$

В равенствах (2.113) и (2.114) левую и правую часть поделим на площадь контакта  $S$ , получим

$$\sigma_\tau = hg_c \cos \psi_1, \quad (2.115)$$

$$\sigma_n = hg_c \sin \psi_1. \quad (2.116)$$

Связь между  $\sigma_n$  и  $\sigma_\tau$  в зоне контакта прутка с почвой, согласно закону Кулона-Мора, будет выражена через равенство

$$\sigma_\tau = c + f_{трпв} \sigma_n, \quad (2.117)$$

где  $c$  – удельное сцепление, Па;  $f_{трпв}$  – коэффициент внутреннего трения почвы, значения в зависимости от типа почвы приведены в табл. 2.3.

Уравнение касательной к траектории движения прутка в почве в плоскости  $xOy$  запишем в виде

$$x - x_0 = \frac{dy}{dx}(y - y_0) \quad \text{или} \quad \zeta = \frac{d(y_0 + \eta)}{d(x_0 + \zeta)} \eta = \frac{d\eta}{d\zeta} \eta. \quad (2.118)$$

Так как

$$\frac{d\eta}{d\zeta} = \operatorname{tg} \psi_1, \quad (2.119)$$

Следовательно:

$$\psi_1 = \arctg \frac{\zeta}{\eta}. \quad (2.120)$$

Уравнение (2.117) с учетом равенств (2.115), (2.116) перепишем так:

$$hg_c \cos \psi_1 = c + f_{\text{тр пв}} hg_c \sin \psi_1.$$

Откуда получим

$$hg_c \cos \psi_1 = c + f_{\text{тр пв}} hg_c \sin \psi_1,$$

$$h = \frac{c}{g_c (\cos \psi_1 - f_{\text{тр пв}} \sin \psi_1)}. \quad (2.121)$$

Формула (2.121) показывает, что чем больше коэффициент объемного смятия, тем меньше будет глубина заглубления прутка в почву.

Дадим оценку коэффициенту  $\mu$ .

Так как  $h \geq 0$ , то из равенства (2.121) следует, что должно выполняться строгое неравенство  $\cos \psi_1 - f_{\text{тр пв}} \sin \psi_1 > 0$ , или  $\cos \psi_1 > f_{\text{тр пв}} \sin \psi_1$ . Следовательно  $\text{ctg } \psi_1 > \mu$ .

Так как значение  $\mu$  определяется формулой  $\mu = \text{tg } \varphi_1$ , то

$$\text{ctg } \psi_1 > \frac{1}{\text{ctg } \varphi_1}, \text{ или } \frac{\eta}{\zeta} > \text{tg } \psi_1; \quad \frac{\eta}{\zeta} > f_{\text{тр пв}}.$$

С учетом равенств (2.100)

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} > f_{\text{тр пв}} \quad (2.122)$$

или

$$\frac{y - (1+k)r_{\text{уст}} \cos \alpha}{x - (1+k)r_{\text{уст}} \sin \alpha} > f_{\text{тр пв}}. \quad (2.123)$$

В результате теоретических исследований закономерностей движения взаимодействия прутка рабочего органа с почвой получено уравнение, описывающее траекторию движения прутков при выполнении технологического процесса, и условие уплотнения ими почвы. Полученные зависимости не позволяют оценить напряжения и деформации, возникающие в почве при заглублении прутка, но от них зависит крошение и степень уплотнения почвы.

## 2.8. Определение напряженного и деформированного состояния в точке почвенного массива при воздействии рабочих органов сельскохозяйственной техники

Для оценки уплотнения почв используют математико-механические модели взаимодействия или проводят практические исследования в реальных условиях. Существуют различные подходы в оценке уплотнения почв теоретическими методами. Многие из них носят приближенный характер в силу применяемых допущений и ограничений.

Почва – сплошная среда, которая обладает упругими, вязкими и пластическими свойствами. При этом повторное ее нагружение (например, прохождение энергетического средства по одному и тому же следу), влечет ее упрочнение, т. е. изменяются модули упругости и пластичности. Например, модуль упругости свежеспаханной почвы намного меньше, чем уплотненной.

Почвы при уплотнении обладают пластическими свойствами, т. е. остаточными деформациями. Поэтому в решении задач взаимодействия сельскохозяйственных деформаторов с почвой необходимо, для достоверной оценки уплотнения, учитывать их пластическую деформацию, которая в большинстве случаев значительно выше, чем упругая.

Воздействие сельскохозяйственных деформаторов на почву осуществляется через ходовые системы (колеса) и рабочие органы (корпуса плугов, диски, катки, зубья и пр.) по некоторой области контакта. Определение закона распределения напряжений в зоне контакта представляет собой задачу как теоретического, так и экспериментального характера. Предположим, что нам известен закон распределения контактных напряжений при взаимодействии сельскохозяйственного деформатора с почвой. Равнодействующую данных распределенных сил вдоль линии контакта обозначим через  $P$ . Тогда для определения напряжений в точках почвенного массива можно использовать формулу Буссинеска, т. е. записать

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi R_M^2} \cos \alpha_1, \quad (2.124)$$

где  $\sigma_R$  – радиальное напряжение, Па;  $R_M$  – расстояние от точки приложения силы  $P$  на поверхности почвенного полупространства до

рассматриваемой точки  $M$  (рис. 2.27),  $m$ ;  $\alpha_1$  – угол между линией действия силы  $P$  и расстоянием  $R$ , рад.

Формула (2.124) приближенно определяет напряжение в почвенном массиве, но не учитывает свойства почвы и ее деформацию.

Рассмотрим модель почвы, функция нагружения которой имеет вид:

$$\sigma - k_p - c_p e_p - k_{\eta} \dot{e}_p = 0, \quad (\sigma > k), \quad (2.125)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение к поверхности почвы ( $\sigma = \sigma_R \cos \alpha_1$ ), Па;  $k_p$ ,  $c_p$ ,  $k_{\eta}$  – соответственно, коэффициенты пластичности, упрочнения, вязкости, Па;  $e_p$  – пластические относительные деформации,  $\dot{e}_p = \frac{de_p}{dt}$ , ( $t$  – время, с).

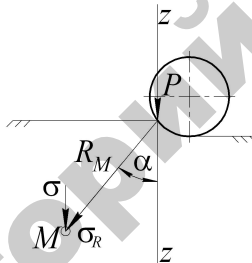


Рис. 2.27. Схема к определению напряжений в точке почвенного массива

Когда почва перегружена, ее свойства можно описать упругими свойствами, т. е.

$$\sigma = E e_e, \quad (\sigma < k), \quad (2.126)$$

где  $E$  – модуль упругости, Па;  $e_e$  – упругие относительные деформации.

Из зависимости (2.126) с учетом равенства (2.124) имеем

$$e_e = \frac{3}{2} \frac{P}{E \pi R_M^2} \cos^2 \alpha_1. \quad (2.127)$$

Формула (2.127) определяет упругие деформации, возникающие в почве от приложенной нагрузки  $P$ . Из данной зависимости следует,

что чем тверже почва ( $E$  растет), тем меньше ее деформация. Наибольшая упругая деформация будет возникать при  $\alpha_1 = 0$ . Формула (2.127) теряет физический смысл в точке  $R_M = 0$  и ее окрестности, что ограничивает применение формулы.

Пусть в рассматриваемых точках почвы  $\sigma > k$ , т. е. имеют место остаточные деформации. Тогда связь между напряжениями и деформациями будет выражаться формулой (2.125). Из равенств (2.124) и (2.125) можно получить

$$k_{\eta} \mathcal{E}_p = \frac{3 P \cos^2 \alpha_1}{2 \pi R_M^2} - k_p - c_p e_p \quad (2.128)$$

или

$$\mathcal{E}_p = \frac{3 P \cos^2 \alpha_1}{2 k_{\eta} \pi R_M^2} - \frac{k_p}{k_{\eta}} - \frac{c_p}{k_{\eta}} e_p \quad (2.129)$$

Особый интерес вызывает случай, когда  $P = P(t)_x + P_0$ ,  $\alpha = \omega t$  ( $\omega$  – круговая частота,  $P_0 = \text{const}$ ).

Уравнение (2.129) преобразуем к виду

$$\frac{de_p}{dP} = \frac{1}{k_{\eta} \mathcal{E}_p} \left( \frac{3 P \cos^2 \alpha_1}{2 \pi R_M^2} - k_p - c_p e_p \right), \quad \left( \mathcal{E}_p = \frac{dP}{dt} \right) \quad (2.130)$$

Считаем, что  $\alpha = \text{const}$ . Обозначим

$$A = \frac{3 P \cos^2 \alpha_1}{2 \pi R_M^2}; \quad B = \frac{1}{k_{\eta} \mathcal{E}_p}; \quad e_p = uv, \quad \text{тогда} \quad \frac{de_p}{dP} = u'v + v'u.$$

И уравнение (2.130) перепишем в новых переменных  $u$  и  $v$ :

$$u'v + v'u = B(PA - k_p - c_p uv) \quad \text{или}$$

$$u'v - BAP + Bk_p + B(c_p uv + v'u) = 0.$$

Сгруппируем члены уравнения:

$$u'v - BAP + Bk_p + u(Bc_p v + v') = 0. \quad (2.131)$$

Найдем решение для функции  $v$ .

Из уравнения (2.131) следует

$$Bc_p v = v' = 0. \quad (2.132)$$

Откуда после интегрирования получим

$$v = e^{-Bc_p P}. \quad (2.133)$$

Уравнение (2.131) с учетом равенства (2.133) примет вид:

$$\frac{du}{dP} e^{-Bc_p P} - BAP + Bk_p = 0 \quad \text{или} \quad \frac{du}{dP} = (BAP - Bk_p) e^{Bc_p P} = 0.$$

В интегральной форме:

$$\int du = \int BAP e^{Bc_p P} dP - \int Bk_p e^{Bc_p P} dP.$$

После интегрирования имеем

$$u = e^{Bc_p P} \left[ \frac{A(Bc_p P - 1)}{Bc_p^2} - \frac{k_p}{c_p} \right]. \quad (2.134)$$

Учитывая, что  $e_p = uv$ , с учетом равенств (2.133) и (2.134), получим выражение для определения пластических деформаций:

$$e_p = \frac{3 \cos^2 \alpha_1}{2 \pi R_M^2 c_p} \left( P - \frac{k_p}{c_p} \right) - \frac{k_p}{c_p}. \quad (2.135)$$

Если почва обладает упругими и пластическими деформациями, то полная деформация в рассматриваемой точке будет равна их сумме:

$$e = e_p + e_e. \quad (2.136)$$

Подставляя равенства (2.127) и (2.135) в (2.136), получим

$$e = \frac{3 \cos^2 \alpha_1}{2 \pi R_M^2} \left( \frac{P}{E} + \frac{P}{c_p} - \frac{k_p}{c_p^2} \right) - \frac{k_p}{c_p}. \quad (2.137)$$

Полученная формула позволяет найти полную деформацию почвы. Данная величина характеризует процессы, происходящие при обработке почвы в зависимости от глубины обработки, состояния почвы и массы приставки, которая зависит от геометрических параметров приставки, материала и надежности рабочих органов.

## 2.9. Прочностной расчет уплотняющих элементов почвообрабатывающих кольчато-прутковых катков

При расчете деталей машин на прочность приходится сравнивать фактические напряжения, возникающие в сечении, с некото-

рыми допускаемыми напряжениями, рассчитанными для данного материала и вида нагружения. Для обеспечения надежности цилиндрических уплотняющих элементов кольчато-прутковых почвообрабатывающих катков необходимо определить из условий прочности сечения рациональное соотношение диаметра прутков

$d_{\text{пр}}$  (м) и их длины  $l_{\text{пр}}$  (м):  $k_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}}{d_{\text{пр}}}$ . Величина данного параметра

определяет не только работоспособность и долговечность конструкции уплотняющих элементов, но и материалоемкость рабочего органа, конструктивные и технологические параметры их установки на оси приставки, ее вес, а, следовательно, и энергоемкость выполнения технологического процесса.

При работе кольчато-пруткового катка на уплотняющие элементы действуют сила тяжести  $F_T$  и сила сопротивления почвы внедрению прутка (распределенная нагрузка  $q$ ) (рис. 2.28).

Сила трения равна

$$F_T = m_{\text{пр}} g,$$

где  $m_{\text{пр}}$  – масса прутка, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

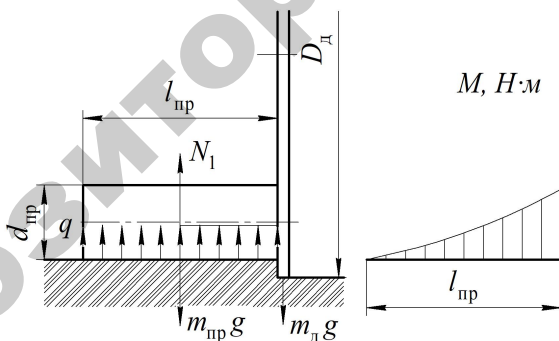


Рис. 2.28. Силы, действующие на кольчато-прутковый рабочий орган

Массу прутка найдем по формуле

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{ст}} V_{\text{пр}} = \rho_{\text{ст}} \frac{\pi d_{\text{пр}}^2 l_{\text{пр}}}{4},$$

где  $\rho_{\text{ст}}$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{пр}}$  – объем прутка, м<sup>3</sup>.

Распределенная нагрузка равна

$$q = \frac{N_1}{l_{\text{пр}}},$$

где  $N_1$  – сила воздействия почвы на пруток, Н.

Максимальный момент в опасном сечении прутка (см. рис. 2.28) определим по формуле

$$M_{\text{max}} = \frac{ql_{\text{пр}}^2}{2} - m_{\text{пр}}g \frac{l_{\text{пр}}}{2}. \quad (2.138)$$

Во время работы приставок на их уплотняющие элементы действуют постоянная нагрузка  $N_1$  (реакция почвы, определяемая сопротивлением почвы внедрению) и кратковременная  $N_2$ , возникающая при кратковременном взаимодействии с препятствием.

При работе приставок на полях, не засоренных камнями, на прутки в процессе работы действует только постоянная нагрузка  $N_1$  (величина  $N_2$  отсутствует или незначительна, поэтому ею можно пренебречь).

$$N_1 = \frac{\pi k_{\text{см}} l_{\text{пр}} d_{\text{пр}} h}{2}, \quad (2.139)$$

где  $k_{\text{см}}$  – коэффициент объемного смятия, учитывающий свойства почвы, Н/м<sup>3</sup>;  $h$  – глубина заглубления прутка в почву, м.

Предельные статические нормальные напряжения равны

$$\sigma_{\text{max ст}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{зпр}}}$$

где  $W_{\text{зпр}}$  – полярный момент сопротивления прутка, м<sup>3</sup>:

$$W_{\text{зпр}} = \frac{\pi d_{\text{пр}}^3}{32}$$

Тогда

$$\sigma_{\text{max ст}} = \frac{l_{\text{пр}}^2 (8k_{\text{см}} h - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})}{d_{\text{пр}}^2}. \quad (2.140)$$

При работе на не засоренных камнями участках прутки работают только на изгиб, тогда



$$\sigma_{\max \text{ ст}} = \frac{l_{\text{пр}}^2 (8k_{\text{см}} h - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})}{d_{\text{пр}}^2} \leq [\sigma_{\text{ст}}], \quad (2.141)$$

где  $[\sigma_{\text{ст}}]$  – допустимое напряжение, Па.

$$l_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{[\sigma_{\text{ст}}] d_{\text{пр}}^2}{8k_{\text{см}} h - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}}}}.$$

Рассмотрим наиболее приближенный к практике случай, когда плуг с приставками работает на засоренном камнями участке. В процессе работы при наезде катковой приставки на камень весь ее вес приходится на пруток, взаимодействующий с камнем (рис. 2.29), что приводит к его срезу.

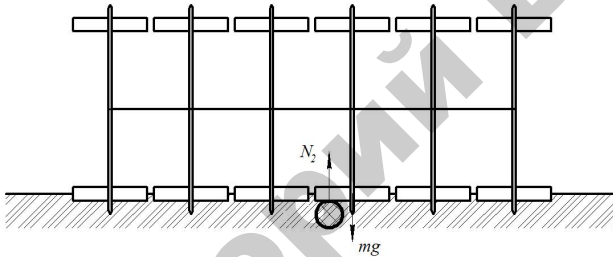


Рис. 2.29. Схема взаимодействия прутка с почвой

В данном случае в гранях куба распределения напряжений в основании прутка, помимо нормальных напряжений, возникают касательные (рис. 2.30), что свидетельствует о плоском напряженном состоянии. Для проверки прочности в плоском напряженном состоянии необходимо использовать теории прочности.

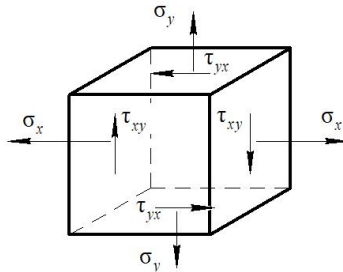


Рис. 2.30. Схема напряжений, действующих на основание прутка

Предельные касательные напряжения равны

$$\tau_{\max \text{ ст}} = \frac{N_2}{A_{\text{ср}}} = \frac{4N_2}{\pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (2.142)$$

где  $A_{\text{ср}}$  – площадь сечения среза прутка,  $\text{м}^2$ .

При известной массе приставки нормальную реакцию  $N_2$  находим по формуле

$$N_2 = m_{\text{кп}} g, \quad (2.143)$$

где  $m_{\text{кп}}$  – масса катковой приставки, кг.

Масса катковой приставки равна сумме масс всех элементов, входящих в ее состав: почвообрабатывающих рабочих органов, оси, подшипниковых узлов и рамы.

Для изменения физического воздействия на почву в приставках используют грузы (прицепные приставки) и перераспределения веса плуга (приставки, навешиваемые на раму плуга). Поэтому следует учитывать дополнительную силу догружения  $F_{\text{д}}$ . Формула (2.143) примет следующий вид:

$$N_2 = m_{\text{кп}} g + F_{\text{д}}. \quad (2.144)$$

При условии, что масса катковой приставки выбрана минимальной, справедливо равенство

$$N_2 = m_{\text{кп}} g + F_{\text{д}} = nN_1, \quad (2.145)$$

где  $n$  – количество прутков, одновременно уплотняющих почву, шт.

Подставив полученные равенства в формулу (2.142), получим:

– при условии, что масса катковой приставки минимальная:

$$\tau_{\max \text{ ст}} = \frac{2nk_{\text{см}} l_{\text{пр}} h}{d_{\text{пр}}}; \quad (2.146)$$

– при заданной массе катковой приставки:

$$\tau_{\max \text{ ст}} = \frac{4(m_{\text{кп}} g + F_{\text{д}})}{\pi d_{\text{пр}}^2}. \quad (3.147)$$

Для этого случая определим главные напряжения:

$$\sigma_{\max \text{ ст}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \quad (2.148)$$

$$\sigma_{\min \text{ ст}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (2.149)$$

Для рассматриваемого случая  $\sigma_y = 0$ .

Для проверки прочности прутка из пластичного материала (стали) воспользуемся третьей теорией прочности, которая имеет вид:

$$\sigma_{\text{экв ст}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma_{\text{ст}}], \quad (2.150)$$

где  $\sigma_1 = \sigma_{\max \text{ ст}}$ ;  $\sigma_3 = \sigma_{\min \text{ ст}}$ .

Подставив в формулу (2.150) максимальные и минимальные напряжения, получим

$$\sigma_{\text{экв ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (2.151)$$

Подставив в уравнение (2.151) значения из формул (2.140) и (2.146), получим неравенство для минимально допустимой массы катковой приставки:

$$\sigma_{\text{экв ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\frac{l_{\text{пр}}^4 (8k_{\text{см}} h - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})^2}{d_{\text{пр}}^4} + \frac{16n^2 k_{\text{см}}^2 l_{\text{пр}}^2 h^2}{d_{\text{пр}}^2}} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (2.152)$$

Подставив в уравнение (2.151) значения из формул (2.140) и (2.147), получим неравенство для заданной массы катковой приставки:

$$\sigma_{\text{экв ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\frac{l_{\text{пр}}^4 (8k_{\text{см}} h - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})^2}{d_{\text{пр}}^4} + \frac{64(m_{\text{кп}} g + F_{\text{д}})^2}{\pi^2 d_{\text{пр}}^4}} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (2.153)$$

Наибольшая величина воздействия на прутки происходит при его взаимодействии с камнем (рис. 2.31), поэтому необходимо учитывать динамический коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_{\text{д}} = \sin \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{пр}} + \frac{v_{\text{пр}}^2}{g\Delta_{\text{ст}}}}, \quad (2.154)$$

где  $\alpha_{\text{пр}}$  – угол приложения силы, рад;  $v_{\text{пр}}$  – скорость прутка в момент удара, м/с;  $\Delta_{\text{ст}}$  – перемещение прутка при статическом приложении нагрузки, м.

Угол приложения силы для нашего случая будет в пределах 0,48–0,5 рад. При значении углов менее 0,48 рад прутки с большой вероятностью сдвинут камень, а не сломаются об него.

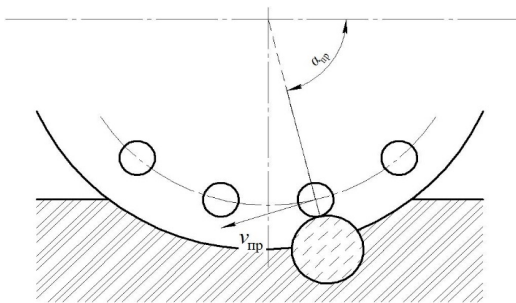


Рис. 2.31. Взаимодействие прутка с камнем в почве

Диск с прутками совершает плоскопараллельное движение, значит, скорость прутка в момент удара будет

$$v_{np} = \sqrt{v_{кп}^2 + v_k^2 + v_k v_{кп} \cos(90 + \alpha_{np})} = \sqrt{v_{кп}^2 + v_k^2 - v_k v_{кп} \sin \alpha_{np}},$$

где  $v_{кп}$  – скорость катковой приставки, м/с;  $v_k$  – окружная скорость прутка в точке удара, м/с,

$$v_k = \frac{\omega D_d}{2},$$

где  $\omega$  – угловая скорость,  $c^{-1}$ ;  $D_d$  – диаметр диска, м.

Пруток приварен к диску, поэтому применима формула для консольной балки:

$$\Delta_{ст} = \frac{N_2 l_{np}^3}{3EI_z},$$

где  $E$  – модуль продольной упругости (модуль Юнга), Па;  $I_z$  – полярный момент инерции,  $m^4$ ,  $I_z = \frac{\pi d_{np}^4}{64}$ .

$$\Delta_{ст} = \frac{64N_2 l_{np}^3}{3\pi E d_{np}^4}. \quad (2.155)$$

Динамический коэффициент:

– при минимальной массе катковой приставки получим, подставив в формулу (2.155) значения из выражений (2.145) и (2.155):

$$k_d = \sin \alpha_{np} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{np} + \frac{v_{np}^2}{\frac{32 g l_{np}^3 n k_{cm} l_{np} h}{3 E d_{np}^3}}}; \quad (2.156)$$

– при заданной массе катковой приставки получим, подставив в формулу (2.155) значения из выражений (2.144) и (2.156):

$$k_d = \sin \alpha_{np} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{np} + \frac{v_{np}^2}{64gl_{np}^3(m_{кп}g + F_d)}}. \quad (2.157)$$

С учетом динамического коэффициента получим неравенство:  
– при минимальной массе катковой приставки:

$$\sqrt{\frac{l_{np}^4(8k_{cm}h - 4g\rho_{ct}d_{np})^2}{d_{np}^4} + \frac{16n^2k_{cm}^2l_{np}^2h^2}{d_{np}^2}} \times \left( \sin \alpha_{np} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{np} + \frac{v_{np}^2}{\frac{32gl_{np}^4nk_{cm}h}{3Ed_{np}^3}}} \right) \leq [\sigma_{ct}]; \quad (2.158)$$

– при заданной массе катковой приставки:

$$\sqrt{\frac{l_{np}^4(8k_{cm}h - 4g\rho_{ct}d_{np})^2}{d_{np}^4} + \frac{64(m_{кп}g + F_d)^2}{\pi^2d_{np}^4}} \times \left( \sin \alpha_{np} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{np} + \frac{v_{np}^2}{\frac{64gl_{np}^3(m_{кп}g + F_d)}{3\pi Ed_{np}^4}}} \right) \leq [\sigma_{ct}]. \quad (2.159)$$

Решив уравнение (2.158), найдем допустимый диаметр прутка при условии, что масса приставки минимальна:

$$[d_{np}] = \frac{2k_{cm}hg\rho_{ct}l_{np}^2 + \frac{l_{np}^2 \cdot gnk_{cm}h}{v_{np}^2 \cdot 3E} [\sigma_{ct}^2]}{(g^2\rho_{ct}^2l_{np}^2 + n^2k_{cm}^2h^2)} \pm \sqrt{\frac{\left(2k_{cm}hg\rho_{ct}l_{np}^2 + \frac{l_{np}^2 \cdot gnk_{cm}h}{v_{np}^2 \cdot 3E} [\sigma_{ct}^2]\right)^2 - 4(g^2\rho_{ct}^2l_{np}^2 + n^2k_{cm}^2h^2)k_{cm}^2h^2l_{np}^2}{(g^2\rho_{ct}^2l_{np}^2 + n^2k_{cm}^2h^2)}}. \quad (2.160)$$

На рис. 2.32 показан график, отражающий зависимость допустимого диаметра прутка от его длины.

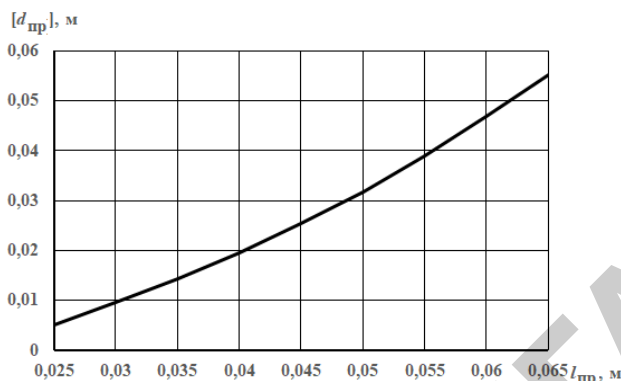


Рис. 2.32. График зависимости допустимого диаметра прутка  $[d_{пр}]$  от его длины  $l_{пр}$

Из данных приведенного графика очевидно, что с ростом длины прутка его допустимый диаметр увеличивается. На диске обычно устанавливается от 48 до 60 прутков, количество которых определяется его конструктивными параметрами. Применение прутков с большей длиной приводит к увеличению их массы (рис. 2.33), следовательно, и массы катка. Однако при увеличении длины прутка увеличивается расстояние между катками, и их количество в секции катковой приставки с установленной шириной захвата может быть сокращено без снижения качества выполнения технологического процесса.

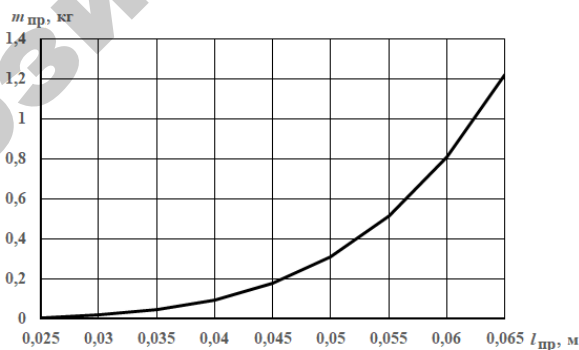


Рис. 2.33. График зависимости массы прутка  $m_{пр}$  от его длины  $l_{пр}$  при соответствующем допустимом диаметре

При выборе конструктивных параметров, помимо надежности катка и технологических условий его работы, необходимо учитывать проблему забивания междискового и межпрутковое пространства почвой, которая приводит к увеличению энергоемкости технологического процесса и снижению качества обработки.

## **2.10. Конструкции катковых приставок, снижающие вероятность забивания междаткового пространства почвой**

Задача снижения энергоемкости технологического процесса и повышения качества поверхностной обработки различного типа почв решается с помощью секций катковых приставок.

Секция катковой приставки (рис. 2.34) состоит из рамы 1, закрепленных на ней стоек 2 с подшипниковыми узлами 3, установленными на оси 4 с возможностью ее вращения. На ось 4 насажены с зазором с возможностью вращательного и осевого относительного перемещения диски 5. Между дисками 5 на оси 4 с радиальным зазором коаксиально насажена прорезная пружина 6, при этом на одном из торцов каждой прорезной пружины 6 закреплена своим дном коаксиально и симметрично оси симметрии прорезной пружины 6 коаксиально насаженная на ось 4 тарелка 7, наружный диаметр которой в два раза больше наружного диаметра прорезной пружины 6. Приподнятые края 8 тарелки 7 выступают в сторону, противоположную присоединенной к ней прорезной пружине 6, и ребро краев 8 тарелки 7 расположено в плоскости, перпендикулярной оси симметрии прорезной пружины 6. Дно каждой тарелки 7 выполнено с отверстием, диаметр и контур которого совпадает с диаметром и контуром внутреннего цилиндрического отверстия прорезной пружины 6, при этом на примыкающих к оси участках, считая слева направо, глядя по ходу движения, от ее внешнего края, нечетные диски 5 охвачены впритык с обеих сторон торцами прорезных пружин 6, а четные диски 5 охвачены впритык с обеих сторон ребрами краев 8 тарелок 7. На концах оси 4 выполнена резьба, на которую навинчены регулировочные гайки 9, упирающиеся своими торцами в насаженные с зазором на ось коаксиально распорные втулки 10 с возможностью регулировки степени прижатия торцов прорезных пружин 6 и ребер краев 8 тарелок 7 к дискам 5.

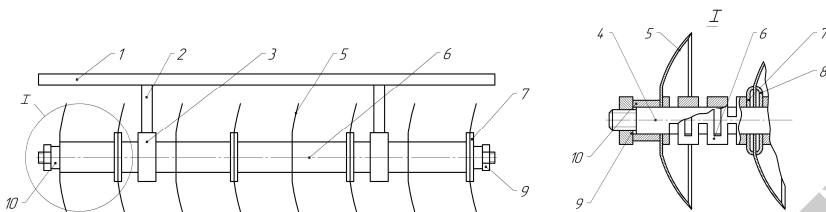


Рис. 2.34. Секция катковой приставки

При обработке почвы диски 5, прижатые своими боковыми сторонами к торцам прорезных пружин 6 и ребрам краев 8 тарелок 7, под действием силы тяжести заглубляются в почву на заданную глубину и начинают, вращаясь вместе с осью 4 в подшипниковых узлах 3, производить крошение крупных почвенных комков на более мелкие и уплотнять верхний слой почвы. В процессе работы возникают случаи, когда большой объем почвы, попадая между дисками, заклинивается и начинает вращаться вместе с ними вокруг оси. Вследствие этого со стороны почвы возникает сила, действующая на диски и препятствующая их вращению. Так как боковые стороны нечетных дисков 5 прижимаются торцами прорезных пружин 6, и радиус (плечо) возникающих при этом сил трения относительно оси вращения в два раза меньше, чем радиус сил трения возникающих от сил прижатия ребер краев 8 тарелок 7 к боковым сторонам четных дисков 5, то нечетные диски начинают проворачиваться относительно оси 4 и четных дисков 5. При этом происходит сдвиг слоев почвы, попавшей между дисками, нарушаются внутренние связи, и почва осыпается, а рабочие органы не забиваются и обеспечивают качественное выполнение технологического процесса при меньшей энергоемкости. В зависимости от типа почвы и ее влажности, в процессе выполнения технологического процесса обработки почвы можно путем вращения гаек 9 и деформации прорезных пружин 6 регулировать качество и энергоемкость выполнения технологического процесса обработки почвы при различных условиях работы дисковой секции.

Секция катковой приставки (рис. 2.35) состоит из рамы 1, закрепленных на ней стоек 2 с подшипниковыми узлами 3, установленными на оси 4 с возможностью ее вращения. На ось 4 насажены с зазором с возможностью вращательного и осевого относительного перемещения диски 5. Между дисками 5 на оси 4 с радиальным



зазором коаксиально насажена прорезная пружина 6. На примыкающих к оси участках диски 5 охвачены впритык с обеих сторон торцами прорезных пружин 6. На концах оси 4 выполнена резьба, на которую навинчены регулировочные гайки 7, упирающиеся своими торцами в насаженные с зазором на ось коаксиально распорные втулки 8, с возможностью регулировки степени прижатия торцов прорезных пружин 6 к дискам 5.

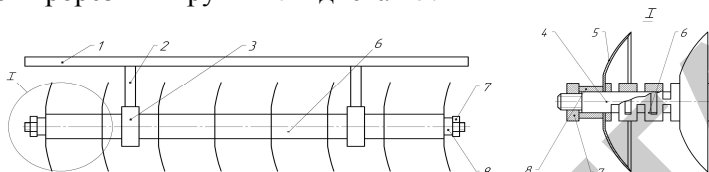


Рис. 2.35. Секция катковой приставки

При обработке почвы диски 5, прижатые своими боковыми сторонами к торцам прорезных пружин 6, под действием силы тяжести заглубляются в почву на заданную глубину и начинают, вращаясь вместе с осью 4 в подшипниковых узлах 3, производить крошение крупных почвенных комков на более мелкие и уплотнять верхний слой почвы. В процессе работы возникают случаи, когда большой объем почвы, попадая между дисками, заклинивается и начинает вращаться вместе с ними вокруг оси. Вследствие этого со стороны почвы возникает сила, действующая на диски, препятствующая их вращению. Так как боковые стороны дисков 5 прижимаются торцами прорезных пружин 6, то возникающих при этом сил трения относительно оси вращения становится недостаточно, и диски 5, каждый по отдельности, в зависимости от конкретно действующих на них сил со стороны почвы, начинают проворачиваться относительно оси 4 и относительно соседних дисков. При этом происходит сдвиг слоев почвы, попавшей между дисками, нарушаются внутренние связи, и почва осыпается, а рабочие органы не забиваются и обеспечивают качественное выполнение технологического процесса при меньшей энергоемкости. В зависимости от типа почвы и ее влажности, в процессе выполнения технологического процесса обработки почвы можно путем вращения гаек 7 и деформации прорезных пружин 6 регулировать качество и энергоемкость выполнения технологического процесса обработки почвы при различных условиях работы дисковой секции.

### **3. ОХРАНА ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ С КАТКОВЫМИ ПРИСТАВКАМИ**

При производстве продукции растениеводства должны соблюдаться требования: Правил по охране труда при производстве и послеуборочной обработке продукции растениеводства Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 15.04.2008г. № 36, Межотраслевых общих правил по охране труда, утвержденных постановлением Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь от 3 июня 2003 г. № 70, других нормативных правовых актов, технических нормативных правовых актов, содержащих требования охраны труда, технических нормативных правовых актов системы противопожарного нормирования и стандартизации в Республике Беларусь

При выполнении почвообрабатывающих работ следует руководствоваться требованиями организаций-изготовителей применяемых машин, изложенными в технических описаниях и инструкциях по эксплуатации, и Правилами. К работе с пахотными агрегатами допускаются лица, изучившие руководство по эксплуатации и имеющие соответствующую квалификацию.

Комплектование и наладка пахотного агрегата должны осуществляться механизатором под руководством и при участии одного из следующих лиц: бригадира, помощника бригадира, механика отделения, агронома, с привлечением в случае необходимости других работников, и применением подъемных приспособлений, гарантирующих безопасное выполнение этих операций. Изменение механизатором состава агрегата без разрешения специалистов не допускается. Ширина колеи колесных тракторов при выполнении основной обработки почвы должна соответствовать установленным организациями-изготовителями техническим описаниям и инструкциям по эксплуатации. Агрегатирование пахотных агрегатов допускается только с теми тракторами, которые рекомендованы организацией-изготовителем.

Перед началом движения трактора к машине (орудию) механизатор должен дать звуковой сигнал, убедиться в отсутствии людей между трактором и машиной и только после этого начать движение. Подъезжать к машине (орудию) следует задним ходом на низкой передаче, плавно и без рывков. При этом механизатор обязан

следить за командами работника, выполняющего сцепку, ноги держать на педали муфты сцепления и тормоза, чтобы в случае необходимости обеспечить остановку машины. Работник, выполняющий сцепку, в момент движения трактора к прицепной машине не должен находиться на пути его движения. Соединять (расцеплять) прицепное устройство разрешается только при полной остановке трактора по команде механизатора. Во время навески или сцепки машины тракторист обязан установить рычаг переключения коробки перемены передач в нейтральное положение, а ногу держать на тормозе. Гидравлические системы агрегируемых машин должны быть подключены к трактору. Соединение агрегируемых почвообрабатывающих машин с трактором и между отдельными машинами должно быть надежным и исключать самопроизвольное их рассоединение.

Передвижение агрегатов к месту работы должно осуществляться в соответствии с разработанными маршрутами, утвержденными нанимателем или главным специалистом организации.

Размещение машин, машинно-тракторных агрегатов на обрабатываемых полях должно осуществляться в соответствии с типовыми технологическими картами. Заправка машин горюче-смазочными материалами должна проводиться за пределами поля с использованием средств механизации. Расстояние между идущими друг за другом пахотными машинно-тракторными агрегатами должно быть не менее 30 м, а агрегатами с роторными рабочими органами – 50 м; поле для работы машинно-тракторных агрегатов должно быть заблаговременно подготовлено в зависимости от вида культур. Границу поля со стороны оврага или обрыва следует закончить контрольной бороздой на расстоянии не менее 10 м от края.

Для работы машинно-тракторных агрегатов поля должны быть заблаговременно подготовлены: убраны камни, солома, засыпаны ямы и другие препятствия; установлены вешки у размытых участков и других препятствий. На полях должны быть отбиты поворотные полосы. При работах на склонах и вблизи оврагов ширина поворотной полосы должна быть не менее величины, равной двойному минимальному радиусу поворота машинно-тракторного агрегата. Машины должны быть укомплектованы необходимыми средствами для очистки рабочих органов. Очистка или технологи-

ческая регулировка рабочих органов на движущемся агрегате или при работающем двигателе запрещается.

В зоне возможного движения навесных машин при развороте машинно-тракторных агрегатов не должны находиться люди. Работающие машинно-тракторные агрегаты должны быть немедленно остановлены при появлении любой неисправности. Работать на неисправных машинах и машинно-тракторных агрегатах запрещается.

Перед началом движения агрегата дать сигнал. Трогаться с места плавно, без рывков. Прежде чем поднять или опустить пахотный агрегат, а также при оборачивании корпусов плуга необходимо убедиться в том, что возле него никого нет.

Запрещается: работать с неисправным пахотным агрегатом; работать с незатянутым крепежом рабочих органов и других деталей плуга; производить повороты и сдачу назад при заглубленных рабочих органах; транспортировать пахотный агрегат при ослабленных ограничительных талрепах навесной системы трактора; находиться на раме пахотного агрегата во время пахоты или при транспортировании; регулировать пахотный агрегат, производить очистку, смазку и подтяжку резьбовых соединений, когда он навешен на трактор и поднят в транспортное положение без блокировки механизма фиксации поворота вала механизма навески; ремонтировать агрегат, если он поднят в транспортное положение или соединен с трактором, двигатель которого работает. Все работы, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, производить только на отцепленном пахотном агрегате, механизм оборота которого опирается на подставку и фиксируется с рамой при опущенных на землю корпусах. Если плуг навешен на трактор, то работа проводится при опущенных на землю корпусах и неработающем двигателе трактора.

Собранный пахотный агрегат стропить только в местах, указанных на его раме. Механизм оборота рамы должен быть зафиксирован относительно плуга, при этом правооборачивающие корпуса должны быть внизу. Нахождение строповщика возле механизма оборота рамы при подъеме плуга запрещено. При транспортировке в составе агрегата плуг должен быть переведен в транспортное положение. Для этого, при помощи навесной системы трактора поднимать нижние тяги параллельно почве, поднять плуг гидроцилиндром колесного хода, ограничительные талрепы навесной системы

трактора затянуть, поворотный вал механизма навески заблокировать, а регулятор глубины пахоты колесного хода зафиксировать в транспортном положении.

Транспортная скорость движения агрегата не должна превышать 20 км/ч.

В процессе эксплуатации плуга необходимо ежемесячно следить за состоянием соединения рабочих органов с рамой и навески с трактором. При поддомкрачивании домкрат следует установить в указанных для этого местах. При погрузке и выгрузке агрегата, ремонтных работах строповку производить только в местах, обозначенных знаком строповки.

Требования безопасности при эксплуатации приставок должны соответствовать требованиям системы стандартов безопасности труда и правилам по технике безопасности при транспортировании, использовании, техническом обслуживании, устранении неисправностей и хранении сельскохозяйственных машин, действующих в каждом хозяйстве.

При эксплуатации приставок запрещается: находиться возле плуга и приставки при обороте плуга во время монтажа приставки на плуг; находиться возле плуга с приставкой при переводе их из транспортного положения в рабочее и обратно, а также во время работы плуга с приставкой; производить очистку, регулировку, устранение неисправностей, техническое обслуживание приставки при работающем двигателе трактора; производить ремонтные и регулировочные работы на приставке с плугом в транспортном положении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М.Н. Летошнев. – М. : Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1955. – 764 с.
2. Основы теории и расчета тракторов и автомобилей / В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский; под ред. В.А. Скотникова. – М. : Агропромиздат, 1986. – 383 с.
3. Приемочные испытания опытного образца приставки ПД-2,0 к плугу пятикорпусному оборотному ППО-5-40. Протокол № 204 Б ½–2009. – Привольный : ИЦ ГУ «Белорусская МИС», 2009. – 54 с.
4. Приемочные испытания опытного образца приставки ПД-1.6 к плугу четырехкорпусному оборотному ППО-4-40. Протокол № 205 Б ½–2009. – Привольный : ИЦ ГУ «Белорусская МИС», 2009. – 51 с.
5. Циммерман, М.З. Рабочие органы почвообрабатывающих машин / М.З. Циммерман. – М. : Машиностроение, 1978. – 295 с.
6. Клочков, А.В. Сельскохозяйственные машины / А.В. Клочков, Н.В. Чайчиц, В.П. Буяшов. – Минск : Ураджай, 1997. – 500 с.
7. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М. : ВИМ, 1998. – 368 с.
8. Цитович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цитович. – М. : Госстройиздат, 1963. – 380 с.
9. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
10. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат : пат. 15953 Респ. Беларусь, МПК А 01В 49/02 А 01В 63/114 / И.С. Крук, И.С. Назаров, Ф.И. Назаров, Н.А. Бакач, А.А. Новиков, А.В. Маковчик; заявитель Беларус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а20100320 ; заявл. 05.03.2010 ; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2011.– № 5. – С. 150–151.
11. Чигарев, Ю.В. Математические основы механики почв / Ю.В. Чигарев, П.Н. Синкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 163 с.
12. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев : Ураджай, 1989. – 144 с.
13. Левин, Ф.И. Вопросы окультуривания, деградации и повышения плодородия пахотных почв / Ф.И. Левин. – М. : Издательство МГУ, 1983. – 93 с.
14. Обработка почвы при интенсивном возделывании полевых культур / Т. Карвовский, И. Касимов, Б. Клочков ; ред. А.С. Кушнарёва ; пер. Н.А. Чупеева. – М. : Агропромиздат, 1988. – 248 с.

15. Терцаги, К. Теория механики грунтов / К. Терцаги ; пер с нем. под общ. ред. Цытовича. – М. : Госстройиздат, 1961. – 506 с.

16. Хайлис, Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин / Г.А. Хайлис. – Киев : Издательство УСХА, 1992. – 240 с.

17. Фирсов, И.П. Технология производства продукции растениеводства / И.П. Фирсов [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1989. – 432 с.

18. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – М. : Колос, 1980. – 672 с.

19. Марчик, Т.П. Почвоведение с основами растениеводства / Т.П. Марчик, А.Л. Ефремов. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2006. – 249 с.

20. Кинематические исследования движения почвенного пласта по поверхности корпуса плуга для обоснования параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах / Ю.В. Чигарев [и др.] // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза / Институт технологических и естественных наук в Фалентах, отделение в Варшаве. – Варшава : ИТР, 2017. – Т. XXII. – С. 38–46.

21. Теоретические исследования взаимодействия уплотняющих элементов кольчато-прутковых дисков катковых приставок пахотных агрегатов с почвой / И.С. Крук [и др.]. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. аграрных навук. – 2017. – № 4. – С. 92–102.

22. Обоснование параметров установки катковых приставок относительно корпусов плуга / Крук И.С. [и др.]. // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства: матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017.– Минск : БГАТУ, 2017. – С. 336–339.

23. Обеспечение надежности уплотняющих элементов кольчато-прутковых рабочих органов катковых приставок при работе на незасоренных камнями почвах / Крук И.С. [и др.]. // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 ноября 2017 г. – Минск : БГАТУ, 2017. – С. 244–246.

24. Вопросы земледельческой механики / под ред. А.Е. Мацепуро, Б.Н. Янушкевича. – Минск : Изд-во академии сельскохозяйственных наук БССР. – 1960. – Том V. – 322 с.

Научное издание

**Крук** Игорь Степанович,  
**Назаров** Федор Игоревич,  
**Чигарёв** Юрий Власович и др.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАТКОВЫХ ПРИСТАВОК  
ДЛЯ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ. РЕКОМЕНДАЦИИ**

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*  
Редактор *Т. В. Каркоцкая*  
Корректор *Т. В. Каркоцкая*  
Компьютерная верстка *Д. О. Сенькевич, Т. В. Каркоцкой*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 29.12.2017 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 4,72. Тираж 30 экз. Заказ 1020.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.