

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. С. Крук, Ф. И. Назаров, Ю. В. Чигарев

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАЗДЕЛКИ
И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ К ОБОРОТНЫМ ПЛУГАМ**

Минск
БГАТУ
2021

Крук, И. С. Научные основы проектирования устройств для разделки и поверхностной обработки почвенных пластов к оборотным плугам / И. С. Крук, Ф. И. Назаров, Ю. В. Чигарев. – Минск : БГАТУ, 2021. – 228 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0120-0.

В монографии приведен анализ конструкций орудий и приспособлений, предназначенных для поверхностной обработки почвенных пластов при вспашке оборотными плугами, а также обоснован выбор мест их установки. В результате моделирования процесса движения почвенного пласта по поверхностям корпуса плуга и схода с него получены математические модели, позволяющие определить дальность полета почвенных частиц и обосновать параметры установки дополнительных почвообрабатывающих устройств на раме плуга.

Издание предназначено для научных работников, конструкторов сельскохозяйственных машин, специалистов АПК, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов.
Табл. 20. Ил. 110. Библиогр.: 104 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 11 января 2021 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Сельскохозяйственные машины» УО «Белорусский государственный
аграрный технический университет» *В. П. Чеботарев*;
кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь
РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *Ю. Л. Саланура*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ К ПАХОТНЫМ АГРЕГАТАМ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР	
1.1. Значение основной обработки почвы в технологиях возделывания зерновых культур.....	9
1.2. Анализ возможности использования различных дополнительных устройств и орудий к оборотным плугам для поверхностной обработки почвенных пластов.....	15
1.3. Обзор и анализ конструкций рабочих органов для дополнительной обработки почвенных пластов.....	21
1.4. Обзор и анализ исследований по использованию дополнительных устройств к плугам.....	28
2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЧВ И УСТОЙЧИВОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ	
2.1. Физико-механические свойства почвы и методика их определения в лабораторных и полевых условиях.....	33
2.2. Реологические модели деформации почвы.....	43
2.3. Построение моделей устойчивости агроэкосистемы.....	53
3. ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЧАТО- ПРУТКОВЫХ КАТКОВ И СФЕРИЧЕСКИХ ДИСКОВ	
3.1. Обоснование конструктивных параметров уплотняющих элементов кольчато-прутковых катков.....	59
3.2. Методы и результаты лабораторных исследований по обоснованию параметров кольчато-пруткового катка.....	80
3.3. Особенности воздействия сферического рабочего органа катковой приставки на почву.....	109
4. АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПАХОТНЫЙ АГРЕГАТ СИЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА УСТАНОВКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	
4.1. Установка приставки спереди энергетического средства.....	114

4.2. Установка приставки за плугом.....	126
4.3. Установка приставки на раму плуга.....	130
5. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЛУГА	
5.1. Определение кинематических параметров движения частицы почвы по рабочей поверхности корпуса плуга и траектории ее падения на поверхность поля.....	139
5.2. Определение кинематических параметров движения почвенного пласта по рабочей поверхности корпуса плуга и его падения на поверхность.....	151
5.3. Методы и результаты полевых исследований дальности отбрасывания почвы корпусом плуга.....	167
6. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ УСТРОЙСТВ К ОБОРОТНЫМ ПЛУГАМ ДЛЯ РАЗДЕЛКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ.....	173
7. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИСКЛЮЧЕНИЯ ЗАБИВАНИЯ МЕЖКАТКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВОЙ.....	185
8. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОБОРОТНЫХ ПЛУГАХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАЗДЕЛКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ.....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	204
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	205
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	214

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь ведется на площади порядка 5815 тыс. га, около 87,6 % которой используется сельскохозяйственными предприятиями, что свидетельствует об ориентированности на крупнотоварное производство [74]. Под посев зерновых и зернобобовых культур в 2018 г. было выделено 2348 тыс. га, при этом валовый сбор составил 6151 тыс. т при средней урожайности 26,7 ц/га [74]. Указанного объема производства зерна достаточно для внутреннего потребления как в продовольственных, так и в фуражных целях [97].

Основными сельскохозяйственными культурами, производимыми в Республике Беларусь, являются зерновые, которые наряду с кормовыми занимают основные площади (83 %), а также технические культуры – 8,9 %, картофель и овощи – 8,1 % [74, 98].

Повышение экспортного потенциала отрасли – приоритетное направление деятельности отечественного АПК. Республика Беларусь ежегодно экспортирует сельскохозяйственную продукцию и продукты питания на сумму более 4 млрд дол. США, при этом удельный вес сельскохозяйственного производства в экспорте ежегодно растет. Удельный вес сельскохозяйственного производства в ВВП республики в настоящее время составляет 8,6 % [4, 97, 98].

Главным условием повышения экономической эффективности аграрной отрасли является наращивание производства сельскохозяйственной продукции при снижении удельных затрат на всех его этапах. В Республике Беларусь в последнее десятилетие наблюдается устойчивый рост урожайности возделываемых культур. Это результат проявления, в первую очередь, таких факторов, как повышение доз вносимых органических и минеральных удобрений, средств защиты растений, улучшение качества семян и обработки почвы, посева. Однако все еще остается высокой себестоимость производимой продукции, что снижает ее конкурентоспособность и прибыльность хозяйств в целом.

Одной из основных причин сложившейся ситуации является преобладание традиционной отвальной многооперационной системы земледелия, требующей больших затрат ресурсов на выполнение механизированных работ и наличия большого количества техники.

Поэтому совершенствование сельскохозяйственных машин и технологий является актуальным. В решении данной проблемы важную роль играет выполнение задач взаимодействия сельскохозяйственных машин и орудий с почвой, от плотности которой зависит не только урожай, но и устойчивость равновесия агроэкосистемы.

Известно, что работа большинства ходовых систем и орудий сельскохозяйственного производства вызывает существенные изменения физико-механических свойств и структуры почвы, что приводит к ее ускоренной эрозии. При этом потери компонентов почвы не компенсируются, и она частично или даже полностью теряет свое плодородие. Отметим, что число земель, непригодных для земледелия, постоянно растет. Состояние агроэкологической системы зависит от степени механического воздействия на почву и общей культуры земледелия [11].

Самым энергоемким процессом в технологии возделывания и уборки сельскохозяйственных культур является обработка почвы. Наибольшая доля энергозатрат приходится на основную и предпосевную обработку. 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.

Удельный вес легких по гранулометрическому составу почв в республике составляет 44,5 %, в Брестской и Гомельской областях, соответственно, – 74,2 % и 77,4 %. Именно легкие по гранулометрическому составу почвы наиболее интенсивно подвергаются ветровой эрозии, имеют постоянный дефицит влаги (600–700 м³/га), что ведет к недобору с гектара 7–8 ц зерна или 50–60 ц картофеля [40]. Предпосевная обработка почвы легкого механического состава должна проводиться в сжатые сроки. Опоздание и частые обработки приводят к иссушению верхнего слоя и большой потере влаги, следовательно, урожая.

В Республике Беларусь тяжелые по гранулометрическому составу почвы занимают площадь 70,4 тыс. га. К ним относятся средние и тяжелые суглинки, легкие и тяжелые глины, содержащие 25 % и более в физической глины (частицы размером менее 0,1 мм) [40]. Для тяжелых почв характерен узкий интервал времени, в течение которого возможна их качественная обработка. Посев обычно запаздывает на 10–14 дней по сравнению с оптимальными

сроками. Вспашка сухой почвы недопустима, так как пашня получается глыбистой, и почти не образуется комков небольших размеров. При более высокой влажности почва практически не крошится. С наступлением сухой погоды почвы данного типа быстро пересыхают, образуются комки больших размеров, которые с трудом разрушаются рабочими органами культиваторов. В результате ухудшается крошение, пашня становится глыбистой, что приводит к некачественной подготовке почвы к севу, неравномерной заделке семян, снижению их полевой всхожести, и в итоге – к снижению на 20 %–30 % урожайности возделываемых культур [40, 61]. Поэтому поверхностный слой поля после вспашки тяжелых почв должен быть оперативно разрыхлен и выровнен.

Земли с потенциально возможным проявлением водной эрозии почв на склонах в республике составляют 1,4 млн га. Водная эрозия наносит существенный эколого-экономический ущерб. Проведенные в Институте почвоведения и агрохимии НАН Беларуси исследования показывают, что на пахотных землях склоном 5–8 градусов и более ежегодно с одного гектара водосборной площади с поверхностным стоком смывается в среднем до 10–15 т твердой фазы почвы, 150–180 кг гумусовых веществ, безвозвратно теряется до 10 кг азота, 4–5 кг фосфора и калия, 5–6 кг кальция и магния, запасы продуктивной влаги на склоновых почвах на 30 % ниже по сравнению с выровненными почвами [5, 40].

Таким образом, почвенно-климатические условия Республики Беларусь требуют применения адаптивных к каждой группе почв технологий и средств механизации их обработки.

Следующим важным направлением в развитии перспективной техники является разработка новых рабочих органов и машин, существенно повышающих качество обработки почвы и посева [40]. С целью улучшения процесса основной обработки почвы и снижения энергетических затрат на последующие технологические операции с плугами применяются различного рода боронки и приставки, которые крошат, рыхлят и уплотняют верхний слой обернутого пласта. При этом обеспечивается 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, позволяет

провести последующие технологические операции в более сжатые сроки, а разрыхленный слой обеспечивает сохранение влаги. Кроме того, качественная обработка верхнего слоя почв легкого механического состава рабочими органами приставок позволяет уменьшить количество последующих обработок и сократить сроки подготовки к посеву, следовательно, сохранить влагу в почве и провести ранний сев. Поэтому, с агротехнической точки зрения, применение дополнительных устройств с плугами позволит оптимально использовать время подготовки почвы к посеву, совместить агротехнические приемы для борьбы с потерями почвенной влаги, сократить одну культивацию при обработках почв легкого механического состава, снизить затраты энергии на проведение последующих обрабатывающих операций почв тяжелого механического состава. Однако устройства зарубежных фирм-производителей дорогостоящи и часто не пригодны к работе в почвенно-климатических условиях республики из-за большой их массы. Так, при работе в условиях переувлажнения их рабочие органы забиваются почвой, что влечет за собой нарушение выполнения технологического процесса. Кроме того, некоторые приставки являются прицепными, что создает трудности в их применении при гладкой вспашке оборотными плугами и при транспортировке.

Поэтому тема исследований, направленных на повышение эффективности совмещения основной и поверхностной обработки, является актуальной и важной для сельскохозяйственного производства, и ее реализация позволит повысить качество основной обработки почвы, снизить энергетические затраты на проведение последующих технологических операций и обеспечить конкурентоспособность плугов отечественного производства на рынке.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ К ПАХОТНЫМ АГРЕГАТАМ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

1.1. Значение основной обработки почвы в технологиях возделывания зерновых культур

При возделывании зерновых культур большое внимание уделяется предпосевной обработке. Качественная и своевременная обработка позволяет сохранить накопленную почвой влагу, заложить основу будущего урожая и снизить энергетические затраты на проведение последующих операций.

Технологии обработки почвы под зерновые Д. Шпаар подразделил на три группы [20]. Выбор их зависит от вида почвы, севооборота, климата и опасности возникновения ветровой и водной эрозии. Влияют и требования к возделываемым культурам: глубина заделки семян и плотность почвы, глубина и доля площади от следов колес, влажность и несущая способность почвы, количество, распределение и свойства растительных остатков.

Цель обработки почвы состоит в том, чтобы создать благоприятные условия для прорастания и развития сельскохозяйственных культур и обеспечить оптимальный водно-воздушный и питательный режим в почве [20, 53, 77, 78].

Основными задачами обработки почвы являются [20, 78]:

- сохранение и повышение плодородия почв с целью получения высокой урожайности сельскохозяйственных культур;
- изменение структуры обрабатываемого слоя почвы для создания и поддержания в период роста благоприятного водного, воздушного, теплового и питательного режимов;
- уничтожение и предупреждение развития сорняков, а также возбудителей болезней и вредителей сельскохозяйственных культур;
- заделка в почву органических и минеральных удобрений, а также равномерное распределение в пахотном слое органических остатков предшественника (солома, жнивье и пр.) и промежуточных культур;
- предотвращение водной и ветровой эрозии;
- создание требуемых условий для заделки семян на оптимальную глубину, ухода за посевами и для уборки урожая.

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 тяжелые почвы практически не крошатся, а с наступлением сухой погоды быстро пересыхают, образуются комки больших размеров, которые трудно разрушаются рабочими органами культиваторов. В результате пашня становится глыбистой, ухудшается крошение, что приводит к некачественной подготовке почвы к севу и неравномерной заделке семян, что в конечном итоге сказывается на урожае. Поэтому сразу после вспашки проводится культивация для разрыхления и выравнивания поверхностного слоя поля, а перед посевом – культивация на глубину заделки семян для получения двухслойного строения пахотного слоя: верхний слой рыхлый, им прикрываются семена, нижний, уплотненный, – для качественной заделки семян на заданную глубину [53].

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 обработок и широко использовать комбинированные агрегаты, состоящие из культиваторов, борон, катков, которые за один проход могут выполнить несколько технологических приемов [20].

С целью улучшения основной обработки почвы и снижения энергетических затрат на последующие технологические операции применяют различные сельскохозяйственные машины, отличающиеся рабочими органами и способами агрегатирования.

Установлено, что обработка почвы отвальными плугами ведет к снижению содержания углерода в почве и его избытку в атмосфере. Это способствует тепличному эффекту и возникновению глобального потепления [62, 100]. Поиск путей сохранения плодородия почв от эрозии выдвинул новые технологии ее обработки, такие как безотвальная или нулевая. Наряду с преимуществами (экономия топлива и уменьшение эрозионных процессов) данные технологии позволяют сохранить запасы углерода в почве, не нарушив круговорот его в атмосфере, следовательно, сохранить устойчивость

биосферы. По результатам исследований ученых, переход к безотвальной обработке почвы позволит удерживать в ней углерод [52, 100]. Несмотря на преимущества безотвальной и нулевой обработки почв, их внедрение в практическое земледелие идет медленно. Это связано с тем, что широкое применение безотвальной обработки почвы не представляется возможным в связи с сильной засоренностью полей растениями, борьба с которыми при данных технологических приемах должна сопровождаться повсеместным применением в технологиях возделывания гербицидов, что негативным образом сказывается на экологии окружающей среды и повышает себестоимость продукции. Поэтому агротехника возделывания на данном этапе развития затруднена без основной обработки почвы пахотными агрегатами. Следовательно, необходимо искать пути снижения потерь углерода из почвы не только за счет применения почвощающих технологий, но и совершенствования конструкций пахотных агрегатов, машин и орудий, предназначенных для основной и поверхностной обработки почвы. На стадиях создания почвообрабатывающих агрегатов необходимо учитывать их воздействие на почву, которое, с одной стороны, не должно превышать допустимое, а с другой – не сильно разуплотнять ее, исключая возможность перехода углерода в атмосферу.

Между обработкой почвы и посевом озимых зерновых – небольшой промежуток времени, и почва не успевает осесть и восстановить капиллярный процесс после вспашки. При недостаточной влажности это приводит к образованию крупных комков и глыб, прочность которых через 3–4 дня возрастает, а твердость достигает значений 2,5–5,0 МПа, поэтому необходимо проводить дополнительные операции для крошения и уплотнения почвы [16].

При недостаточном уплотнении всходы запаздывают, повышается опасность вымерзания, что ведет к снижению урожайности. Необходимость создания уплотненного слоя объясняется не только снижением испарения с поверхности. Корни растений располагаются в верхних слоях, и от того, в каких условиях они будут находиться, будут зависеть и рост растений, и урожай. При дефиците влаги ее необходимо сконцентрировать в зоне расположения корневой системы. Влага перемещается из рыхлых слоев почвы в более плотные. В уплотненном слое увеличивается запас фосфора

и нитратов [30]. Для разных типов и видов почв, при выращивании зерновых культур, установлены оптимальные значения плотности (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Значения оптимальной плотности почвы
для зерновых культур [20, 24, 70, 78]

Тип почвы	Вид почвы	Плотность почвы, г/см ³	
		равновесная	оптимальная
Дерново-подзолистая	Песчаная	1,5–1,6	–
То же	Супесчаная	1,3–1,4	1,20–1,35
«	Суглинистая	1,35–1,50	1,10–1,25
Дерново-карбонатная	То же	1,4–1,5	1,10–1,25
Дерново-глеевая	«	1,4	1,2–1,4
Луговая пойменная	«	1,15–1,20	–
Серая лесная	Суглинистая	1,35–1,40	1,15–1,25
Чернозем	То же	1,0–1,3	1,2–1,3

Изучению процесса испарения влаги из почвы с целью выявления основных факторов, влияющих на его величину, посвящены работы многих ученых: И.Б. Ревута [67], М.Н. Михайлова и Н.В. Краснощекова. На основании результатов их исследований А.А. Кнауц сделал вывод, что в наибольшей мере предотвращают испарения почвенные агрегаты размером 1–3 мм [30]. Распыленная и глыбистая почва значительно быстрее высыхает. Основное средство борьбы с испарением – рыхление поверхностного слоя.

Качественно подготовленная под посев почва состоит из рыхленного слоя от 2 до 4 см и плотного семенного ложа, при этом на поверхности находятся более крупные комки (рис. 1.1). При выполнении данных условий к семенам сверху поступают воздух и тепло, снизу – влага.

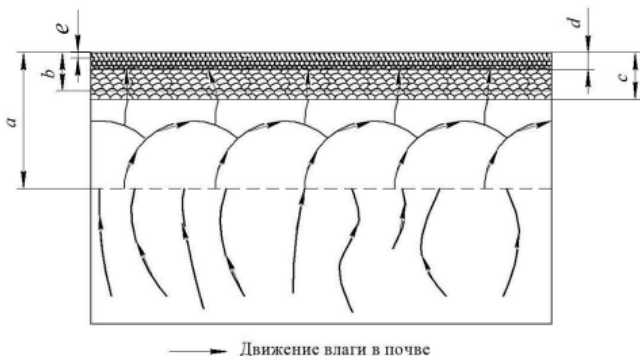


Рис. 1.1. Структура слоев почвы и распределение в ней влаги после воздействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий:
a – глубина вспашки; *b* – слой интенсивного прогревания,
c – глубина предпосевной обработки, *d* – уплотненный слой почвы;
e – рыхлый слой

Повысить качество крошения пласта почвы можно, применив корпус с активным отвалом (рис. 1.2). Отвал плуга состоит из укороченной груди отвала и вертикального ротора с четырьмя острыми ножами, изогнутыми по форме отвала. Количество оборотов ротора определяется физико-механическим состоянием почвы, что позволяет получить оптимальное крошение пласта при различных почвенных условиях. Привод активного отвала осуществляется от ВОМ или гидросистемы трактора [89, 94].

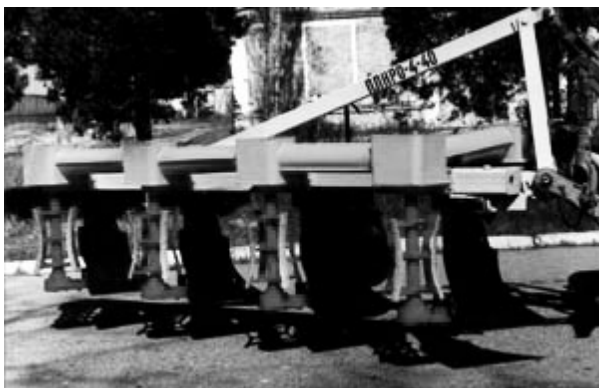


Рис. 1.2. Плуг с активным отвалом ПЛНРО-4-40

Исследования показали, что плуг с активными отвалами обеспечивает высококачественную вспашку почв без глыб и крупных комков, с качественной заделкой растительных остатков и измельчением крупных стеблей, равномерным перемешиванием их в нижней части пахши [78, 79, 94]. Однако применение активных отвалов приводит к повышению энергетических затрат на основную обработку.

Применение на плугах пластинчатых (перьевых) отвалов позволяет повысить качество крошения почвенного пласта, обеспечить ровную поверхность вспашки и снизить энергозатраты за счет снижения тягового сопротивления плуга на 17 %–24 % (рис. 1.3). Их особенностью является легкость в обслуживании: каждую пластину можно заменять отдельно по мере износа [78].

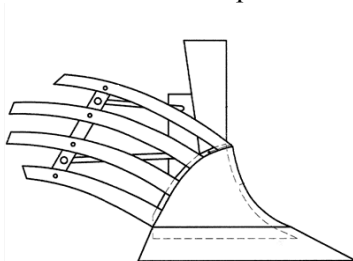


Рис. 1.3. Корпус плуга с пластинчатым (перьевым) отвалом

Совмещение основной и поверхностной обработки улучшает эффект крошения и усадки почвы, уменьшает потери влаги и снижает затраты рабочего времени и топлива. Структура различных типов почв после обработки плугом с дополнительными устройствами для разделки почвенного пласта приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Распределение размеров почвенных фракций после вспашки плугом с дополнительным устройством для разделки почвенного пласта [20]

Величина фракции, мм	Содержание фракций, %				
	Песок	Супесь	Песчаный суглинок	Пылеватый суглинок	Суглинистая глина
< 10	97	87	78	80	20
10–40	3	8	11	10	37
40–80	–	5	10	5	16
> 80	–	–	1	5	27

Применение при вспашке дополнительных устройств для разделки почвенного пласта позволяет на почвах среднего и тяжелого механического состава улучшить структуру почвы, следовательно, снизить затраты на последующие операции.

Таким образом, совмещение основной и поверхностной обработки позволит рационально использовать время подготовки почвы к посеву, объединить 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.

1.2. Анализ возможности использования различных дополнительных устройств и орудий к оборотным плугам для поверхностной обработки почвенных пластов

Основной прием механической обработки почвы – вспашка, осуществляемая отвальными или безотвальными рабочими органами плугов и глубокорыхлителей. Качественная подготовка почвы под посев является основой для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур, создает наилучшие условия для повышения качества и снижения энергоемкости последующих почвообрабатывающих операций.

При механической обработке в почве происходят крошение, перемешивание, оборачивание, выравнивание, уплотнение, создание микрорельефа.

При крошении уменьшаются размеры почвенных структурных отдельностей [81], меняется взаимное расположение почвенных комков и частиц, которые отделяются друг от друга. При этом 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. При этом улучшается водо- и воздухопроницаемость почвы, усиливается микробиологическая деятельность. Во взрыхленной почве быстрее разлагаются растительные остатки, интенсивнее накапливаются элементы минерального питания.

При уплотнении изменяется расположение почвенных отдельных частей с уменьшением объема почвы. При этом разрушаются глыбы, более тесно размещаются почвенные частицы, увеличивается капиллярная пористость. На основании результатов исследований А.Б. Друженко, И.Х. Досаева, В.Б. Бохиева А.А. Кнаус [30] сделан вывод, что в подповерхностном уплотненном слое наблюдается повышение значений температуры на 1,0 °С–1,5 °С по сравнению с неуплотненным. Уплотнение посевного ложа до посева способствует равномерному распределению семян по глубине, послепосевное – лучшему соприкосновению их с почвенными частицами, вследствие чего семена дают дружные ранние и равномерные всходы. Кроме того, улучшаются условия ухода за посевами и уборки урожая.

При перемешивании изменяется взаимное расположение почвенных отдельных частей, обеспечивается более однородное состояние обрабатываемого слоя почвы, а также равномерное распределение 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 обработки 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 для ухода за посевами и при уборке урожая.

К обработке почвы предъявляются следующие агротехнические требования [53, 77, 78].

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

2. Необходимо соблюдать заданную глубину обработки: отклонение не должно превышать ± 2 см.

3. 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.

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

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

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

7. 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 [57, 75].

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

Традиционная основная обработка вызывает существенные изменения физико-механических свойств и структуры почвы, что приводит к ее ускоренной эрозии, при которой потери компонентов почвы не компенсируются, и она частично или даже полностью теряет свое плодородие.

С целью улучшения качества основной обработки почвы и снижения энергетических затрат на последующие операции в конструкциях пахотных агрегатов применяют различные дополнительные устройства и орудия для поверхностной обработки почвенных пластов. Плуг с дополнительными устройствами [16] обеспечивает оборот пласта, также крошение, рыхление, выравнивание и уплотнение его верхнего слоя, уничтожение сорняков (табл. 1.3) [20]. 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.

Поскольку комбинированные агрегаты для обработки почвы представляют собой достаточно сложную инженерную конструкцию, во время их разработки ставится задача найти оптимальное

соотношение между стремлением совместить наибольшее количество технологических операций в одном агрегате и сохранить высокий уровень качества выполнения этих операций.

Таблица 1.3

Виды воздействия разных рабочих органов на почву [20]

Вид воздействия	Рабочие органы							
	Дисковая борона	Культиватор	Рифленный каток	Гладкий каток	Кольчато-шпоровый каток	Кольчато-зубчатый каток	Пружинная зубчатая борона	Волокуша
Выравнивание	±	±	–	±	±	±	–	+
Крошение	+	+	+	±	+	+	+	±
Рыхление	±	+	–	–	+	±	±	–
Уплотнение	–	±	+	+	+	+	±	±
Уничтожение сорняков	±	+	–	–	–	–	±	±

Примечания: «+» – пригоден; «±» – условно пригоден; «–» – не пригоден.

Работают пахотные агрегаты с дополнительными устройствами следующим образом. Плуг подрезает, перемещает, оборачивает и крошит (частично или полностью) пласт почвы (рис. 1.4, а). Затем рабочие органы приспособлений сразу (рис. 1.4, б) или при следующем проходе агрегата (рис. 1.4, в) крошат, рыхлят и уплотняют верхний слой обороченного пласта. Крошение и рыхление поверхности пласта особенно важно при обработках тяжелых почв (рис. 1.4, а, б), уплотнение – легких (рис. 1.4, в). В связи с этим применяют различные конструкции рабочих органов приставок. На тяжелых почвах применяют дисковые рабочие органы, которые позволяют создать оптимальный водно-воздушный и тепловой режимы. При обработке легких почв используют катки, которые выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы.

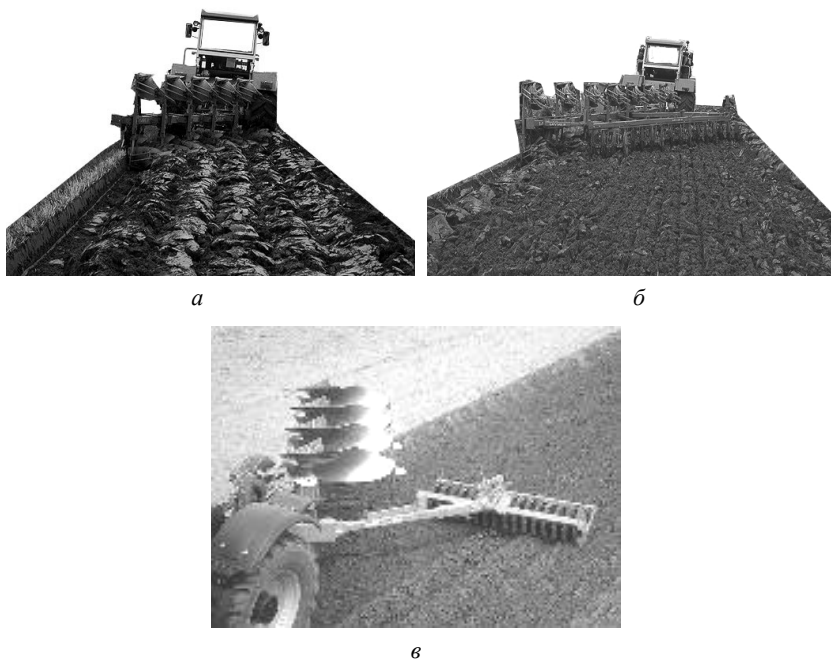


Рис. 1.4. Состояние поверхности поля при различных видах обработки:
а – тяжелые почвы после вспашки;
б, в – тяжелые и легкие почвы после вспашки с одновременной обработкой
 поверхности почвенного пласта катковыми приставками

В настоящее время применение в конструкциях пахотных агрегатов получили различные рабочие органы (рис. 1.5) [78], наиболее широкое – приставки, рабочими органами которых являются катки.

Возможны следующие варианты совмещения технологических операций: вспашка с боронованием (рис. 1.5, *а*); вспашка с дискованием (рис. 1.5, *б*); вспашка с прикатыванием (рис. 1.5, *в, г*).

Комбинированный агрегат, содержащий зубовые бороны (рис. 1.5, *а*), может применяться для обработки легких и средних почв. Плуг подрезает и оборачивает пласт почвы, зубовые бороны крошат верхний слой и частично выравнивают гребнистую и глыбистую поверхность пашни. Зубовые бороны рыхлят, не уплотняя, верхний слой почвы и не обеспечивают качественную разделку

грунта тяжелого механического состава, поэтому наиболее эффективными считаются приспособления, включающие дисковые и катковые рабочие органы (рис. 1.5, б, в, г) [78].

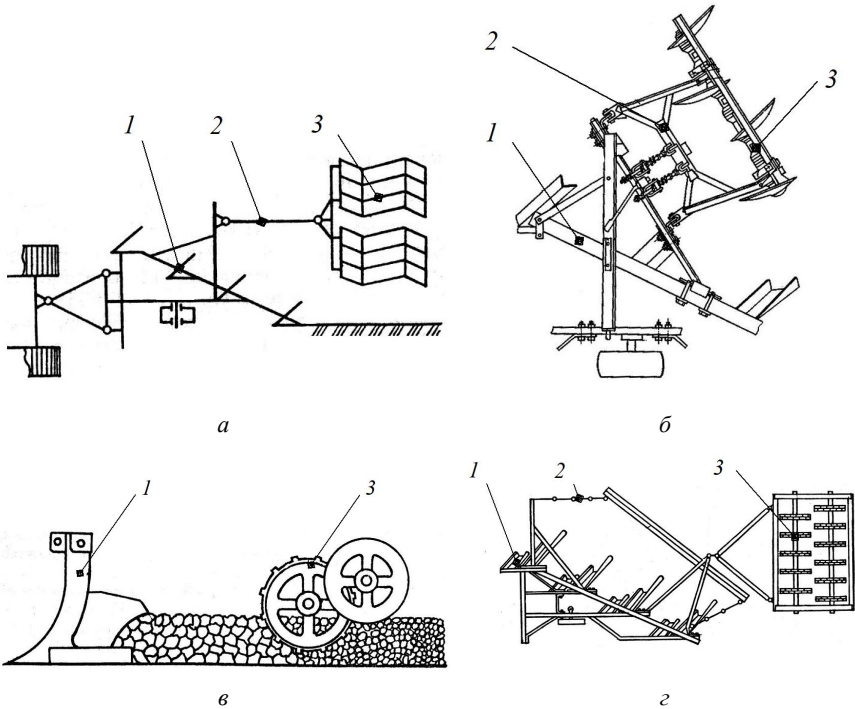


Рис. 1.5. Схемы приспособлений для поверхностной обработки почвенного пласта в конструкциях пахотных агрегатов с использованием:

- а – зубовых борон; б – дисковой секции бороны;
- в – катков; г – катка и волокуши; 1 – плуг; 2 – прицепное устройство;
- 3 – дополнительное приспособление

Для обработки почв на склонах эффективным является использование приспособления со сферическими дисками (рис. 1.5, б). При движении агрегата поперек склона корпуса плуга подрезают и оборачивают пласт, а диски образуют на поверхности вспаханного поля сеть углублений овальной формы.

Пахотный агрегат с приспособлением (рис. 1.5, в) позволяет выравнивать поверхность поля с уплотнением верхнего слоя. Он включает

в себя плуг 1, сцепное устройство 2, приспособление 3 в виде волокуши и кольчато-шпоровых катков. Волокуша выравнивает верхний слой почвы, каток обеспечивает эффективное дробление и уплотнение почвенных агрегатов. При движении плуг подрезает и оборачивает пласт почвы. Волокуша, вследствие установки ее 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 плуг с приставкой, содержащей измельчающие, выравнивающие и уплотнительные катки (см. рис. 1.5, в, г), при этом ряд первых установлен ниже вторых, что обеспечивает лучшее крошение твердых глыб. При движении агрегата корпусá плуга 1 подрезают и оборачивают пласт, катки первого ряда разрушают крупные глыбы, на мелкие комки воздействуют катки второго, дробя их и уплотняя почву.

Фирмы Lemken, Amazone, Horsch и Väderstad предлагают комбинированные агрегаты, совмещающие за один рабочий проход процессы основной, предпосевной обработки почвы и сева [20]. На полях, засоренных камнями и растительностью, применение данных комбинированных агрегатов недопустимо.

Следует отметить, что даже распространенные приспособления не обеспечивают одинаковую обработку одних и тех же почв при различных климатических условиях. Поэтому одним из основных требований к проектированию конструкций и рабочих органов почвообрабатывающих приспособлений к пахотным агрегатам является их универсальность, т. е. обеспечение требуемого качества обработки различных почв вне зависимости от климатических условий. Таким образом, необходимо исследовать рабочие органы дополнительных устройств для разделки почвенного пласта, обеспечивающие на почвах легкого механического состава оптимальное уплотнение, среднего и тяжелого – крошение и рыхление.

1.3. Обзор и анализ конструкций рабочих органов для дополнительной обработки почвенных пластов

Поверхностная обработка включает следующие операции: боронование, культивация, лушение, прикатывание и фрезерование.

К машинам для поверхностной обработки почвы относятся: бороны, лушильники, культиваторы, фрезы, катки и волокушки [55, 77, 78].

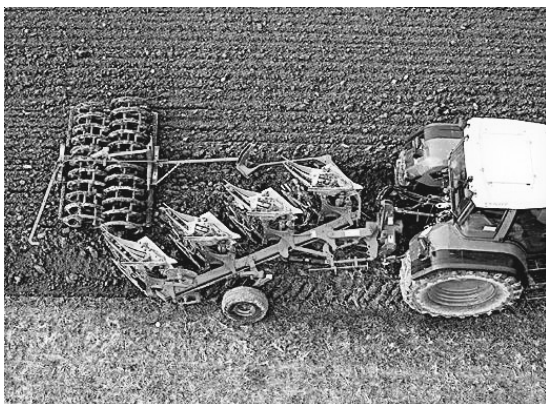
Дополнительные приспособления, применяемые в пахотных агрегатах для поверхностной обработки, в отечественной и зарубежной литературе принято называть приставками. По способу агрегатирования приставки можно разделить на навешиваемые спереди трактора (рис. 1.6, *а*), навешиваемые на раму плуга (рис. 1.6, *б*) и прицепные (рис. 1.6, *в*).



а



б



в

Рис. 1.6. Схемы установки катковых приставок на пахотных агрегатах: *а* – навешиваемые спереди трактора; *б* – навешиваемые на раму плуга; *в* – прицепные

На приставки для получения требуемого эффекта от обработки почвы устанавливают различные рабочие органы.

При обработке пересохших, слекающихся и тяжелых почв применяют дисковые рабочие органы (рис. 1.7). К основным преимуществам дисков перед лемешными, лаповыми и другими рабочими органами того же назначения можно отнести медленное изнашивание, меньшую подверженность забиванию и простоту эксплуатации.

Плоские диски (рис. 1.7, *а*) применяются в качестве дисковых ножей плугов, а так же рабочих органов луцильников для обработки почв, в основном подверженных ветреной эрозии [27, 31].

Сферические диски (рис. 1.7, *б*) применяют для крошения задернелых пластов и глыб, весенней предпосевной обработки почвы [27].

Режущая кромка диска, установленного под углом к направлению движения (угол атаки), 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 еще более погружаются в почву, ее крошение возрастает; с увеличением угла наклона диска к вертикали (угол крена) несколько улучшаются оборот и перемешивание пласта почвы.

Вырезные диски (рис. 1.7, *в*) применяют 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.

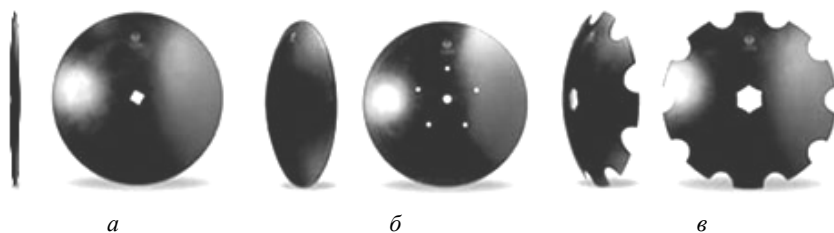


Рис. 1.7. Типы дисковых рабочих органов:
а – плоский; *б* – сферический; *в* – вырезной

Для удаления почвы, налипающей на вогнутую поверхность дисков, применяют скребки различных конструкций (рис. 1.8) [69].

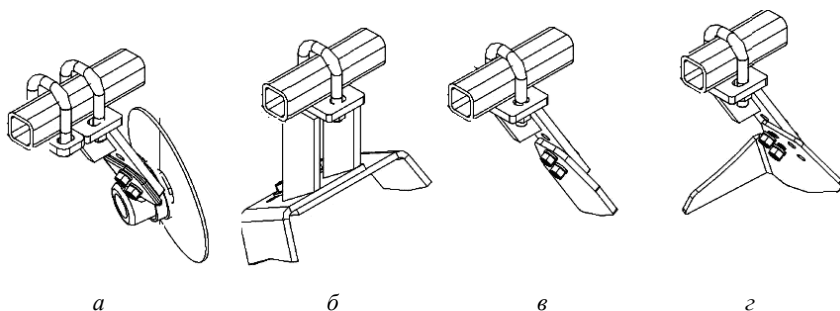


Рис. 1.8. Скребки для очистки дисков:
а – вращающийся скребок; *б* – скребок подшипниковой опоры;
в – стандартный чистик; *г* – угловой чистик

При обработке почвы возникает необходимость ее рыхления, выравнивания и перемешивания поверхностного слоя, уничтожения сорняков. Для этой цели чаще всего применяют зубовые рабочие органы (рис. 1.9) [78].

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 наклона возрастает интенсивность рыхления частиц почвы. Для поверхностного рыхления почвы использование зуба с большим углом наклона (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 [77, 78].

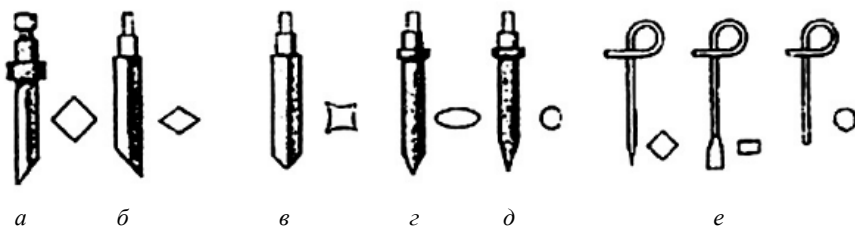


Рис. 1.9. Типы зубовых рабочих органов:
а – квадратный зуб тяжелой и средней борон;
б – ромбовидный зуб пастбищной бороны;
в – зуб фасонного сечения качающейся вибрационной бороны;
г – эллипсовидный зуб тяжелой бороны; *д* – круглый зуб легкой бороны;
е – зубья сетчатой бороны

Зубья бывают разной формы. Круглый зуб (см. рис. 1.9, *д*) давит на почву выпуклой стороной, сминая и измельчает во время работы частицы почвы. Граненые, прямоугольные и квадратные зубья (см. рис. 1.9, *а*) работают удовлетворительно только тогда, когда движутся вперед острым ребром. 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 заглоблению. Установка зуба с наклоном вперед применяется для обработки тяжелых задернелых почв. При установке зуба с наклоном назад уменьшается глубина обработки. Такая установка зуба применяется для заделки семян и удобрений. Глубину хода можно регулировать изменением давления на зубья, накладывая на раму добавочные грузы (балласт) [27]. Зубья могут быть соединены с рамой жестко, шарнирно или через пружинную стойку. По нагрузке, приходящейся на один зуб, зубовые бороны подразделяют на три группы: 1) тяжелые зубовые бороны, 2) средние зубовые бороны и 3) легкие зубовые 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, заделкой семян и минеральных удобрений.

Применение волокуш в качестве приставок позволяет получить выровненный уплотненный мелкокомковатый поверхностный слой почвы, что приводит к быстрому испарению влаги из верхнего слоя и образованию корки. Транспортировать волокуши на поле необходимо отдельно от плуга [2].

Для разделки поверхностного слоя почвы в приставках наиболее часто используют универсальные и рыхлительные лапы различных форм и размеров [77, 78, 83].

Универсальные лапы (стрельчатые по форме) имеют значительно больший угол крошения, благодаря чему не только подрезают сорняки лезвием, но и крошат почву.

Рыхлительные лапы разделяются на долотообразные, оборотные и копьевидные. Характерная их особенность – угол крошения изменяется по высоте лапы.

Катки [29, 78] применяют для прикатывания лугов и осушенных болот, в полеводстве – для уплотнения и выравнивания почвы, дробления глыб, разрушения почвенной и ледяной корки, заделки мелких семян, прикатывания зеленого удобрения перед запахиванием и для придания поверхности соответствующего профиля в целях борьбы с эрозией почвы.

Уплотняющая способность катка зависит от скорости его движения, массы, диаметра и ширины захвата. С увеличением скорости движения агрегата глубина погружения катка в почву и величина ее уплотнения уменьшаются. Диаметр катка влияет на размер пятна контакта. Удельная нагрузка на катки общего назначения в зависимости от условий работы принимается в пределах от 2 до 6 кН/м [1].

Для уплотнения и выравнивания почвы, дробления глыб, разрушения почвенной корки применяют катки (рис. 1.10) [29, 77, 78], рабочая поверхность которых разнообразна и предназначена для выполнения различных функций. По форме поверхности можно выделить кольчато-шпоровые, кольчато-зубчатые, гладкие, кольчатые, борончатые и прутковые катки.

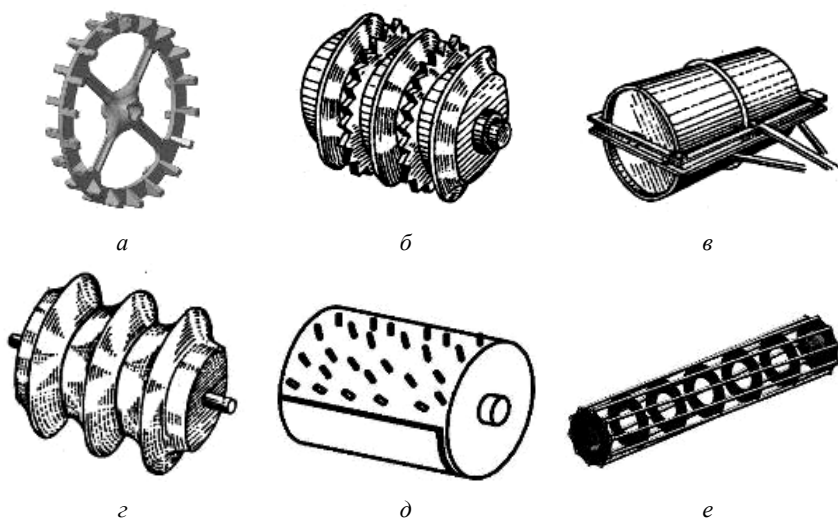


Рис. 1.10. Виды рабочих органов катков:
a – кольчато-шпоровый каток; *б* – кольчато-зубчатый каток;
в – гладкий каток; *г* – кольчатый каток; *д* – борончатый каток;
е – прутковый каток

Кольчато-шпоровые катки (см. рис. 1.10, *a*) представляют собой набор колец, снабженных шпорами. Шпоры, углубляясь, уплотняют нижний подповерхностный слой почвы, на выходе из нее рыхлят верхний поверхностный слой. Однако при обработке переувлажненных почв эти катки, имеющие одну ось, забиваются почвой, превращаются в «земляной» каток [42].

Кольчато-зубчатый каток (см. рис. 1.10, *б*) состоит из набора чередующихся колец с клиновидной и зубчатой рабочими поверхностями. Эти катки дробят глыбы лучше гладких, но хуже кольчато-шпоровых. Однако в отличие от последних они легче самоочищаются за счет различной окружной скорости колец [42].

Гладкие катки (водоналивные) (см. рис. 1.10, *в*) применяют для уплотнения почвы и выравнивания поверхности. Гладкие катки разрушают глыбы или вдавливают их в почву. Недостатком такой обработки является быстрое испарение влаги из верхнего слоя и образование корки. Поэтому на предпосевной обработке использование водоналивных катков ограничено [1, 42].

Кольчатые катки (см. рис. 1.10, *з*) предназначены для уплотнения нижних слоев почвы при воздействии на нее узкими острыми, глубоко врезающимися кольцами. При вдавливании колец одновременно рыхлится верхний слой. Данные катки не выравнивают поверхность поля.

Борончатые катки (см. рис. 1.10, *д*) выполнены в виде цилиндрических барабанов, на поверхности которых по винтовой линии укреплены зубья. Под действием давления катка почва уплотняется, зубья рыхлят поверхностный ее слой и разрушают корку.

Прутковые, или решетчатые, катки (см. рис. 1.10, *е*) изготавливают из круглых прутьев с промежутками между ними, вдвое большими диаметра прутка, или из уголков, прикрепленных к обрусам или дискам. Катки служат для дробления глыб и уплотнения почвы. Комки почвы, попавшие внутрь катка, разбиваются при его обороте и выпадают. При высокой влажности внутреннее пространство катка заполняется почвой, что приводит к увеличению его массы и отрицательно сказывается на его работе.

Кольчато-прутковый почвообрабатывающий каток [32, 33] (рис. 1.11) является комбинацией кольчато-шпорового и кольчато-зубчатого катка и представляет собой набор колец, снабженных прутками цилиндрической формы. Прутки устанавливаются на некотором удалении от кромки диска, что улучшает крошение крупных

глыб. На ось диски устанавливаются с некоторым зазором, что позволяет катку самоочищаться [104]. Прутки, углубляясь, крошат и уплотняют нижний подповерхностный слой почвы; выходя из нее, разрыхляют верхний поверхностный слой.



Рис. 1.11. Кольчато-прутковый каток

Из опыта применения различных катков в нашей стране и за ее рубежами известно, что катки общего и специального назначения выполняют диаметром в пределах от 200 до 700 мм. Для кольчато-шпоровых катков рекомендуемый диаметр составляет 300–545 мм [1, 27, 30, 63, 68].

Анализ конструкций рабочих органов показывает, что для обработки почв тяжелого и легкого механического состава наиболее эффективно применение плугов с катковыми приставками, с различными рабочими органами, так как они хорошо крошат, выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы.

Таким образом, дополнительные устройства к пахотному агрегату должны обеспечивать крошение, уплотнение, рыхление и выравнивание поверхностного слоя на почвах легкого и среднего механического состава, на тяжелых – обеспечивать качественное крошение. Анализ конструкций рабочих органов приставок показал, что при обработке такой эффект можно получить, применяя катки с кольчато-прутковыми рабочими органами.

1.4. Обзор и анализ исследований по использованию дополнительных устройств к плугам

Вопросы взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и проектирования рабочих поверхностей рассмотрены

в трудах академика В.П. Горячкина [14]. Им получено уравнение траектории движения частицы отваливаемого пласта без учета силы трения, возникающей между почвенным пластом и поверхностью отвала.

В исследованиях, проводимых П.П. Казакевичем [22, 23], А.В. Клочковым [28], В.А. Лаврухиным [38], С.Г. Мударисовым [48, 49, 50], В.Г. Муфтеевым [50], А.Н. Хахулиным [91], А.Н. Юриным [96], рассмотрены вопросы движения пласта почвы по лемешно-отвальной поверхности и обоснованы ее параметры.

Вопросом распределения действующих на плуг сил при выполнении технологических операции занимались Г.Н. Синеоков [79], А.А. Чапкевич [83] и В.И. Корешков [84]. Но в данных исследованиях не учитывалось наличие в пахотном агрегате дополнительных устройств.

Исследованием вопросов взаимодействия гладких катков с почвой занимались С. Аминов [1], В.П. Горячкин [14] В.А. Желиговский [18], В.В. Кацыгин [25, 26], А.А. Кнаус [30], М.Н. Летошнев [41], В.А. Новичихин [43, 52], С.С. Саакян [71, 72], В.И. Скорик [80] и С.Ф. Тряпичкин [88].

Сопротивление качению гладких катков, движению по ровной местности с постоянной скоростью определяется по формуле Грандуане–Горячкина [77, с. 469]:

$$R_{\text{пр}} = \frac{0,86G_{\text{пр}}^{\frac{4}{3}}}{k_{\text{см}}^{\frac{1}{3}} b_{\text{пр}}^{\frac{1}{3}} D_{\text{к}}^{\frac{2}{3}}}, \quad (1.1)$$

где $G_{\text{пр}}$ – сила тяжести катка и приходящаяся на его долю сила тяжести машины или балласта, Н;

$k_{\text{см}}$ – коэффициент объемного смятия, Н/см³;

$b_{\text{пр}}$ – ширина захвата приставки, м;

$D_{\text{к}}$ – диаметр катка, м.

Глубина погружения катка $h_{\text{пр}}$ определяется по формуле [77, с. 470]:

$$h_{\text{пр}} = \frac{1,3G_{\text{пр}}^{\frac{2}{3}}}{k_{\text{см}}^{\frac{2}{3}} b_{\text{пр}}^{\frac{2}{3}} D_{\text{к}}^{\frac{1}{3}}}. \quad (1.2)$$

Данные зависимости применимы только для гладких (водоналивных) катков, которые используются исключительно в прицепных приставках.

Исходя из условий защемления комка почвы поверхностью катка, В.А. Желеговский [18, с. 31] рекомендует его диаметр выбирать из следующего соотношения:

$$D_k \geq d_{\text{ком}} \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right), \quad (1.3)$$

где $d_{\text{ком}}$ – диаметр комка, м;

φ_1 – угол внутреннего трения почвы, град;

φ_2 – угол трения почвы о металл, град.

Диаметр катка с учетом глубины уплотняемого слоя, исходной и требуемой плотности C . Аминов [1] рекомендует находить по формуле

$$D_k \geq \frac{H \cdot \rho + a(\rho - \rho_0)}{\rho \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)}, \quad (1.4)$$

где H – высота комка, м;

ρ – требуемая плотность почвы, г/м³;

a – глубина вспашки, м;

ρ_0 – начальная плотность почвы, г/м³.

Автор установил, что для работы катка без сгруживания с комками высотой до 0,1 м его диаметр должен быть не менее 0,29 м [1]. Данное условие применимо для всех видов катков.

Кацыгиным В.В. [26] предложена формула, выражающая общую зависимость между напряжением и деформацией почвы в виде функции гиперболического тангенса:

$$\sigma = p_0 \operatorname{th} \left(\frac{k_{\text{см}}}{p_0} h_{\text{тр}} \right), \quad (1.5)$$

где p_0 – предел несущей способности почвы, Па.

Коэффициент сопротивления перекачиванию В.В. Кацыгин рекомендует ориентировочно определять по формуле

$$f_{\kappa} = \sqrt{\frac{h_{\text{пр}}}{C_{\mu} D_{\kappa}}}, \quad (1.6)$$

где $C_{\mu} = 1,66$.

Данные формулы нашли широкое применение в рассмотрении вопросов взаимодействия гладких катков и ходовых систем с почвой.

Исследованиям геометрических и технологических параметров спиральных катков посвящена работа В.П. Мармалюкова [42]. Им был проведен теоретический анализ процесса взаимодействия спирального катка с почвой, определен оптимальный угол атаки 10° – 15° и угол подъема спирали до 10° , при которых достигается максимальное уплотнение и выровненность поверхности. Мармалюковым В.М. отмечено, что для определения оптимальных геометрических параметров и режимов работы спирального катка требуется проводить экспериментальные исследования.

Избасарова З.И. [21] занималась обоснованием конструктивно-технологических и режимных параметров спирального пневматического катка для уплотнения почв повышенной влажности. Однако в ее работах не уделено внимание вопросу применения данных катков совместно с пахотными агрегатами. Рассмотрен вопрос уплотнения почвы пневматическим катком без учета взаимодействия с комьями.

Голубев В.В. [12] предложил конструкцию почвообрабатывающего катка (трубчатого с дополнительным приводом), в которой предусмотрено изменение кинематического режима с учетом условий работы. Обоснован диаметр наружной поверхности катка, шаг расстановки, количество и диаметр промежуточных цилиндрических трубчатых элементов. Предложено уравнение, определяющее время и величину усилий, передаваемых цилиндрическим трубчатым элементом на почву при их взаимодействии в зависимости от режимов работы катка. Полученные зависимости

применимы только для приводных катков, использование которых в качестве приставок ведет к значительному усложнению их конструкции.

Виноградов Ю.А. [8] обосновал параметры пруткового сетчато-зубового катка из условия наибольшего уплотнения в слое 50–100 мм. При этом отмечено, что расстояние между осями катка должно находиться в пределах 67–151 мм при длине зубьев 50 мм и минимальном диаметре 256 мм. Приведенные данные показывают, что диаметр катка недостаточен для обработки почв с комками более 0,1 м [1].

2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЧВ И УСТОЙЧИВОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ

2.1. Физико-механические свойства почвы и методика их определения в лабораторных и полевых условиях

Агроэкосистема является сложной открытой системой и как компонент биосферы находится в постоянном энерго-и массообмене с окружающей средой.

Агроэкосистема представляет собой участок территории, на котором производится сельскохозяйственная продукция. Агросистема включает в себя почвы, поля, агроценозы, скот, фрагменты естественных и полустественных экосистем (леса, кормовые угодья, болота, водоемы), человека, т. е. является многокомпонентной (компарментальной). Основным источником энергии для нее является солнце. Агроэкосистемы в зависимости от энергозатрат делятся на интенсивные, экстенсивные и комплексные. Наиболее энергозатратными и опасными, с точки зрения качественного влияния на окружающую среду, являются интенсивные агроэкосистемы, в которых происходит разрушение почвы, уничтожение ресурсного биоразнообразия.

Почва, как одна из составляющих частей агросистемы, является главной средой в обеспечении людей продовольствием, а ее агрофизическое состояние играет существенную роль в сохранении устойчивого равновесия агроэкосистемы. Известно негативное влияние сельскохозяйственной техники на почву в процессе ее обработки, особенно в ее уплотнении колесными движителями.

Переуплотненные почвы характеризуются агротехническими повреждениями, т. е. параметрами, влияющими на ее плодородие, и одним из них является плотность.

Плотность почв

В объеме почвы выделяют три фазы: твердую, жидкую и газообразную. Полный объем почвенного образца определим по формуле

$$V = V_{\text{СК}} + V_{\text{В}} + V_{\text{Г}} = V_{\text{П}} + V_{\text{СК}}, \quad (2.1)$$

где $V_{\text{СК}}$ – объем твердой фазы, м^3 ;

$V_{\text{В}}$ – объем жидкой фазы, м^3 ;

V_{Γ} – объем газообразной фазы, м³;

V_{Π} – объем пор жидкости и газа ($V_{\Pi} = V_{\text{В}} + V_{\Gamma}$), м³.

Механический состав почвы определяет ее свойства.

Данные, показывающие влияние механического состава почвы на удельное сопротивление и износ рабочих органов почвообрабатывающих орудий при вспашке, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Влияние механического состава почвы на удельное сопротивление и износ рабочих органов почвообрабатывающих орудий при вспашке

Название почв по механическому составу	Удельное сопротивление, кг/см ²	Удельный износ лемехов, г/га
Глинистые	0,7–0,8	2–10
Суглинистые:		
тяжелые	0,5–0,7	
средние	0,4–0,5	20–30
легкие	0,3–0,4	
Супесчаные	0,2–0,3	70–100
Песчаные	0,2	
Песчаные каменистые	–	200–300

Плотность почвы (г/см³) определяется как отношение массы почвенного образца m_{Π} к ее объему V :

$$\rho = \frac{m_{\Pi}}{V}. \quad (2.2)$$

В богатых гумусом почвах плотность верхних горизонтов колеблется в пределах 1,0–1,3 г/см³. В почвах с низким запасом гумуса эта величина изменяется в пределах от 1,30–1,45 г/см³. В подпахотном уплотненном слое плотность достигает 1,5–1,6 г/см³, на глинистых почвах – 1,6–1,9 г/см³ [4].

Плотность твердых частиц почвы можно определить по формуле

$$\rho_s = \frac{m_{\text{СК}}}{V_{\text{СК}}}, \quad (2.3)$$

где $m_{\text{СК}}$ – масса твердых частиц (скелета) почвы, кг.

Для большинства почв ρ_s меняется в незначительных пределах от 2,55 до 2,70 г/см³. В среднем для песчаных почв – 2,6 г/см³, для глинистых – 2,7 г/см³.

Плотность сухой почвы (объемная масса) часто используется в оценке ее агрофизического состояния и определяется по формуле

$$\rho_d = \frac{m_{\text{СК}}}{V} = \frac{m_{\text{СК}}}{V_{\text{СК}} + V_{\text{П}}}. \quad (2.4)$$

Для плотности сухой почвы так же используют формулу

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01w}, \quad (2.5)$$

где w – влажность почвы, %.

Для различных культур и почв значения оптимальной плотности сухой почвы (объемной массы), необходимые для сохранения ее плодородия, приводятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Оптимальная плотность почв для сельскохозяйственных культур

Сельскохозяйственные культуры и тип почвы	Оптимальная плотность, г/см ³
1	2
<i>Кукуруза</i>	
Дерново-подзолистая	1,10–1,45
Супесчаная	1,2
Дерново-карбонатная, пылевато-суглинистая	1,2–1,3
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая	1,1–1,2
Дерново-подзолистая, пылевато-суглинистая	1,1–1,2
<i>Ячмень</i>	
Дерново-подзолистая легкосуглинистая	1,25–1,30
Дерновато-подзолистая глееватая, суглинистая	1,25–1,30
Дерново-подзолистая супесчаная	1,3
Дерново-глеевая суглинистая	1,1–1,2
Дерново-карбонатная щебенчатая, суглинистая	1,0–1,2
Чернозем южный карбонатный	1,1–1,2

1	2
<i>Подсолнечник</i> Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая Дерново-подзолистая, пылевато-суглинистая Обыкновенный тяжелосуглинистый чернозем	1,0–1,1 1,05–1,20 1,2–1,3
<i>Сахарная свекла</i> Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, суглинистая Дерново-подзолистая, пылевато-суглинистая Дерново-карбонатная, пылевато-суглинистая Тяжелосуглинистый выщелочный чернозем	1,2–1,4 1,25–1,35 1,3 1,2
<i>Картофель</i> Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, суглинистая Среднесуглинистая и тяжелосуглинистая Тяжелые и среднесуглинистые черноземы	1,0–1,1 1,0–1,2 0,9–1,1
<i>Овес</i> Дерново-подзолистая легкосуглинистая	1,25–1,30
<i>Лен</i> Дерново-подзолистая легкосуглинистая	1,20–1,35
<i>Пшеница</i> Дерново-подзолистая легкосуглинистая Дерново-подзолистая глееватая, легкосуглинистая Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая	1,15–1,25 1,1–1,3 1,1–1,3
<i>Горох</i> Дерново-подзолистая легкосуглинистая Дерново-подзолистая глееватая, легкосуглинистая	1,15–1,25 1,1
<i>Озимая рожь</i> Дерново-подзолистая среднесуглинистая Дерново-подзолистая легкосуглинистая Выщелоченный легкосуглинистый чернозем Выщелоченный тяжелосуглинистый чернозем	1,2–1,4 1,2–1,3 1,3–1,5 1,2–1,3
<i>Кормовые бобы</i> Дерново-подзолистая супесчаная Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, суглинистая	1,2–1,3 1,1–1,4

1	2
Дерново-подзолистая легкосуглинистая	1,15–1,30
Пылевато-суглинистая	1,2
Дерново-подзолистая глееватая, легкосуглинистая	1,10–1,15 1,25–1,30
Дерново-глеевая суглинистая	1,2
Выщелочный тяжелосуглинистый чернозем	1,1–1,3

Пористость почвы

Пористость почвы играет одну из основных ролей в жизнедеятельности микроорганизмов и растений и характеризуется коэффициентом пористости

$$e = \frac{V_{\Pi}}{V_{\text{СК}}}. \quad (2.6)$$

Общую порозность почв можно выразить через плотность твердых частиц ρ_s и плотность скелета почвы ρ_d :

$$e_o = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} 100 \%. \quad (2.7)$$

Влажность

Для оценки влажности почвы обычно выбирается весовая или объемная влажность.

Весовая влажность определяется как отношение массы воды в почве $m_{\text{В}}$ к массе сухой почвы $m_{\text{СК}}$ и выражается в процентах:

$$w = \frac{m_{\text{В}}}{m_{\text{СК}}} 100 \%. \quad (2.8)$$

Объемная влажность определяется как отношение объема воды $V_{\text{В}}$, заключенной в почве, к объему всей почвы V :

$$w_r = \frac{V_{\text{В}}}{V} 100 \%. \quad (2.9)$$

Для быстрого определения влажности почвы применяется экспресс-метод сушки инфракрасными лучами, для чего используется

прибор модели С62М (рис. 2.1). Он состоит из следующих составных частей: станины 1, в которой располагается реле времени 2, и электродвигателя для вращения стола 3 (на 3 чашечки). К станине 1 крепится стойка 4, предназначенная для присоединения кожуха 5. Имеется патрон, в который устанавливается термоизлучающая инфракрасная лампа 6 (308–500 Вт). Для охлаждения цоколя лампы, параболического зеркала лампы и отвода выпаренной влаги в верхней части кожуха 5 предусмотрены окна.

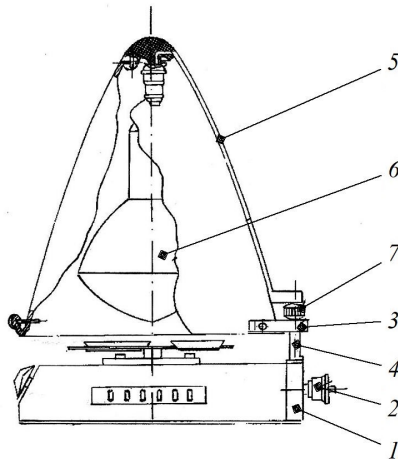


Рис. 2.1. Схема прибора для определения влажности почвы (экспресс-метод):
1 – станина; 2 – реле времени; 3 – стол; 4 – стойка; 5 – кожух;
6 – лампа инфракрасная; 7 – гайка

Прибор в сеть включается штепсельной вилкой, и рукоятка реле времени устанавливается на заданное время. Рукояткой-указателем реле времени можно пользоваться и как выключателем, при этом ее нужно поворачивать против хода часовой стрелки. Расстояние между нижней плоскостью инфракрасной лампы и почвенными образцами регулируется подъемом или опусканием кожуха 5 путем вращения гайки 7.

Весовую влажность в лабораторных условиях определяют следующим образом.

Взвешиванием определяют массу m_1 трех пустых тарелочек. Затем помещают на тарелочки порции испытуемой почвы одинаковой

массы, причем на каждую тарелочку – не менее 10 г. Определяют массу m_2 тарелочки с почвой. После взвешивания помещают тарелочку с почвой на стол 3 прибора. Включают прибор, и рукоятку-реле времени устанавливают на 3 мин, поворачивая ее по ходу часовой стрелки. По истечении трех минут прибор выключается автоматически. Чашечки с почвой снимают с прибора и взвешивают. Операцию высушивания почвы повторяют до получения постоянной массы m_3 . Затем определяют влажность почвы по формуле

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} 100 \%. \quad (2.10)$$

Для определения влажности почвы существуют и другие методы. Наиболее распространенным является опыт, связанный с высушиванием почвы, помещенной в бюкс (стакан), в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы.

Воздухопроницаемость почвы при механическом уплотнении

Для аэробных процессов в почве необходим воздух, содержание которого в ней подвержено сильным колебаниям. О достаточном или недостаточном режиме воздухообмена в почве можно судить по воздухопроницаемости (скорость проникновения воздуха в почвенную толщу).

Воздухопроницаемость может быть определена методом пропускания воздуха через стандартный цилиндрический почвенный образец с многократным предварительным уплотнением.

Воздухопроницаемость ($\text{м}^4/\text{Н}\cdot\text{с}$) определяется по формуле

$$\text{ВП} = \frac{V_{\text{обр}} h_{\text{обр}}}{F_{\text{обр}} p_{\text{в}} t}, \quad (2.11)$$

где $V_{\text{обр}}$ – объем воздуха, прошедшего через образец, м^3 ;

$h_{\text{обр}}$ – высота образца, м;

$F_{\text{обр}}$ – площадь поперечного сечения образца, м^2 ;

$p_{\text{в}}$ – давление воздуха перед образцом, $\text{Н}/\text{м}^2$;

t – время прохождения воздуха через образец, с.

Значения воздухопроницаемости в лабораторных условиях удобно определять на приборе модели О42 М (рис. 2.2). Данный прибор

состоит из следующих составных частей: станины 13, бака 5 с трубкой 6, внутри которого находится колокол с трубкой 4. При опускании колокола в бак трубка 4 входит в трубку 6. До начала испытания в бак 5 наливают воду и в нее опускают колокол 3. Воздух из-под колокола под действием груза 2 выходит через трубку 6 и трехходовой кран 7, позволяющий: удерживать воздух под колоколом; выпускать воздух из-под колокола; выпускать воздух из-под колокола через почвенный образец. В чашку 8 устанавливают ниппели 9 с отверстиями диаметром 0,5 или 1,5 мм. Первый ниппель используют при испытании почв с воздухопроницаемостью до $50 \text{ м}^4/\text{Н}\cdot\text{с}$, второй – при испытании почв с высокой воздухопроницаемостью. Для установки бюксы 10 имеется место в чашке 8, которая через отверстие 11 соединяется с манометром 12.

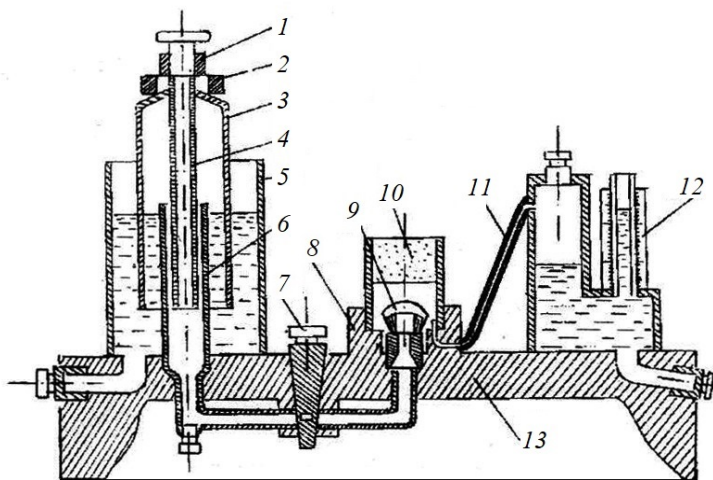


Рис. 2.2. Схема прибора для определения значений воздухопроницаемости почвы

Сжимаемость почвы

Характеристики почв, необходимые для расчета деформаций пахотного (подпахотного) слоя, определяют лабораторными и полевыми методами. В лабораториях для этой цели используют компрессионные приборы (рис. 2.3). Сжимаемость почвы зависит от ее состава, пористости, влажности, структуры и т. д.

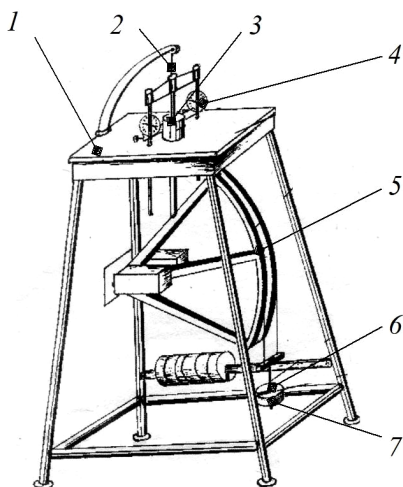


Рис. 2.3. Компрессионный прибор:
 1 – стол металлический; 2 – поршень; 3 – кольцо почвоотборное;
 4 – подвеска; 5 – индикатор; 6 – рычаг; 7 – гиря

В результате испытания почв на компрессионных приборах определяют коэффициент уплотнения α и модуль деформации E_n , которые используют в расчетах агротехнической проходимости и для общей качественной оценки свойств почвы.

Подготовка прибора:

1. Кольцо 3 с почвой накрывают с двух сторон фильтрованной бумагой и устанавливают на перфорированный металлический диск режущей частью вверх (рис. 2.3).

2. Закрепляют почвоотборочное кольцо 3 направляющим кольцом и на почву ставят поршень 2 (штамп).

3. Всю систему одометра помещают на металлический стол 1 компрессионного прибора.

4. Для замера деформаций образца почвы устанавливают два индикатора 5. Стрелки индикаторов ставят в положение 0,00.

Проведение испытаний

Испытания проводят путем нагружения образца почвы нагрузкой, которая передается посредством рычага 6 на поршень 2 прибора (рис. 2.3). Для этого на держатель-подвеску 4 для гири 7 устанавливают грузы. Сжимающее давление p (МПа) на образец почвы определяется по формуле

$$p_{\text{поч}} = \frac{M_{\text{гр}} n' + m'}{10F_{\text{обр}}}, \quad (2.12)$$

где $M_{\text{гр}}$ – масса груза, кг;

n' – кратность увеличения нагрузки рычагом ($n' = 10$);

m' – масса тяговой рамы прибора, кг, (величина постоянная: 2,3 кг);

10 – переводной коэффициент.

Если задается давление $p_{\text{поч}}$ на почву, то из формулы (2.12) определяется масса груза:

$$M_{\text{гр}} = \frac{10p_{\text{поч}}F_{\text{обр}} - m'}{n'}. \quad (2.13)$$

Так, для получения в приборе давления $p_{\text{поч}} = 0,05$ МПа на подвеску рычага нужно установить груз, имеющий массу:

$$M_{\text{гр}} = \frac{10 \cdot 0,05F_{\text{обр}} - 2,3}{10}. \quad (2.14)$$

Вычисляют коэффициент сжимаемости (уплотнения) почвы. Коэффициент сжимаемости почвы $a_{\text{сж}}$ (МПа⁻¹) равен отношению приращения коэффициента пористости почвы к приращению давления:

$$a_{\text{сж}} = \frac{e_{\text{н}} - e_{\text{к}}}{p_{\text{к}} - p_{\text{н}}}, \quad (2.15)$$

где $e_{\text{н}}$ и $e_{\text{к}}$ – начальный и конечный коэффициент пористости (определяют из данных графика компрессионной кривой по $p_{\text{н}}$ и $p_{\text{к}}$);

$p_{\text{к}}$ и $p_{\text{н}}$ – конечное и начальное давление на почву, МПа.

По величине коэффициента сжимаемости почвы разделяют:

а) на сильно сжимаемые, если $a > 0,5$ МПа⁻¹ ($a = 0,05$ см²/кгс); такие почвы требуют предварительного уплотнения и закрепления;

б) средне сжимаемые, если $0,5 > a > 0,05$ МПа⁻¹;

в) мало сжимаемые, если $a < 0,05$ МПа⁻¹ ($a < 0,05$ см²/кгс).

Модуль деформации $E_{\text{н}}$ (МПа) вычисляют по формуле

$$E_{\text{н}} = \frac{1 + e_{\text{н}}}{a} \beta, \quad (2.16)$$

где e_n – начальный коэффициент пористости почвы;

β – коэффициент, который согласно ГОСТ 23908–79 принимает значение: для пылеватых и мелких песков – 0,8; супесей – 0,7; суглинков – 0,5; глин – 0,4.

Модуль деформации, в отличие от модуля упругости, учитывает не только упругие, но и остаточные деформации почвы.

Модуль деформации с учетом коэффициента сжимаемости можно определить по формуле

$$E_n = \frac{(1 + e_n)(P_k - P_n)}{e_n - e_k} \beta. \quad (2.17)$$

Испытание почв на сдвиг

Для измерения величины сдвига почвы применяются несколько приборов, наиболее известные из них прибор Литвинова и прибор ПСГ-3М РЭ.

Под сдвигом почвы понимают смещение одной части ее по отношению к другой в результате бокового (тангенциального) давления.

Сопротивление сдвигающим (касательным) усилиям складывается из сил сцепления и сил внутреннего трения. Напряжение сдвигающихся усилий, превышающих сопротивление сдвигу, вызывает скольжение по плоскости среза, которому противодействует трение.

Силы сцепления не зависят от нормальной нагрузки, тогда как трение в известной мере пропорционально ей.

Тангенциальное усилие τ при перемещении одного пласта почвы по отношению к другому, нормальное давление σ и сцепление c частиц связаны уравнением

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.18)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – угловой коэффициент (коэффициент внутреннего трения).

2.2. Реологические модели деформации почвы

Во многих задачах механики грунтов [93] и почв [103] в оценке деформирования почвогрунтов и деформаторов используют реологические модели.

Модель упругого тела

В сильно переуплотненных почвах, особенно в подпахотном слое, связь между напряжениями σ и деформациями ε можно приближено считать линейной и выразить ее в виде закона Гука.

В одномерном случае закон Гука имеет вид:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.19)$$

где E – модуль упругости, Па.

Графическая и механическая интерпретация формулы (2.19) показана на рис. 2.4, а, б.

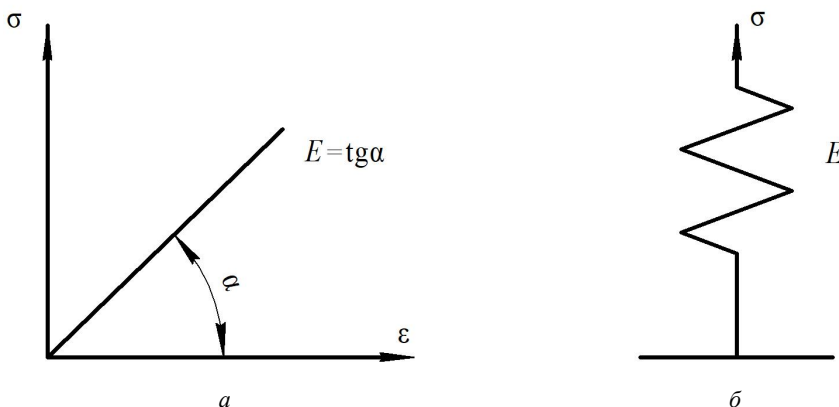


Рис. 2.4. Графическая (а) и механическая (б) интерпретация упругого тела

Модель пластичного тела

Под пластичностью понимают свойство тел необратимо изменять, не разрушаясь, свою форму под действием внешних сил. Пластичное состояние обычно наступает тогда, когда максимальное касательное напряжение τ_{\max} достигает некоторого определенного значения τ_* , называемого пределом текучести на сдвиг.

Диаграмма идеально-пластической среды (тело Сен-Венана) приведена на рис. 2.5, а; механический элемент, характеризующий пластические свойства тела, – на рис. 2.5, б.

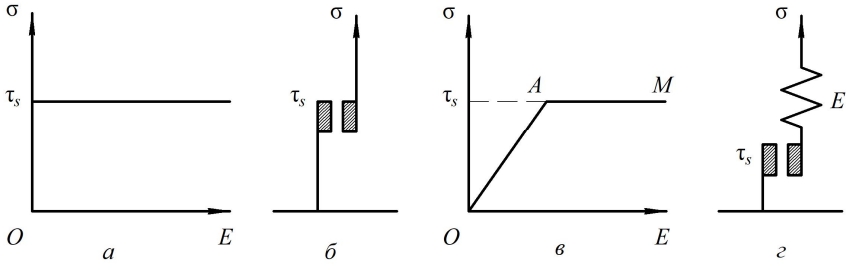


Рис. 2.5. Графическая (а, в) и механическая (б, г) интерпретация пластичного тела

Природа пластических деформаций связана с явлением сдвига, поэтому построение теорий пластичности основывается на сравнении касательных напряжений с предельными напряжениями, обуславливающими явление текучести. Условие пластичности Треска–Сен-Венана определяет переход из упругого состояния в пластическое в окрестности точки в тот момент, когда максимальное касательное напряжение в этой точке достигает некоторого постоянного значения, характерного для данного материала:

$$\tau_{\max} = \sigma_T / 2, \quad (2.20)$$

или

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T, \quad (2.21)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения, Па;
 σ_T – напряжение, Па.

Условие пластичности Губера–Мизеса определяет переход из упругого состояния в пластическое в окрестности точки, когда:

$$\sigma_i = \sigma_T, \quad (2.22)$$

где σ_i – интенсивность нормальных напряжений, Па,

$$\sigma_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (2.23)$$

где σ_2 – главное напряжение, Па.

Зависимость между напряжением и деформацией для упруго-пластической среды изображена на рис. 2.5, в, г. При напряжениях ниже предела текучести $\sigma < \tau_s$, тело деформируется упруго по закону Гука (отрезок OA), при $\sigma = \tau_s$, тело деформируется пластически (отрезок AM). Среда, подчиняющаяся такому закону деформирования, называется упруго-пластическим телом Прандтля.

Модель упруговязкого тела

Свойство вязкости почвы трактуется аналогично свойству вязкой жидкости, которая характеризуется прямой пропорциональностью между напряжениями и скоростью деформации. В одновременном случае имеем:

$$\sigma = \mu_v \dot{\epsilon}, \quad (2.24)$$

где μ_v – коэффициент вязкости, Н·с/м³;

$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ – скорость, м/с, t – время, с.

Модель (2.24) жидкости представляется поршнем с отверстиями, который движется в цилиндре с жидкостью, обладающей постоянной вязкостью (внутримолекулярным трением). При движении поршня жидкость протекает через отверстие и создает сопротивление, которое растет пропорционально скорости движения (рис. 2.6). Поры в почвах частично или целиком заполнены, поэтому вязкость в моделях почв играет важную роль.

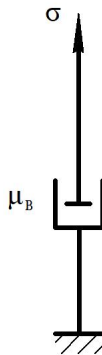


Рис. 2.6. Схема модели (2.24)

В теории пластичности, как и в теории упругости, при определении напряжений и деформаций фактор времени не учитывается. Поэтому напряженное и деформированное состояние тела, находящегося под действием постоянной внешней нагрузки, не изменяется со временем. Однако все реальные тела обладают свойством длительного деформирования (ползучестью). Это означает, что связь между напряжениями и деформациями зависит от скорости приложения и длительности действия нагрузки. Ползучесть – одно из основных свойств реальных тел. При ползучести происходит деформирование как объема, так и формы тела. Здесь следует отметить, что если деформация формы у всех материалов выражена довольно четко, то деформация объемного сжатия у одних материалов существенна (грунты, почвы и другие пористые материалы), а у других – пренебрежимо мала (металлы).

Таким образом, ползучесть означает изменение во времени напряжений и деформаций. Изменение деформаций во времени называют последствием, изменение напряжений – релаксацией.

Пусть почвенный образец нагружен за очень короткое время до напряжения σ_0 . При этом деформация образца примет значение ε_0 . Если приложенная нагрузка сохраняется постоянной, то деформация образца будет увеличиваться со временем. К концу испытания дополнительная деформация будет равна ε^* , полная деформация образца будет равна $\varepsilon_0 + \varepsilon^*$. После мгновенного снятия нагрузки упругая деформация исчезает, а деформация последствия остается. Если ε^* – упругая деформация, то при разгрузке остаточная деформация образца будет стремиться к нулю (рис. 2.7).

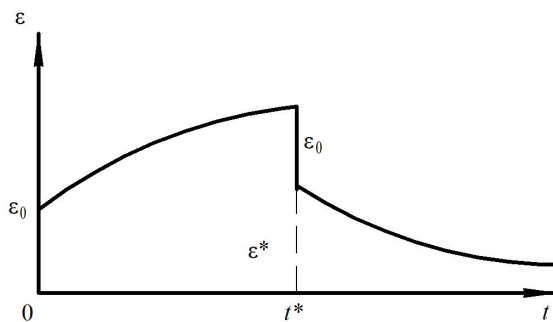


Рис. 2.7. График зависимости деформации от времени

Если начальная деформация ϵ_0 была упругопластической, то после разгрузки исчезает только упругая σ/E часть. Остаточную деформацию образца будет составлять ϵ^* .

Релаксация напряжений почвенных образцов обусловлена перераспределением во времени упругих ϵ^e и ползучих ϵ^t деформаций.

Если полная деформация не меняется, то

$$\epsilon_0 = \epsilon^e + \epsilon^t = \text{const}, \quad (2.25)$$

то есть

$$\frac{\sigma_0}{E} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon^t = \text{const}. \quad (2.26)$$

Из формулы (2.26) следует, что если в процессе ползучести ϵ^t растет, то σ уменьшается.

Комбинируя рассмотренные простые модели (2.19), (2.23), (2.26), можно вводить в рассмотрение различные сложные среды. Рассмотрим некоторые из них.

Модель Кельвина–Фойхта. В ней пружина и поршень связаны параллельно (рис. 2.8).

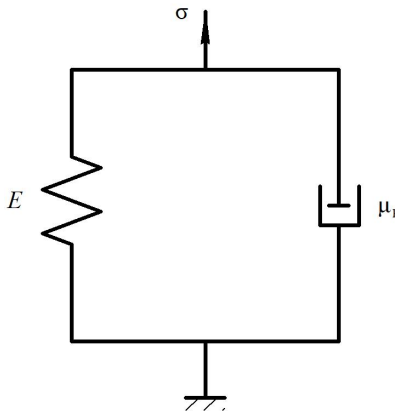


Рис. 2.8. Модель Кельвина–Фойхта

Зависимость между напряжением и деформацией имеет вид:

$$\sigma = E\epsilon + \mu_v \dot{\epsilon}. \quad (2.27)$$

Упруговязкая среда в состоянии покоя $\dot{\epsilon} = 0$ ведет себя как упругая. Напряжение в почве растет вместе с увеличением скорости деформации. Если же тело нагрузить постоянным напряжением $\sigma = \text{const} = \sigma_0$, при $t \geq 0$, то из формулы (2.27) имеем:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\mu_b} t} \right), \quad (2.28)$$

т. е. деформация постепенно нарастает, стремясь к значению σ_0/E .

Примером тела Кельвина–Фойхта является упругая пористая среда, поры которой заполнены вязкой жидкостью.

Модель Максвелла. Пружина и поршень в ней соединены последовательно (рис. 2.9).

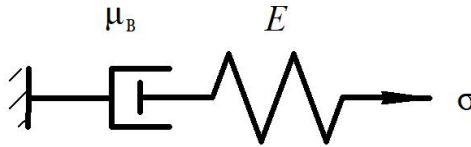


Рис. 2.9. Модель Максвелла

Закон деформирования записывается в виде:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{\sigma}{\mu_b}. \quad (2.29)$$

Если напряжение $\sigma = \text{const}$, то почва деформируется с постоянной скоростью. В случае зафиксированной деформации $\epsilon = \text{const}$ имеем:

$$\frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{\sigma}{\mu_b} = 0. \quad (2.30)$$

Откуда:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/T_p}, \quad (2.31)$$

где σ_0 – начальное напряжение;

$T_p = \mu_b/E$ – время (период) релаксации.

Из соотношения (2.31) видно, что напряжение уменьшается со временем, по экспоненциальному закону стремясь к нулю (рис. 2.10).

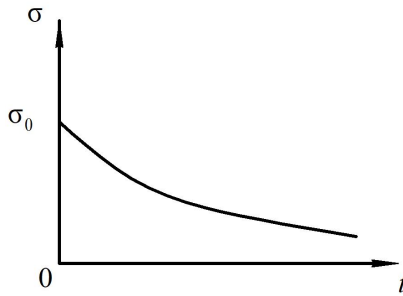


Рис. 2.10. График зависимости напряжения от времени

Модель вязкопластического тела

Вязкопластические свойства тел моделируются составлением вязких и пластических элементов. Параллельное соединение элементов, вязких и пластических, показано на рис. 2.11.

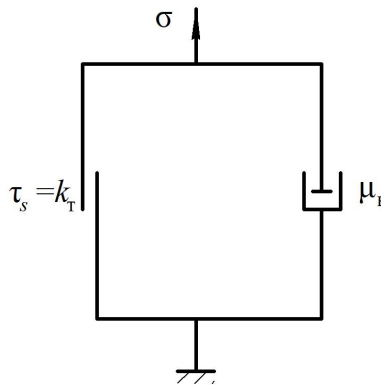


Рис. 2.11. Схема параллельного соединения вязких и пластических элементов

Закон деформации имеет вид:

$$\sigma = k_r + \mu \frac{d\varepsilon}{dt}, \text{ при } \sigma \geq k_r, \quad (2.32)$$

где k_r – предел текучести.

Если $\sigma < k_T$, то тело не деформируется. Рассмотренная среда обычно называется телом Бингама.

Рассмотрим среду, которую часто называют обобщенным телом Бингама (рис. 2.12).

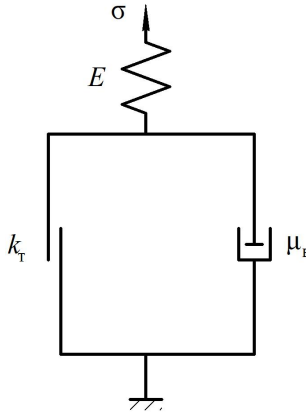


Рис. 2.12. Схема модели Бингама

Уравнения состояния среды записываются в виде:

$$\begin{aligned} \sigma &= E_{\text{п}} \varepsilon^e, & \text{при } \sigma < k_T; \\ \sigma &= k_T + \mu_B \dot{\varepsilon}^p, & \text{при } \sigma > k_T, \end{aligned} \quad (2.33)$$

где ε^e – упругая деформация;
 ε^p – пластическая деформация.

Очевидно, что полная деформация будет равна:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p. \quad (2.34)$$

Если $\sigma < k_T$, то тело деформируется только упруго. При $\sigma > k_T$ тело деформируется с постоянной скоростью при постоянной пластической вязкости.

Модель ползуче-пластической среды

При последовательном соединении двух элементов – вязкого и пластического – среда ведет себя как ползуче-пластическое тело (рис. 2.13).

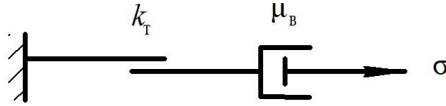


Рис. 2.13. Схема ползуче-пластического тела

Если $\sigma < k_T$, то среда ведет себя как вязкая жидкость, следующая закону вязкости Ньютона: $\dot{\epsilon} = \mu_B^{-1} d\epsilon/dt$. Если $\sigma = k_T$, то среда течет подобно идеально пластическому телу.

Модель тела Шведова

Реологическая модель тела Шведова показана на рис. 2.14.

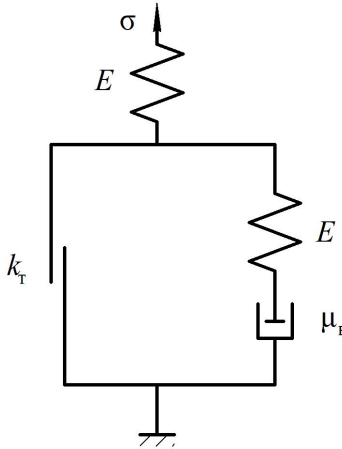


Рис. 2.14. Схема модели тела Шведова

Уравнение состояния рассчитывается следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma - k_T}{\mu_B} + \frac{\dot{\epsilon}}{E_0} + \frac{\dot{\epsilon}}{E_1} = \frac{\sigma - k_T}{\mu_B} + \dot{\epsilon} \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \right), \quad (2.35)$$

где $(\sigma - k_T) / \mu_B$ – скорость вязкого течения;
 $\dot{\epsilon} / E$ – скорость упругой деформации.

При $\sigma = \text{const}$ формула (2.35) переходит в формулу (2.33). Так как (2.33) есть частный случай (2.35), то тело Бингама часто также

называют телом Бингама–Шведова, закон релаксации которого имеет следующий вид:

$$\sigma = k_{\tau} + (\sigma - k_{\tau}) e^{-t/T_p}. \quad (2.36)$$

Если $k_{\tau} = 0$, то уравнение (2.35) переходит в (2.33), формула (2.36) переходит в формулу (2.31) т. е. тело Шведова переходит в тело Максвелла.

2.3. Построение моделей устойчивости агроэкосистемы

В настоящее время в связи с изменением климата все больше появляется научных работ по определению устойчивости различных биоценозов, в том числе и агроценозов. Решение данного вопроса строится на теоретических и практических знаниях, связанных с созданием математических моделей и непосредственным наблюдением за агросистемами при антропогенном воздействии.

Агроэкосистемы представляют собой искусственное преобразование ландшафтов, которые допускают только частичную саморегуляцию фитоценоза, биоценоза и микроценоза. Поэтому в агросистеме могут быть нарушения трофических и других связей, что ведет к потере устойчивого состояния агросистемы. Центральным звеном, от которого во многом зависит равновесие агроэкосистемы, является почва. В течение многих десятилетий ведутся работы по оценке критического механического воздействия на почву со стороны сельскохозяйственной техники, однако нерешенных вопросов остается много. Рассмотрим аналитический подход, связанный с оценкой устойчивого равновесия агроэкосистемы.

Так как почва является ядром агросистемы, то практически она принимает все антропогенные воздействия: механо-физические, химические, климатические, наложенные на агроэкосистему. Поэтому изменение свойств почв ведет к изменению жизни биоценоза, его разновидности и популяции, к снижению урожая и т. п. Приблизительно можно считать, что устойчивость агросистемы зависит от способности почвы сохранять структурные свойства, выполняя функции по плодородию, сохранению биоценоза в условиях антропогенного воздействия. Можно сказать, что устойчивое равновесие

поля, которое заключается в сохранении плодородных свойств почвы, обеспечивает устойчивое равновесие агроэкосистемы.

Для математического описания равновесного состояния агроэкосистемы будем использовать систему линейных дифференциальных уравнений, которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{y} + B\bar{x}, \quad (2.37)$$

где A , \bar{y} , B , \bar{x} – матрицы вида:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix}; \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad A = [a_{ij}]; \quad B = [b_{ij}]; \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n).$$

Схема управления агроэкосистемой, соответствующая уравнению (2.37), представлена на рис. 2.15, где x_m – входные потоки энергии (внешнее воздействие на агроэкосистему), например, воздействие сельскохозяйственной техники на почву; y_n – выходные потоки, учитывающие влияние входного потока антропогенных воздействий, изменяющие физико-механические свойства почвы, фитоценоз (плотность, пористость, урожайность и пр.). Коэффициенты a_{ij} и b_{ij} представляют стационарные потоки, связанные с входными и выходными процессами агроэкосистемы, например, с их сезонной частотой.

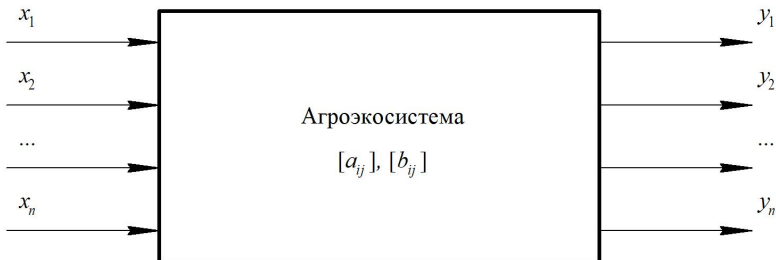


Рис. 2.15. Схема управления агроэкосистемой

Математическая модель (2.37) имеет признаки компартментальной модели экосистемы, целью исследований которой является

$$\begin{cases} \mathcal{Y}_{1n} = a_{11} \mathcal{Y}_{1n} + a_{12} \mathcal{Y}_{2n} + \mathbf{K} + a_{1n} \mathcal{Y}_{nn} + b_{11} x_{1n} + b_{12} x_{2n} + \mathbf{K} + b_{1m} x_{mn}; \\ \mathcal{Y}_{2n} = a_{21} \mathcal{Y}_{1n} + a_{22} \mathcal{Y}_{2n} + \mathbf{K} + a_{2n} \mathcal{Y}_{nn} + b_{21} x_{1n} + b_{22} x_{2n} + \mathbf{K} + b_{2m} x_{mn}; \\ \dots \\ \mathcal{Y}_{nn} = a_{n1} \mathcal{Y}_{1n} + a_{n2} \mathcal{Y}_{2n} + \mathbf{K} + a_{nn} \mathcal{Y}_{nn} + b_{n1} x_{1n} + b_{n2} x_{2n} + \mathbf{K} + b_{nm} x_{mn}. \end{cases} \quad (2.42)$$

Предположим, что:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_j(t) &= y_{jn}(t) + z_j(t); \\ \mathcal{Y}_j(t) &= \mathcal{Y}_{jn}(t) + \mathcal{Z}_j(t), \end{aligned} \quad (2.43)$$

где $z_j(t)$ – некоторая функция, учитывающая отклонение параметров почвы в сторону агротехнического повреждения по сравнению с номинальной.

Система уравнений (2.42) с учетом формулы (2.43) примет вид:

$$\begin{cases} \mathcal{Y}_{1n} + \mathcal{Z}_1 = a_{11}(y_{1n} + z_1) + \mathbf{K} + a_{1n}(y_{nn} + z_n) + \mathbf{K} + b_{1m} x_{mn}; \\ \dots \\ \mathcal{Y}_{nn} + \mathcal{Z}_n = a_{n1}(y_{n1} + z_n) + \mathbf{K} + a_{nn}(y_{nn} + z_n) + \mathbf{K} + b_{nm} x_{mn}. \end{cases} \quad (2.44)$$

Из уравнений (2.44) вычтем уравнение (2.40) и получим систему уравнений для отклонений, влияющих на агротехническую повреждаемость:

$$\begin{cases} \mathcal{Z}_1(t) = a_{11} z_1 + a_{12} z_2 + \mathbf{K} + a_{1n} z_n; \\ \dots \\ \mathcal{Z}_n(t) = a_{n1} z_1 + a_{n2} z_2 + \mathbf{K} + a_{nn} z_n, \end{cases} \quad (2.45)$$

или в векторной форме:

$$\mathcal{Z}(t) = A\bar{z}.$$

Таким образом, об устойчивости равновесия агроэкосистемы можно судить по решению системы (2.45):

$$z_j(t) = \sum_{j=1}^n c_j e^{\lambda_j t}, \quad (j=1, 2, \mathbf{K}, n), \quad (2.46)$$

где c_j – постоянные, зависящие от начальных условий;

λ_j – корни характеристического уравнения, которое определяется из определителя:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \mathbf{K} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \mathbf{K} & a_{2n} \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ a_{n2} & a_{n2} & \mathbf{K} & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix}. \quad (2.47)$$

Если в определителе (2.47) вещественная часть корней $\text{Re } \lambda_j < 0$, то система (2.46) асимптотически устойчива.

Предположим, что агроэкосистема управляется одним входным потоком x_1 и двумя выходными потоками $y_1(t)$ и $y_2(t)$, и до отклоненных начальных условий поведение агроэкосистемы описывается уравнением

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + b_{11}x_1; \\ \dot{y}_2 = a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + b_{21}x_1. \end{cases} \quad (2.48)$$

Пусть x_1 выражает входной поток внешней механической энергии на почву, y_1 и y_2 – выходные энергетические потоки, a_{ij} и b_{ij} ($i, j = 1, 2$) выражают сезонную частоту этих потоков. Примем $a_{11} = -2$; $a_{12} = 5$; $b_{11} = 6$; $a_{21} = 3$; $a_{22} = -9$; $b_{21} = 4$. Тогда систему (2.48) запишем в виде:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -2y_1 + 5y_2 + 6x_1; \\ \dot{y}_2 = 3y_1 - 9y_2 + 4x_1. \end{cases} \quad (2.49)$$

В случае задания начальных возмущений агротехнического повреждения почве (формула (2.41)), согласно рассуждениям (2.42), (2.43), (2.44), придем к уравнению отклонений агроэкосистемы от равновесного состояния:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -2z_1 + 5z_2; \\ \dot{z}_2 = 3z_1 - 9z_2. \end{cases} \quad (2.50)$$

Для оценки устойчивости данной системы составим определитель:

$$\begin{vmatrix} -(2+\lambda) & 5 \\ 3 & -(9+\lambda) \end{vmatrix} = 0,$$

или

$$\lambda^2 + 11\lambda + 3 = 0, \quad (2.51)$$

где $\lambda_{1,2}$ – корни характеристического уравнения.

Согласно критерию Гурвица, системы (2.49) и (2.50) устойчивы, так как все коэффициенты в формуле (2.51) положительны.

Если в системе уравнений (2.49) принять $a_{11} = 1$, $a_{12} = 2$, $a_{21} = 4$, $a_{22} = 3$, то характеристическое уравнение примет вид:

$$\lambda^2 - 4\lambda - 5 = 0, \quad (2.52)$$

корни которого $\lambda_1 = 5 > 0$ и $\lambda_2 = -1 < 0$, следовательно, система неустойчива, так как для устойчивости системы все вещественные корни должны быть отрицательными.

В данной главе: 1) рассмотрены физико-механические параметры почвы, которые могут быть использованы в оценке ее физического состояния до и после антропогенного воздействия, представлены реологические модели для задач контактного взаимодействия с сельскохозяйственными деформаторами и климатическими условиями; 2) обсужден математический подход по оценке устойчивого (неустойчивого) равновесия агроэкосистемы, в которой могут учитываться входные и выходные энергетические потоки, связанные с внутренними процессами изменения энтропии, свойств почв, урожая, почвенной обработки и т. д.

3. ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЧАТО-ПРУТКОВЫХ КАТКОВ И СФЕРИЧЕСКИХ ДИСКОВ

3.1. Обоснование конструктивных параметров уплотняющих элементов кольчато-прутковых катков

Кольчато-прутковый рабочий орган, как разновидность кольчато-шпорового, состоит из диска, на котором вдоль кромки закреплены уплотняющие элементы (рис. 3.1) [32, 33, 63]. При внедрении катка в почву кромка диска разрушает крупные глыбы. Уплотняющие элементы кольчато-пруткового катка оказывают основное воздействие на почву, поэтому необходимо обосновать выбор их формы и геометрические параметры с учетом требуемого качества обработки почвы. Для сравнения примем уплотняющий элемент прямоугольного, треугольного и круглого сечения.



Рис. 3.1. Конструкция кольчато-пруткового почвообрабатывающего рабочего органа

Рассмотрим рабочий процесс уплотняющих элементов. При внедрении уплотняющего элемента прямоугольного сечения (шпоры) в почву (рис. 3.2, *a*) под ним образуется почвенный клин высотой $h_{кл}$, вдоль сторон которого происходит движение частиц почвы [13, 15, 90]. При схождении с поверхности клина, в зависимости от глубины погружения штампа, частицы вдавливаются в стенки проresi либо выталкиваются вверх. По определению Ю.А. Ветрова, критическая глубина резания $h_{кр}$ для землеройных машин с углом резания 35° – 45° равна $(2,5-4,0)b_{ш}$ [6, 7]. При резании почвогрунтов ниже критической глубины $h_1 > h_{кр}$ давления деформатора (ножа)

недостаточно для образования тел скольжения с движением вверх, и частицы почвогрунта сдвигаются и уплотняются в стенки прорези [6, 7]. Следовательно, для достижения максимального уплотнения необходимо заглубить штамп в почву на глубину, значения которой больше критических.

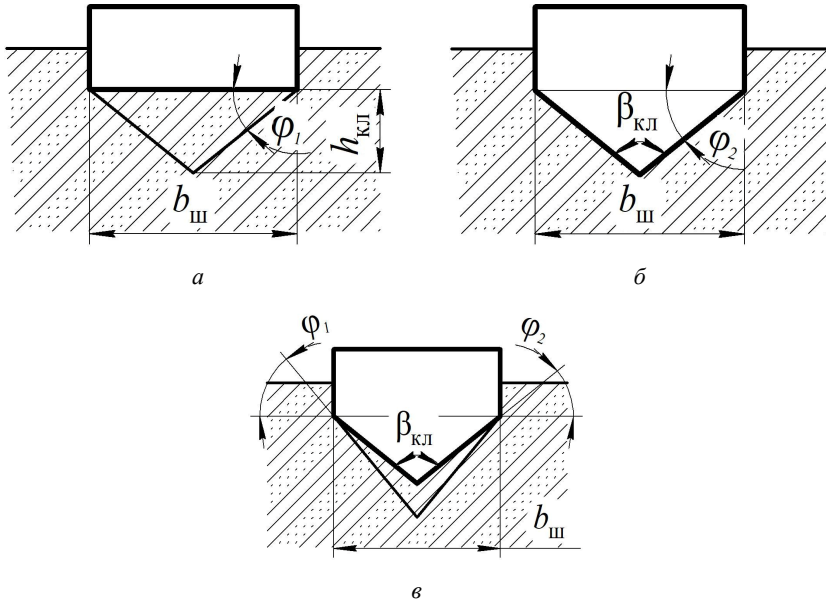


Рис. 3.2. Схемы внедрения в почву шпор прямоугольной (а) и треугольной (б, в) форм

Примем, что угол при основании клина равен углу внутреннего трения почвы φ_1 . Найдем высоту образующегося под его действием почвенного клина:

$$h_{\text{ккл}} = \frac{b_{\text{ш}}}{2} \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (3.1)$$

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

При внедрении штампа треугольного сечения (уголок) в почву (рис. 3.2, б) почвенный клин под штампом не будет образовываться, если угол при основании клина φ_1 будет больше угла трения

почвы о металл φ_2 . Из этого следует, что угол при вершине клина выбирается из условия:

$$\beta_{\text{кл}} \leq 180 - 2\varphi_2. \quad (3.2)$$

Если угол $\beta_{\text{кл}} > 180 - 2\varphi_2$, то на поверхности штампа образуется почвенный клин с углом при основании φ_1 (см. рис. 3.2, 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.

Глубина пересечения зон уплотнений соответствует глубине семенного ложа шпор прямоугольного сечения при внедрении в почву (рис. 3.3) и определяется по формуле

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

где l – расстояние между уплотняющими элементами, м,

или

$$l = \frac{2 \cdot h_1 - b_{\text{ш}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + b_{\text{ш}} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1}{\operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (3.3)$$

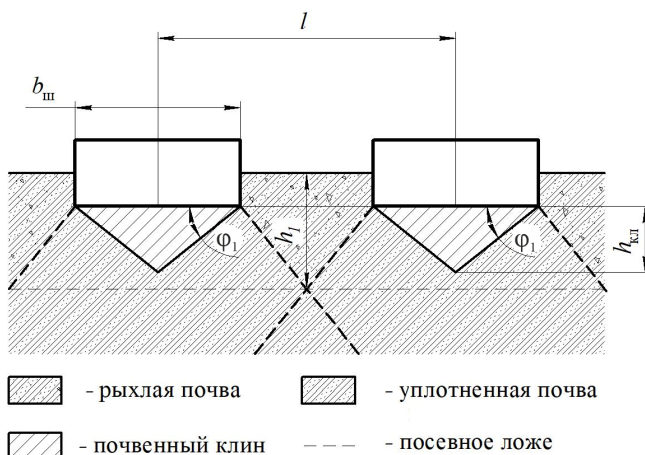


Рис. 3.3. Схема одновременного воздействия двух шпор на почву

Зная, что $f_{\text{тр. п1}} = \text{tg } \varphi_1$, после преобразований получим:

$$l = 2 \cdot h_1 f_{\text{тр. п1}} - b_{\text{ш}} (f_{\text{тр. п1}}^2 - 1).$$

Задавая h_1 , можно определить расстояние между шпорами.

Ширина шпору $b_{\text{ш}}$ для кольчато-шпоровых катков определяется из прочностных и технологических условий. Значения углов трения зависят от физико-механических свойств и состояния почвы (табл. 3.1).

Расстояние между шпорами треугольного сечения для случая, когда $\beta_{\text{кл}} > 180 - 2\varphi_2$, определяется по формуле (3.3). Для случая, когда $\beta_{\text{кл}} \leq 180 - 2\varphi_2$, расстояние между шпорами определяется по формуле

$$l = 2 \cdot h_1 \cdot \text{ctg} \left(\frac{\beta_{\text{кл}}}{2} \right) - b_{\text{ш}} \cdot \text{ctg}^2 \left(\frac{\beta_{\text{кл}}}{2} \right) + b_{\text{ш}}. \quad (3.4)$$

Таблица 3.1

Значения коэффициентов внутреннего ($f_{\text{тр. п1}}$) и внешнего ($f_{\text{тр. п2}}$) трения в зависимости от типа почвы [37, 67, 78, 84, 90]

Тип почвы	Содержание физической глины (частицы 0,01 мм), %	$f_{\text{тр. п1}}$	$f_{\text{тр. п2}}$	φ_2
Супесь	10–20	0,79–0,8	0,40–0,60	22°–31°
Суглинок легкий	20–30	0,69–0,76	0,35–0,50	19°–26°
Суглинок средний	30–40	1,0	0,35–0,50	19°–26°
Суглинок тяжелый	40–50	1,1	0,40–0,90	22°–42°
Глина легкая	50–65	1,2	0,40–0,90	22°–42°
Глина средняя	65–80	–	0,40–0,90	22°–42°
Торфяник	–	0,73	0,58–0,70	30°–35°

Примечание. Меньшие значения $f_{\text{тр. п2}}$ для всех типов почв, за исключением связных песчаных, соответствуют низкой, большие – высокой влажности почвы; большее значение $f_{\text{тр. п2}}$ у песчаных связных почв соответствует низкой влажности почвы.

При внедрении шпоры круглого сечения (прутка) в почву (рис. 3.4, *a*) клин будет формироваться на дуге AB , ограниченной центральным углом, равным $2\varphi_2$. Его высота определяется по формуле

$$h_{\text{кл}} = r_{\text{пр}} \sin \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b_{\text{шк}}}{2} \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (3.5)$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус прутка, м;

$b_{\text{шк}}$ – ширина основания почвенного клина, м.

На основании зависимости (3.5) можно определить, что на прутках уплотненное ядро формируется быстрее, так как основание почвенного клина меньше, что позволяет получить лучшие результаты по уплотнению и крошению почвы.

Согласно В.А. Желиговскому [18], толщину лезвия (ширину основания почвенного клина) находим по формуле

$$b_{\text{шк}} = 2r_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi_2.$$

Ширина основания почвенного клина зависит от радиуса его кривизны и фрикционных свойств уплотняемого материала [27].

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 (рис. 3.4, *б*).

Тогда:

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

или

$$l = \frac{2(h_1 - r_{\text{пр}} \cdot \cos \varphi_2 + r_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi_2 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1)}{\operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (3.6)$$

Зная, что $f_{\text{тр. п1}} = \operatorname{tg} \varphi_1$, после преобразований уравнения (3.6), получим:

$$l = 2h_1 f_{\text{тр. п1}} - d_{\text{пр}} (f_{\text{тр. п1}} \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2), \quad (3.7)$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр прутка, м.

Формула справедлива при условии $l > d_{\text{пр}}$, если условие не соблюдается, то каток будет гладкий.

Межпрутковое расстояние (рис. 3.4) найдем по формуле

$$l_{\text{мп}} = l - d_{\text{пр}}. \quad (3.8)$$

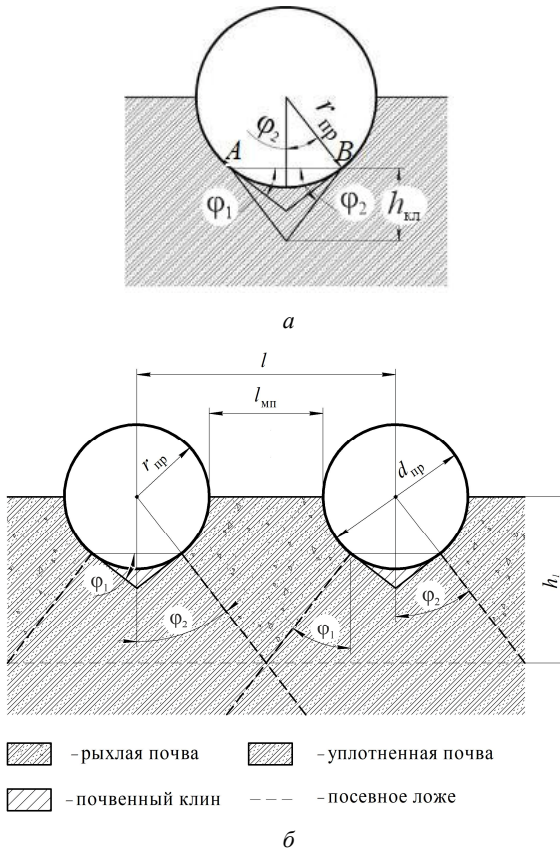


Рис. 3.4. Схемы внедрения прутков в почву:
 а – внедрение прутка в почву, б – взаимодействие прутков в почве

Межпрутковое расстояние должно быть не более 0,05 м, что соответствует допустимому агротребованиями размеру почвенных комков после прохода приставки [59].

На основании данных графика (рис. 3.5) можно сделать вывод, что для получения равномерного уплотненного слоя на глубине

0,04 м прутки диаметром свыше 0,04 м не подходят, и рациональный шаг прутков находится в пределах от 0,04 до 0,062 м.

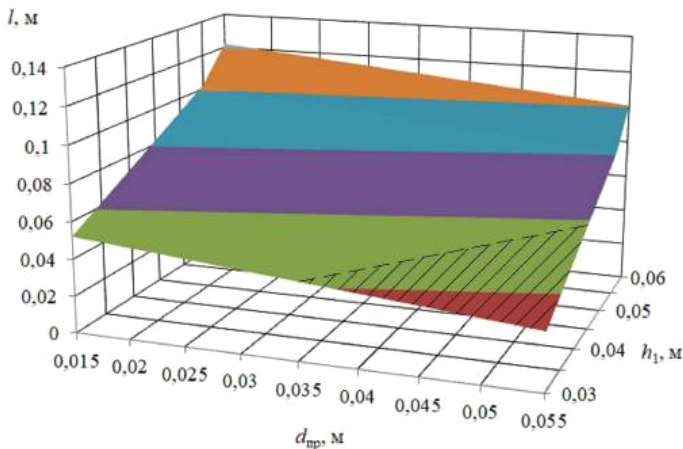


Рис. 3.5. Диаграмма зависимости шага между прутками от их диаметра и глубины перекрытия зон уплотнений

Для определения радиуса окружности $r_{уст}$, вдоль которой устанавливаются прутки, рассмотрим случай, когда в почву внедряется только один пруток, и глубина его погружения равна его радиусу (рис. 3.6).

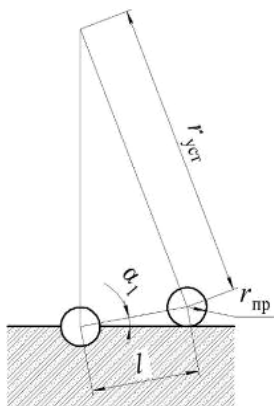


Рис. 3.6. Схема к определению расстояния между центром диска и центрами прутков кольчато-пруткового катка

Из данных рис. 3.6 определим расстояние между прутками:

$$l = \sqrt{2r_{\text{уст}}^2 - 2r_{\text{уст}}^2 \cos 2\alpha_1}, \quad (3.9)$$

где $r_{\text{уст}}$ – радиус окружности, на котором установлены прутки, м;
 α_1 – угол (рис. 3.6), град.

Зная, что $\cos 2\alpha_1 = 1 - 2\sin^2 \alpha_1$, после несложных преобразований уравнения (3.7), получим радиус окружности, на которой следует закреплять прутки относительно центра диска:

$$r_{\text{уст}} = \frac{l^2}{2r_{\text{пр}}}. \quad (3.10)$$

Для шпор уравнение примет вид:

$$r_{\text{уст}} = \frac{l^2}{b_{\text{ш}} \cdot \text{tg } \varphi_1}. \quad (3.11)$$

Площадь пятна контакта с почвой гладкого катка находим по формуле

$$S_{\text{к}} = 2l_{\text{д}} \cdot b_{\text{ш}}, \quad (3.12)$$

где $l_{\text{д}}$ – длина дуги, взаимодействующей с почвой, м.

Для рассматриваемого катка с учетом формы его уплотняющий поверхности формула примет вид:

$$S_{\text{к}} = \frac{4l_{\text{пр}} \cdot d_{\text{пр}} \sqrt{2r_{\text{уст}} h_{\text{пр}}}}{\pi l}, \quad (3.13)$$

где $l_{\text{пр}}$ – длина прутка, м.

Зная площадь контакта, можно найти значения давления катка на почву:

$$p_{\text{д}} = \frac{q_{\text{пр}} (2l_{\text{пр}} + l)}{S_{\text{к}}}, \quad (3.14)$$

где $q_{\text{пр}}$ – распределенная нагрузка, кН/м.

С учетом формулы (3.13) получим:

$$P_d = \frac{\pi q_{np} (2l_{np}l + l^2)}{4l_{np} d_{np} \sqrt{2r_{уст} h_{np}}} \quad (3.15)$$

Давление кольчато-прутковый катка на почву необходимо для разрушения комков и крупных глыб. Наибольшие значения давления достигаются при минимальных диаметре и длине прутка, установленного на минимальном радиусе (рис. 3.7).

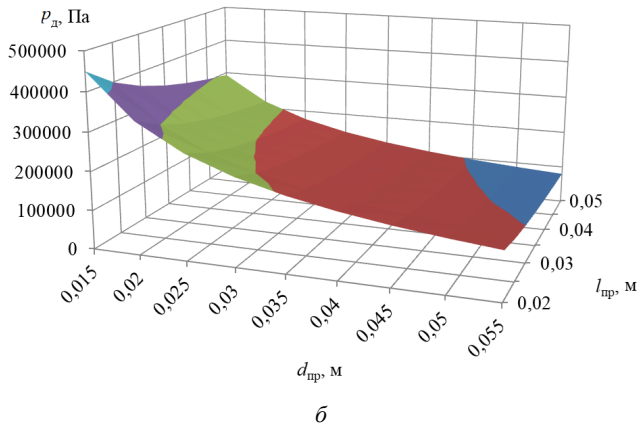
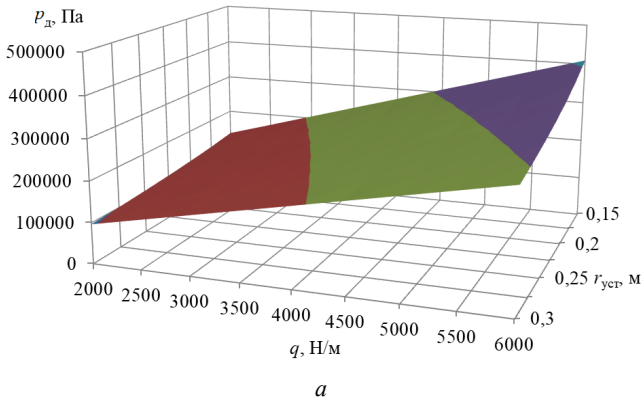


Рис. 3.7. Диаграммы зависимости давления кольчато-пруткового катка на почву от радиуса окружности установки и распределенной нагрузки (а), диаметра и длины прутка (б)

Оптимальная длина прутка зависит от шага между дисками и материала, из которого он выполнен. Для обеспечения надежности цилиндрических уплотняющих элементов кольчато-прутковых почвообрабатывающих катков необходимо определить из условий прочности сечения рациональное соотношение диаметра прутков $d_{\text{пр}}$ и их длины $h_{\text{пр}}$: $k_{\text{рац}} = l_{\text{пр}} / d_{\text{пр}}$. 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, следовательно, и энергоемкость выполнения технологического процесса.

При работе кольчато-пруткового катка на уплотняющие элементы действуют сила тяжести $G_{\text{п}} = m_{\text{пр}}g$ и сила сопротивления почвы внедрению прутка (распределенная нагрузка q) (рис. 3.8).

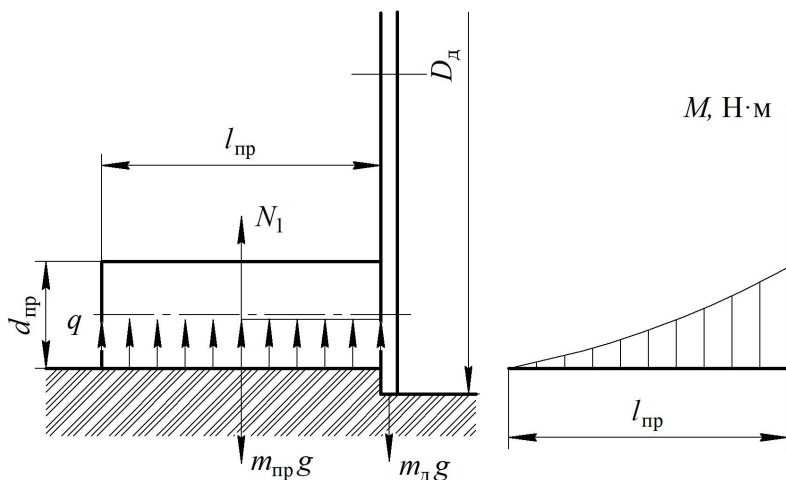


Рис. 3.8. Схема сил, действующих на кольчато-прутковый рабочий орган

Массу прутка найдем по формуле

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{ст}} V_{\text{пр}} = \rho_{\text{ст}} \frac{\pi d_{\text{пр}}^2 l_{\text{пр}}}{4}, \quad (3.16)$$

где $\rho_{\text{ст}}$ – плотность материала прутка, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $V_{\text{пр}}$ – объем прутка, м^3 .

Распределенная нагрузка рассчитывается следующим образом:

$$q_{\text{пр}} = \frac{N_1}{l_{\text{пр}}}, \quad (3.17)$$

где N_1 – сила воздействия почвы на пруток, Н.

Максимальный момент в опасном сечении прутка (см. рис. 3.8) определим по формуле

$$M_{\text{max}} = \frac{q_{\text{пр}} l_{\text{пр}}^2}{2} - m_{\text{пр}} g \frac{l_{\text{пр}}}{2}, \quad (3.18)$$

где $m_{\text{пр}}$ – масса прутка, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Во время работы приставок на их уплотняющие элементы действуют постоянная нагрузка N_1 (реакция почвы, определяемая сопротивлением почвы внедрению) и кратковременная нагрузка 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).

$$N_1 = \frac{\pi k_{\text{см}} l_{\text{пр}} d_{\text{пр}} h_{\text{пр}}}{2}. \quad (3.19)$$

Максимальные нормальные статические напряжения равны:

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

где $W_{\text{зп}}$ – осевой момент сопротивления поперечного сечения прутка, м³:

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

Тогда:

$$\sigma_{\max \text{ ст}} = \frac{l_{\text{пр}}^2 (8k_{\text{см}} h_{\text{пр}} - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})}{d_{\text{пр}}^2}. \quad (3.20)$$

При работе на не засоренных камнями участках прутки испытывают в основном изгиб, тогда:

$$\sigma_{\max \text{ ст}} = \frac{l_{\text{пр}}^2 (8k_{\text{см}} h_{\text{пр}} - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})}{d_{\text{пр}}^2} \leq [\sigma_{\text{ст}}], \quad (3.21)$$

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

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

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. 3.9), что может привести к тому, что не будет выполняться условие его прочности.

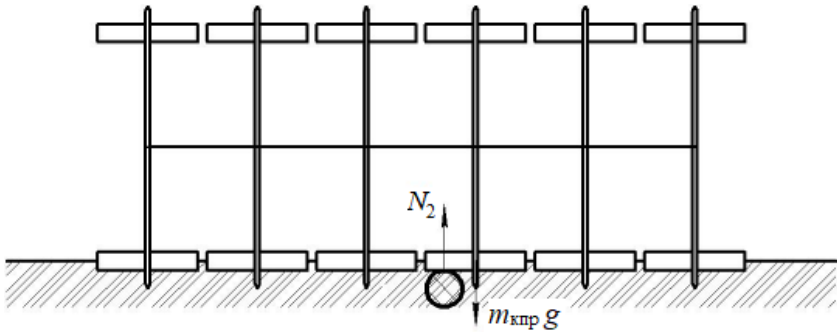


Рис. 3.9. Схема взаимодействия прутка с почвой

В окрестностях опасной точки прутка выделим элементарный объем в виде прямоугольного параллелепипеда, у которого ось x совпадает с осью прутка, ось y совпадает с направлением силы N_2 .

На гранях этого элемента действуют напряжения (рис. 3.10). Материал прутка в опасной точке испытывает плоское напряженное состояние [58, 84].

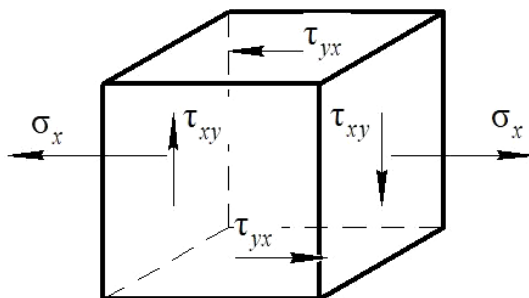


Рис. 3.10. Схема напряженного состояния в опасной точке прутка

Касательные напряжения в поперечном сечении прутка равны:

$$\tau_{\max \text{ ст}} = \frac{N_2}{A_{\text{ср}}} = \frac{4N_2}{\pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (3.22)$$

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

При известной массе приставки (см. рис. 3.9) нормальную реакцию N_2 находим по формуле

$$N_2 = m_{\text{кпр}}g, \quad (3.23)$$

где $m_{\text{кпр}}$ – 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 метод перераспределения веса плуга (приставки, навешиваемые на раму плуга). Поэтому следует учитывать дополнительную силу догрузки $F_{\text{д}}$. Формула (3.23) примет следующий вид:

$$N_2 = m_{\text{кпр}}g + F_{\text{д}}. \quad (3.24)$$

При условии, что вес катковой приставки выбран минимальный, справедливо равенство:

$$N_2 = m_{\text{кпр}}g + F_d = n_{\text{пр}}N_1, \quad (3.25)$$

где $n_{\text{пр}}$ – количество прутков, одновременно уплотняющих почву, шт.

Подставив полученные равенства в формулу (3.22), получим:
– при условии, что вес катковой приставки минимальный:

$$\tau_{\text{max ст}} = \frac{2n_{\text{пр}}k_{\text{см}}l_{\text{пр}}h_{\text{пр}}}{d_{\text{пр}}}; \quad (3.26)$$

– при условии, что масса катковой приставки известна:

$$\tau_{\text{max ст}} = \frac{4(m_{\text{кпр}}g + F_d)}{\pi d_{\text{пр}}^2}. \quad (3.27)$$

Для этого случая определим главные напряжения [12]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{max ст}} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \\ \sigma_{\text{min ст}} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

где σ_x, σ_y – напряжения, действующие вдоль осей x и y , МПа;
 τ_{xy} – касательное напряжение, МПа.

Для рассматриваемого случая $\sigma_y = 0$.

Для проверки прочности прутка из пластичного материала (стали) воспользуемся третьей теорией прочности, которая имеет вид [58, 86]:

$$\sigma_{\text{эkv. ст}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma_{\text{ст}}], \quad (3.29)$$

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

Подставив в формулу (3.29) максимальные и минимальные напряжения, получим:

$$\sigma_{\text{экв. ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (3.30)$$

Подставив в уравнение (3.30) значения из формул (3.21) и (3.26), получим условие прочности для прутка при минимально допустимом весе катковой приставки:

$$\sigma_{\text{экв. ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\frac{l_{\text{пр}}^4 (8k_{\text{см}} h_{\text{пр}} - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})^2}{d_{\text{пр}}^4} + \frac{16n_{\text{пр}}^2 k_{\text{см}}^2 l_{\text{пр}}^2 h_{\text{пр}}^2}{d_{\text{пр}}^2}} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (3.31)$$

Подставив в уравнение (3.30) значения из формул (3.21) и (3.27), получим условие прочности для прутка при заданной массе катковой приставки:

$$\sigma_{\text{экв. ст}}^{\text{III}} = \sqrt{\frac{l_{\text{пр}}^4 (8k_{\text{см}} h_{\text{пр}} - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})^2}{d_{\text{пр}}^4} + \frac{64(m_{\text{кпр}} g + F_{\text{д}})^2}{\pi^2 d_{\text{пр}}^4}} \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (3.32)$$

Наибольшая величина воздействия на пруток происходит при его соударении с камнем (рис. 3.11), поэтому необходимо учитывать динамический коэффициент, который определяется по формуле [58, 86]:

$$k_{\text{д}} = \sin \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{пр}} + \frac{v_{\text{пр}}^2}{g\Delta_{\text{ст}}}}, \quad (3.33)$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ – угол, который составляет линия направления удара (сила N_2) с линией горизонта, град;

$v_{\text{пр}}$ – скорость прутка в момент удара, м/с;

$\Delta_{\text{ст}}$ – перемещение в месте удара по направлению удара, вызванное статическим действием силы тяжести ударающего груза, м.

Угол приложения силы для нашего случая будет в пределах 0,48–0,50 рад. При значении углов менее 0,48 рад прутки с большой вероятностью сдвинут камень, а не сломаются при соударении с ним.

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

$$\begin{aligned}
 v_{\text{пр}} &= \sqrt{v_{\text{кпр}}^2 + v_{\text{к}}^2 - 2v_{\text{к}} \cdot v_{\text{кпр}} \cdot \cos(90 - \alpha_{\text{пр}})} = \\
 &= \sqrt{v_{\text{кпр}}^2 + v_{\text{к}}^2 - 2v_{\text{к}} \cdot v_{\text{кпр}} \cdot \sin \alpha_{\text{пр}}},
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

где $v_{\text{кпр}}$ – скорость катковой приставки, м/с;

$v_{\text{к}}$ – окружная скорость прутка в точке удара, м/с:

$$v_{\text{к}} = \omega_{\text{п}} r_{\text{уст}}, \tag{3.35}$$

где $\omega_{\text{п}}$ – угловая скорость прутка, с^{-1} .

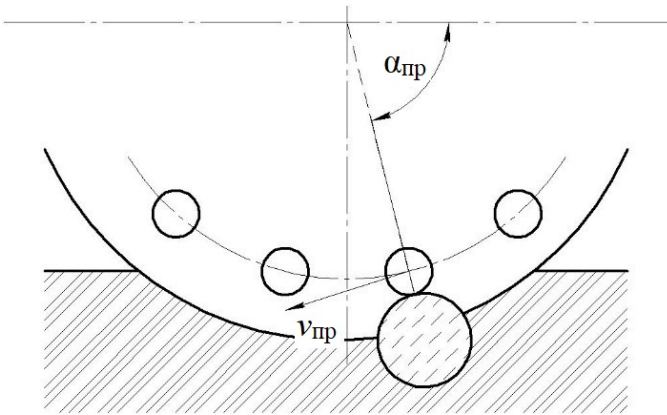


Рис. 3.11. Схема взаимодействия прутка с камнем в почве

Пруток приварен к диску, при худших условиях работы удар происходит о жесткое тело (камень) на жестком основании, поэтому применима формула для консольной балки [58, 86]:

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{N_2 I_{\text{пр}}^3}{3E_{\text{п}} I_z}, \tag{3.36}$$

где $E_{\text{п}}$ – модуль продольной упругости (модуль Юнга), Па;

I_z – осевой момент инерции поперечного сечения прутка, м^4 :

$$I_z = \frac{\pi d_{\text{пр}}^4}{64},$$

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{64N_2 l_{\text{пр}}^3}{3\pi E_{\text{п}} d_{\text{пр}}^4}. \quad (3.37)$$

Динамический коэффициент имеет следующие значения:

– при условии, что вес катковой приставки минимальный, подставив в формулу (3.33) значения из выражений (3.25) и (3.37), получим:

$$k_{\text{д}} = \sin \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{пр}} + \frac{v_{\text{пр}}^2}{\frac{32gl_{\text{пр}}^4 n_{\text{пр}} k_{\text{см}} h_{\text{пр}}}{3E_{\text{п}} d_{\text{пр}}^3}}}; \quad (3.38)$$

– при заданной массе катковой приставки, подставив в формулу (3.33) значения из выражений (3.24) и (3.37), получим:

$$k_{\text{д}} = \sin \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{пр}} + \frac{v_{\text{пр}}^2}{\frac{64gl_{\text{пр}}^3 (m_{\text{кпр}}g + F_{\text{д}})}{3\pi E_{\text{п}} d_{\text{пр}}^4}}}. \quad (3.39)$$

С учетом динамического коэффициента получим неравенство:

– при минимальном весе катковой приставки:

$$\sqrt{\frac{l_{\text{пр}}^4 (8k_{\text{см}} h_{\text{пр}} - 4g\rho_{\text{ст}} d_{\text{пр}})^2}{d_{\text{пр}}^4} + \frac{16n_{\text{пр}}^2 g^2 l_{\text{пр}}^2 h_{\text{пр}}^2}{d_{\text{пр}}^2}} \times \left(\sin \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{пр}} + \frac{v_{\text{пр}}^2}{\frac{32gl_{\text{пр}}^4 n_{\text{пр}} k_{\text{см}} h_{\text{пр}}}{3E_{\text{п}} d_{\text{пр}}^3}}} \right) \leq [\sigma_{\text{ст}}]; \quad (3.40)$$

– при заданной массе катковой приставки:

$$\sqrt{\frac{l_{\text{np}}^4 (8k_{\text{cm}}h_{\text{np}} - 4g\rho_{\text{ст}}d_{\text{np}})^2}{d_{\text{np}}^4} + \frac{64(m_{\text{кпп}}g + F_{\text{д}})^2}{\pi^2 d_{\text{np}}^4}} \times$$

$$\times \left(\sin \alpha_{\text{np}} + \sqrt{\sin^2 \alpha_{\text{np}} + \frac{v_{\text{np}}^2}{\frac{64gl_{\text{np}}^3 (m_{\text{кпп}}g + F_{\text{д}})}{3\pi E_{\text{п}} d_{\text{np}}^4}}} \right) \leq [\sigma_{\text{ст}}]. \quad (3.41)$$

Решив уравнение (3.40), найдем допустимый диаметр прутка при условии, что вес приставки минимален:

$$[d_{\text{np}}] = \frac{2k_{\text{cm}}h_{\text{np}}g\rho_{\text{ст}}l_{\text{np}}^2 + \frac{l_{\text{np}}^2 \cdot gn_{\text{np}}k_{\text{cm}}h_{\text{np}}}{v_{\text{np}}^2 \cdot 3E_{\text{п}}} [\sigma_{\text{ст}}^2]}{(g^2\rho_{\text{ст}}^2l_{\text{np}}^2 + n_{\text{np}}^2k_{\text{cm}}^2h_{\text{np}}^2)} +$$

$$+ \frac{\sqrt{\left(2k_{\text{cm}}h_{\text{np}}g\rho_{\text{ст}}l_{\text{np}}^2 + \frac{l_{\text{np}}^2 \cdot gn_{\text{np}}k_{\text{cm}}h_{\text{np}}}{v_{\text{np}}^2 \cdot 3E_{\text{п}}} [\sigma_{\text{ст}}^2]\right)^2 - 4(g^2\rho_{\text{ст}}^2l_{\text{np}}^2 + n_{\text{np}}^2k_{\text{cm}}^2h_{\text{np}}^2)k_{\text{cm}}^2h_{\text{np}}^2l_{\text{np}}^2}}{(g^2\rho_{\text{ст}}^2l_{\text{np}}^2 + n_{\text{np}}^2k_{\text{cm}}^2h_{\text{np}}^2)}.$$

График (рис. 3.12) отражает зависимость допустимого диаметра прутка от его длины при условии, что $k_{\text{cm}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^3$, $\rho_{\text{ст}} = 7826 \text{ кг/м}^3$; $E_{\text{п}} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

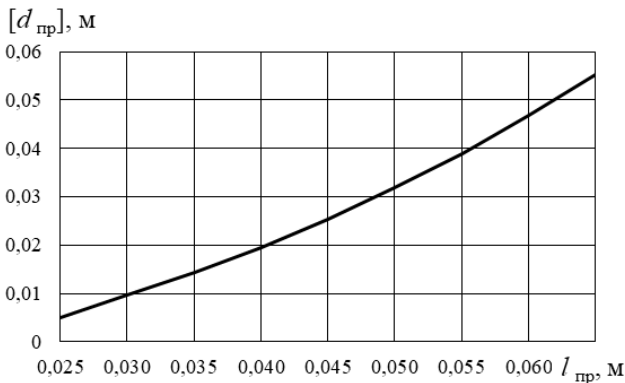


Рис. 3.12. График зависимости допустимого диаметра прутка от его длины

Приведенный график показывает, что с увеличением длины прутка его допустимый диаметр тоже увеличивается. На диске обычно устанавливается от 48 до 60 прутков, количество которых определяется его конструктивными параметрами и находится по формуле

$$n_{\text{пр}} = \frac{\pi D_{\text{д}}}{l} = \frac{\pi D_{\text{д}}}{l_{\text{мп}} + d_{\text{пр}}}, \quad (3.43)$$

где $D_{\text{д}}$ – диаметр диска, м.

Зная массу одного прутка (формула (3.16)) и их количество (формула (3.43)), можно определить массу одного кольчато-шпорового катка:

$$m_{\text{к}} = \frac{\pi \rho_{\text{ст}}}{2} \left(\frac{\pi D_{\text{д}} d_{\text{пр}}^2}{l_{\text{мп}} + d_{\text{пр}}} + \frac{D_{\text{д}}^2 l_{\text{д}}}{2} \right), \quad (3.44)$$

где $l_{\text{д}}$ – ширина диска, м.

Ширина захвата приставки определяется конструктивными параметрами плуга, зная которые можно определить количество кольчато-шпоровых катков в секции приставки:

$$n_{\text{к}} = \frac{b_{\text{пр}} + l_{\text{мп}}}{2l_{\text{пр}} + l_{\text{д}} + l_{\text{мп}}}. \quad (3.45)$$

Масса секции катковой приставки рассчитывается по формуле

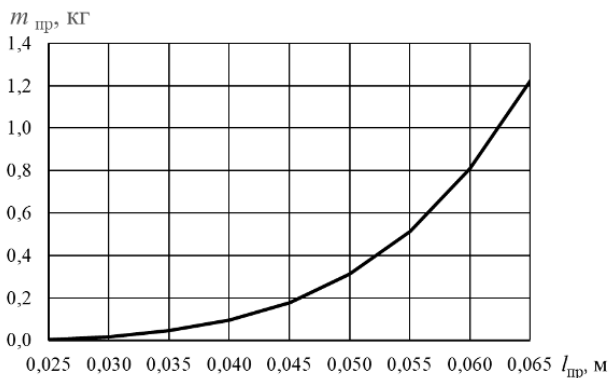
$$m_{\text{кпр}} = \frac{\pi \rho_{\text{ст}} (b_{\text{пр}} + l_{\text{мп}})}{4l_{\text{пр}} + 2l_{\text{д}} + 2l_{\text{мп}}} \left(\frac{\pi D_{\text{д}} d_{\text{пр}}^2 l_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} + l_{\text{мп}}} + \frac{D_{\text{д}}^2 l_{\text{д}}}{2} \right). \quad (3.46)$$

Применение прутков с большей длиной приводит к увеличению массы катка (рис. 3.13, *а*), следовательно, и массы катковой приставки (рис. 3.13, *б*), даже с учетом того, что увеличение длины прутка увеличивает расстояние между катками и сокращает их количество в секции катковой приставки.

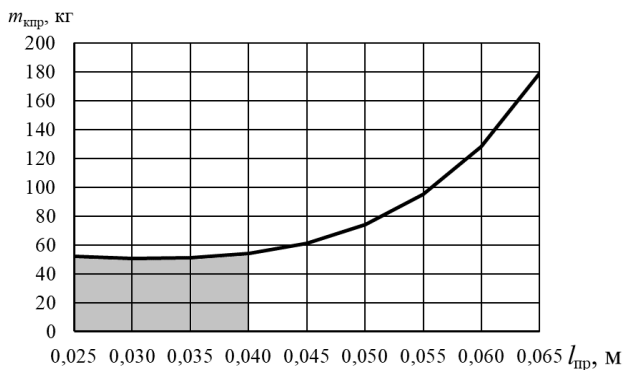
С целью оценки энергетических затрат на обработку почвы катковой приставки с кольчато-прутковыми рабочими органами определим удельные энергетические затраты на обработку единицы объема почвы E по следующей зависимости [17]:

$$E = \frac{A}{V},$$

где A – энергетические затраты, Дж;
 V – объем обработанной почвы, м³.



a



б

Рис 3.13. Графики зависимости массы прутка (*a*) и массы катковой приставки (*б*) от длины прутка при соответствующем допустимом его диаметре

$$A = P_c L,$$

где P_c – сопротивление секции рабочих органов, Н;
 L – длина гона, м.

$$V = S_c L,$$

где S_c – площадь поперечного сечения обрабатываемого слоя почвы, м^2 :

$$S_c = h_{\text{пр}} b_{\text{пр}}.$$

Тяговое сопротивление катка можно определить по формуле [14]:

$$P_c = f_n G_{\text{пр}},$$

где f_n – коэффициент сопротивления перекачиванию.

$$G_{\text{пр}} = m_{\text{кпр}} g.$$

Академиком Горячкиным В.П. предложена формула для определения коэффициента сопротивления перекачиванию [14]:

$$f_n = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{h_{\text{пр}}}{2r_{\text{уст}}}}.$$

При условии, что длина прутка и его диаметр не влияют на коэффициент перекачивания, определим удельные затраты энергии на обработку почвы катками (рис. 3.14).

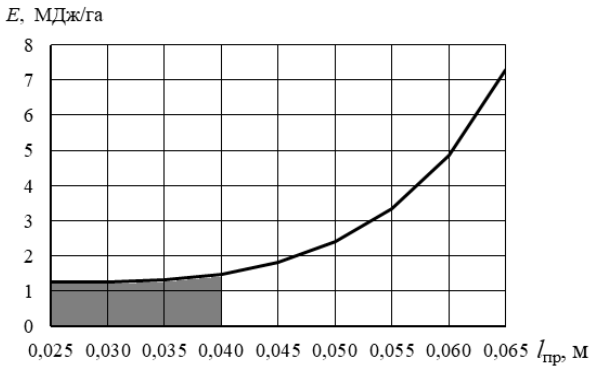


Рис. 3.14. График зависимости удельных энергетических затрат на обработку почвы катковыми приставками от длины прутка при соответствующем допустимом его диаметре

Таким образом, наименьшие удельные энергетические затраты на обработку почвы катковой приставкой достигаются при длине

прутка $l_{\text{пр}}$ в пределах от 0,025 до 0,040 м (см. рис. 3.14). Наибольший допустимый диаметр $[d_{\text{пр}}]$ при минимальной металлоемкости равен 0,02 м и соответствует длине прутка 0,040 м (см. рис. 3.12). С учетом полученных зависимостей (3.8), (3.9), (3.15), при оптимальном диаметре прутков, шаг их установки равен 0,049–0,059 м, диаметр окружности установки от 0,29 до 0,50 м в зависимости от размеров почвенного комка.

3.2. Методы и результаты лабораторных исследований по обоснованию параметров кольчато-пруткового катка

Экспериментальный лабораторный образец кольчато-пруткового рабочего органа

В качестве исследуемых рабочих органов катковой приставки использовались кольчато-прутковые катки (рис. 3.15). Они состоят из дисков, на обеих сторонах которых по окружности, удаленной от режущей кромки, закреплены прутки одинакового диаметра через равные промежутки.

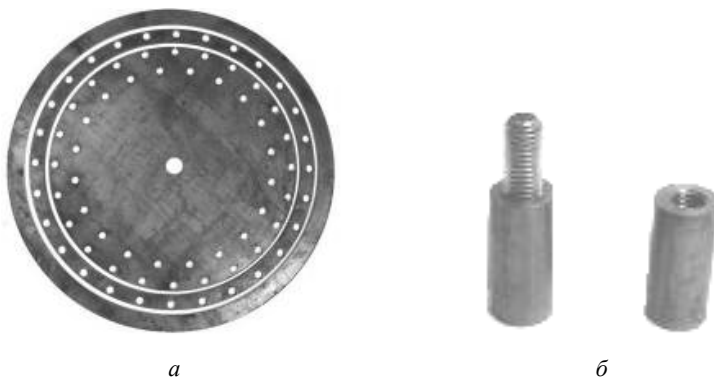


Рис. 3.15. Конструкция экспериментального катка:
а – набор дисков; *б* – разборный пруток

Диск лабораторного образца катка (рис. 3.16) состоит из диска 1, жестко закрепленных на нем, при помощи фиксаторов 2, колец 3, 4. Такая конструкция диска позволяет ступенчато изменять диаметр диска и окружности, на которой устанавливаются прутки 5, а также расстояние между прутками.

С учетом назначения исследуемого катка и результатов теоретических исследований для проведения экспериментов были изготовлены кольца диаметром 390, 450, 510 мм. Съемные прутки устанавливались в отверстия на диаметрах 330, 390, 450 мм.

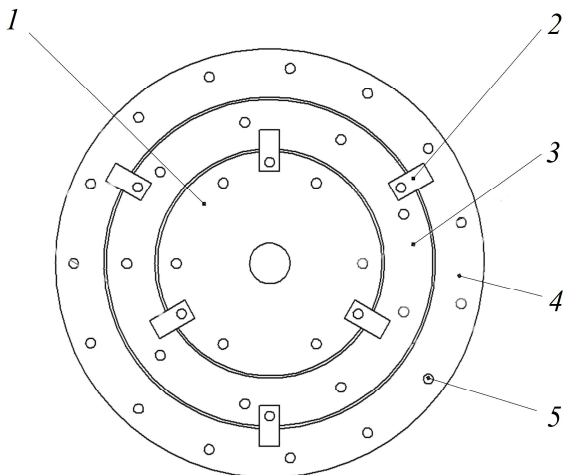
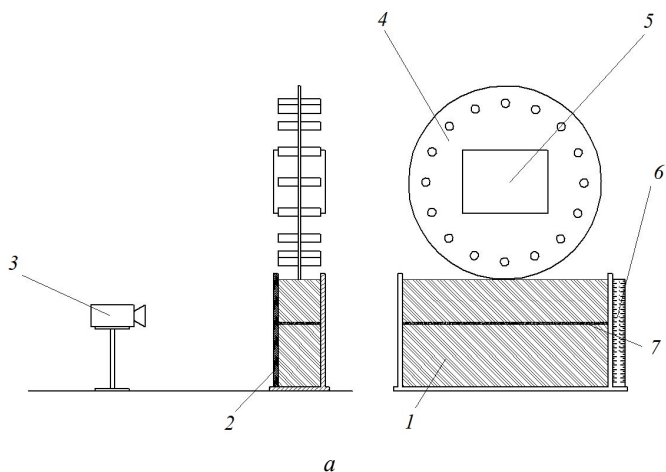


Рис. 3.16. Диск лабораторного образца

Диаметр прутков 20 мм и их длина 40 мм были выбраны на основании теоретических исследований из условия перекрытия зон уплотнений на глубине расположения семенного ложа при минимальной металлоемкости.

Методы и результаты исследований закономерностей формирования почвенного ядра

Для обоснования конструкции кольчато-прутковых рабочих органов и исследования закономерностей их воздействия на почву была разработана лабораторная установка (рис. 3.17, б), состоящая из ящика 1, заполненного почвой, с одной стенкой 2, выполненной из оргстекла; фотокамеры 3 с возможностью скоростной съемки; исследуемого рабочего органа 4; ящика 5 для грузов и металлической линейки 6 (рис. 3.17, а). Для исследования сдвига почвы на заданной глубине закладывался индикаторный слой 7 (мел, известь или шарики пенопласта) [9].



б

*Рис. 3.17. Устройство лабораторной установки для определения формы почвенного ядра:
 1 – ящик; 2 – стенка; 3 – фотокамера; 4 – орган рабочий; 5 – ящик;
 6 – линейка металлическая; 7 – слой индикаторный*

Ящик заполнен дерново-подзолистой супесчаной почвой и имеет следующие габариты: длина 0,5 м, ширина 0,1 м, высота 0,3 м. Ящик для грузов заполнялся 14 грузами по 0,1 кг каждый.

За основу лабораторного образца принят каток, состоящий из диска с закрепленными по обе стороны, равноудаленными от его кромки и друг от друга прутками. Рассмотрим, как движется пруток при погружении в почву. Три положения катка, соответствующие началу погружения, достижению максимальной глубины и выглублению прутка, показаны на рис. 3.18. Допустим, что горизонтальное перемещение прутка при его погружении в почву в процессе перекаtywания катка, в сравнении с вертикальным, незначительно. Поэтому принимаем, что пруток в почве перемещается в вертикальной плоскости без перемещения по горизонтали (без проскальзывания). При этом очевидно, что уплотнение почвы происходит только при заглублении (интервал I–II). В интервале III происходит процесс выглубления прутка.

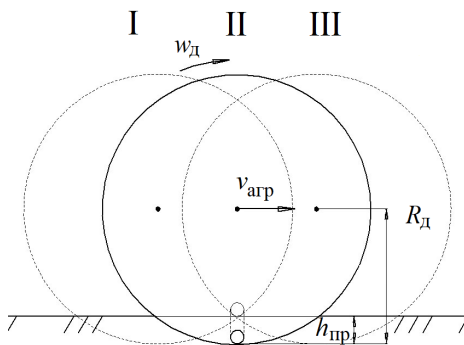


Рис. 3.18. Схема движения экспериментального катка в процессе работы

На основании представленной информации исследования проводились в следующей последовательности. В ящик до уровня индикаторного слоя засыпали исследуемый образец почвы. После засыпки индикаторного слоя почву засыпали до отметки 0 на металлической линейке. Перед началом исследований брали пробы для определения влажности и плотности почвы. Устанавливали экспериментальный образец рабочего органа. Производили контроль глубины погружения при минимальной силе воздействия катка на почву. Далее изменяли вес рабочего органа, добавляя новые грузы, и контролировали глубину погружения. При проведении опыта фотокамерой фиксировали, как формируется почвенное

ядро и как распространяются зоны уплотнений. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Уровни и интервалы варьирования факторов при экспериментальном исследовании влияния массы катка на глубину обработки

Факторы	Масса, m_d		Влажность, w	
	x_1 , кг	X_1	x_2 , %	X_2
Основной уровень	$x_{10} = 12,88$	0	$x_{20} = 70$	0
Интервал варьирования	$\Delta x_1 = 6,88$	1	$\Delta x_2 = 10$	1
Верхний уровень	$x_{1 \max} = 19,76$	+1	$x_{2 \max} = 80$	+1
Нижний уровень	$x_{1 \min} = 6,0$	-1	$x_{2 \min} = 60$	-1
Формулы перевода натуральных значений факторов x_r в нормированные X_r и обратно	$X_{1j} = \frac{x_{1j} - 12,88}{6,88}; \quad x_{1j} = 6,88X_{1j} + 12,88;$ $X_{2j} = \frac{x_{2j} - 70}{10}; \quad x_{2j} = 10X_{2j} + 70$			

Перед началом опытов проводилась их рандомизация (прилож. А). Проверка гипотез об однородности дисперсий и воспроизводимости опытов по исследованию факторов, влияющих на глубину погружения прутка, выполнялась по G -критерию Кохрена. Если выполняется условие $G_{\text{экс}} < G_{0,05; 3; 5}$, следовательно, опыт воспроизводим. Так как, согласно данному условию при обработке опытов:

$$G_{\text{экс}} = \frac{41,184}{128,386} = 0,32 < G_{0,05; 3; 5} = 0,60,$$

то полученная оценка подтверждает их воспроизводимость.

В результате проведенных исследований были получены экспериментальные данные, позволяющие описать зависимость глубины погружения кольчато-прутковых рабочих органов от их массы и влажности почвы уравнением регрессии первого порядка:

кодированное: $Y = 18,73X_1 - 40,04$,

натуральное: $h_{\text{пр}} = 2,72m_d - 35,45$.

Проверка значимости рассчитанных коэффициентов по t -критерию Стьюдента в полученной регрессионной модели по исследованию влияния факторов на заглубление прутка в почву показала, что коэффициент x_2 не значим. Абсолютная величина коэффициента модели показывает, что при увеличении массы катка глубина обработки увеличивается. Проверка адекватности полученной модели по F -критерию Фишера показала, что она адекватна на уровне значимости 0,05 ($F_{\text{экс}} = 1,93 < F_{0,05;15;2} = 3,68$). Подставив в полученное уравнение значения, получили следующие зависимости (рис. 3.19).

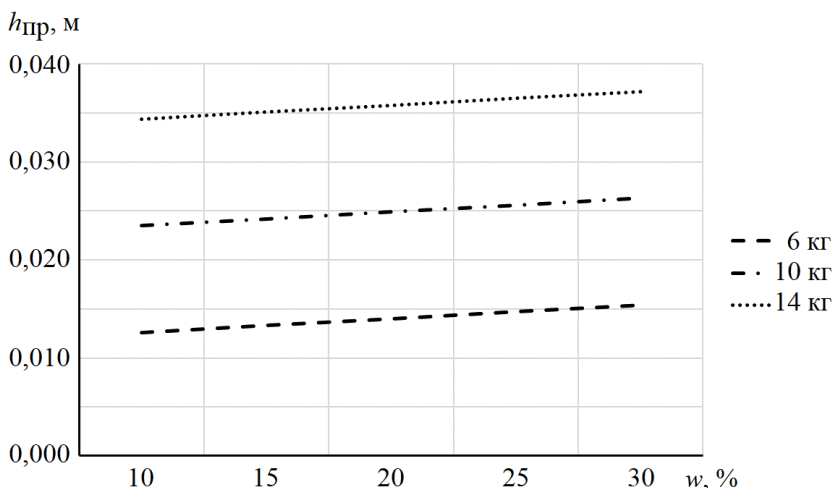
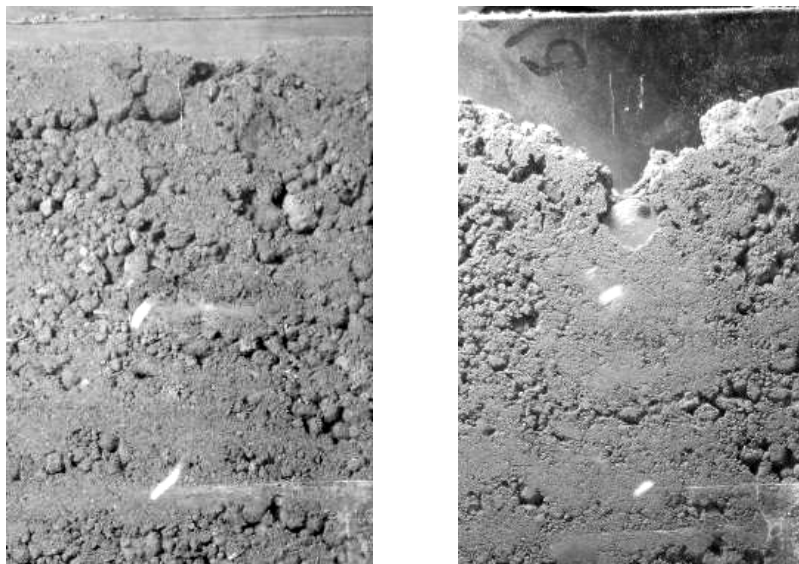


Рис. 3.19. Графики зависимости глубины погружения от массы катка и влажности почвы

Полученная зависимость показывает, что на глубину обработки наибольшее влияние оказывает масса катка. При ее увеличении наблюдается рост глубины погружения. Основная обработка почвы проводится в диапазоне влажности с 18 % до 22 %, следовательно, влияние влажности на обработку почвы незначительно. Коэффициент перекачивания катковой приставки с кольчато-прутковым катком составляет 0,23.

В ходе эксперимента производилась оценка формы уплотненного ядра при внедрении штампа круглого сечения (рис. 3.20).

Распространение напряжений в почве зафиксировано на рис. 3.20, б. Опыт подтвердил, что при заглублении шпор круглого сечения уплотненное ядро минимально, следовательно, на его формирование необходимо меньше времени.



а

б

Рис. 3.20. Распространение деформаций в почве до внедрения штампа круглого сечения (*а*) и после (*б*)

Для погружения кольчато-пруткового катка в почву на глубину 4 см необходимо усилие 140 Н, для секции шириной захвата 1 м необходимо усилие 980 Н. Масса секции с рациональными параметрами, определенными из условия повышения качества обработки почвы, составляет 54 кг, что соответствует 529 Н. Следовательно, для погружения на требуемую глубину катковой приставке необходимо дополнительное усилие величиной 451 Н, которое будет обеспечено за счет переноса части веса плуга на приставку для ее догружения, что (исходя из рациональной формулы Горячкина) приведет к снижению тягового сопротивления плуга, следовательно, и энергетических затрат на проведение обработки почвы плугом с катковыми приставками.

Взаимодействие кольчато-пруткового рабочего органа со свежеспаханной почвой

Для оценки уплотнения почв используют математико-механические модели взаимодействия или проводят экспериментальные исследования в реальных условиях [93]. Существуют различные подходы в исследованиях уплотнения почв теоретическими методами. Многие из них носят приближенный характер в силу применяемых различных допущений и ограничений.

Почву можно представить в виде сплошной среды, которая имеет упругие, вязкие и пластические свойства. При этом повторное ее нагружение (например, прохождение энергетического средства по одному и тому же следу), приводит к ее упрочнению, т. е. изменяются модули упругости и пластичности. Например, модуль упругости свежеспаханной почвы намного меньше, чем уплотненной [93].

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

Воздействие агрегатов на почву осуществляется ходовыми системами (колеса) и рабочими органами (корпуса плугов, диски, катки, зубья и пр.) через некоторую область 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 орудия с почвой. Равнодействующую данных распределенных сил вдоль линии контакта обозначим через F_{Π} . Тогда для определения напряжений в точках почвенного массива можно использовать формулу Буссинеска [92, 93], т. е. записать:

$$\sigma_R = \frac{3F_{\Pi} \cos^2 \alpha_m}{2\pi R_m^2}, \quad (3.47)$$

где σ_R – радиальное напряжение, Па;

α_m – угол между линией действия силы F_{Π} и расстоянием R_m , град;

R_m – расстояние от точки приложения силы F_{Π} на поверхности почвенного полупространства до рассматриваемой точки M (рис. 3.21), м.

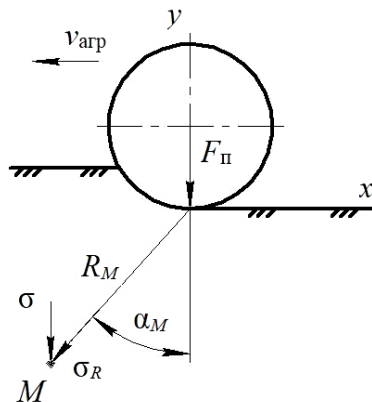


Рис. 3.21. Схема к определению напряжений в точке почвенного массива

Формула (3.47) приближенно определяет напряжение в почвенном массиве, но не учитывает свойства почвы и ее деформацию.

Рассмотрим модель почвы, функция нагружения которой имеет вид [93]:

$$\sigma - k_{пл} - k_c e_p - k_\eta \dot{e}_p = 0, \quad (\sigma > k_{пл}), \quad (3.48)$$

где σ – нормальное напряжение к поверхности почвы ($\sigma = \sigma_R \cos \alpha_M$), Па;

$k_{пл}$, k_c – соответственно, коэффициенты пластичности и упрочнения, Па;

k_η – коэффициенты вязкости, Па·с;

e_p – пластические относительные деформации, с⁻¹:

$$\dot{e}_p = \frac{de_p}{dt},$$

где t – время, с.

Когда почва перегружена, ее состояние можно описать упругими свойствами:

$$\sigma = E_{пл} e_e, \quad (\sigma < k), \quad (3.49)$$

где $E_{пл}$ – модуль упругости, Па (табл. 3.3, 3.4);

e_e – упругие относительные деформации.

Таблица 3.3

Значения модуля упругости E для различных типов почв [37, 90]

Тип почвы	Содержание физической глины (размер частиц – 0,01 мм), %	Модуль упругости $E_{п}$, МПа
Пески рыхлые	0–5	30–50
Пески связные	5–10	11–48
Суглинок легкий	20–30	6–33
Суглинок средний	30–40	5–55
Глина	50–80	5–62

Примечание. С ростом влажности почвы модуль упругости уменьшается.

Таблица 3.4

Значения модуля упругости $E_{п}$ для различных типов почв при разных значениях влажности [37, 90]

Тип почвы	w , %	$E_{п}$, МПа
Суглинок легкий	13,9	6,06
	11,4	22,54
	9,7	33,47
Суглинок средний	18,9	4,26
	17,6	21,31
	13,6	37,55
	12,5	43,30
	11,2	55,14
Суглинок тяжелый	23,8	9,40
	22,0	20,74
	20,5	45,31
	18,3	61,06
	17,3	61,89

Из зависимости (3.49) с учетом равенства (3.47) имеем:

$$e_e = \frac{3}{2} \frac{F_{п}}{E\pi R_{м}^2} \cos^2 \alpha_{м}. \quad (3.50)$$

Формула (3.50) определяет упругие деформации, возникающие в почве от приложенной нагрузки F_{Π} . Из данной зависимости следует, что чем больше модуль упругости почвы, тем меньше ее деформация. Наибольшая упругая деформация будет при $\alpha_m = 0$. Формула (3.50) теряет физический смысл в точке $R_m = 0$ и ее окрестности, что ограничивает применение данного уравнения.

Пусть в рассматриваемых точках почвы $\sigma > k_{\text{пл}}$, т. е. имеют место остаточные деформации. Тогда связь между напряжениями и деформациями будет выражаться формулой (3.48). Из равенств (3.47) и (3.48) можно получить:

$$k_{\eta} \mathfrak{E}_p = \frac{3 F_{\Pi} \cos^2 \alpha_m}{2 \pi R_m^2} - k_{\text{пл}} - k_c e_p,$$

или

$$\mathfrak{E}_p = \frac{1}{k_{\eta}} \left(\frac{3 F_{\Pi} \cos^2 \alpha_m}{2 \pi R_m^2} - k_{\text{пл}} - k_c e_p \right). \quad (3.51)$$

Особый интерес вызывает случай, когда $F_{\Pi} = F_{\Pi}(t) + F_{\Pi 0}$, $\alpha_m = \omega_m t$ (ω_m – угловая скорость, c^{-1} , $F_{\Pi 0} = \text{const}$).

Обозначив $\mathfrak{R}_{\Pi} = \frac{dF_{\Pi}}{dt}$, уравнение (3.51) преобразуем к виду:

$$\frac{de_p}{dF_{\Pi}} = \frac{1}{k_{\eta} \mathfrak{R}_{\Pi}} \left(\frac{3 F_{\Pi} \cos^2 \alpha_m}{2 \pi R_m^2} - k_{\text{пл}} - k_c e_p \right). \quad (3.52)$$

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

$$A_m = \frac{3 F_{\Pi} \cos^2 \alpha_m}{2 \pi R_m^2}; \quad B_m = \frac{1}{k_{\eta} \mathfrak{R}_{\Pi}}.$$

В новых переменных уравнение (3.52) приобретет вид:

$$\frac{de_p}{dF_{\Pi}} = B_m (F_{\Pi} A_m - k_{\text{пл}} - k_c e_p),$$

откуда

$$\frac{de_p}{dF_{\Pi}} + B_m k_c e_p = B_m F_{\Pi} A_m - B_m k_{\text{пл}}. \quad (3.53)$$

Получено линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно e_p . Для его решения введем замену $e_p = uv$,

$\frac{de_p}{dF_{\Pi}} = u'v + v'u$. Уравнение (3.53) перепишем в новых переменных u и v :

$$u'v + v'u + B_M k_c uv = B_M A_M F_{\Pi} - B_M k_{CM} = 0. \quad (3.54)$$

Решение полученного линейного дифференциального уравнения (3.54) сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} B_M k_c v + v' = 0, \\ u'v = B_M A_M F_{\Pi} - B_M k_{CM}. \end{cases} \quad (3.55)$$

Найдем решение для функции v .

Из уравнения (3.55) следует:

$$v' = -B_M k_c v.$$

$$\frac{dv}{dF_{\Pi}} = -B_M k_c v.$$

$$dv = -B_M k_c v dF_{\Pi}.$$

$$\frac{dv}{B_M k_c v} = -dF_{\Pi}.$$

$$\frac{\ln v}{B_M k_c} = -dF_{\Pi}.$$

$$\ln v = -B_M k_c dF_{\Pi}.$$

Откуда после интегрирования получим:

$$v = e^{-B_M k_c F_{\Pi}}. \quad (3.56)$$

Подставляем найденную функцию (3.56) во второе уравнение системы (3.55) и получаем:

$$\frac{du}{dF_{\Pi}} e^{-B_M k_c F_{\Pi}} = B_M A_M F_{\Pi} - B_M k_{\text{пл}},$$

или

$$\frac{du}{dF_{\Pi}} = (B_M A_M F_{\Pi} - B_M k_{\text{пл}}) e^{B_M k_c F_{\Pi}}. \quad (3.57)$$

В интегральной форме:

$$\int du = \int B_M A_M F_{\Pi} e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi} - \int B_M k_{\text{пл}} e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi}. \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \int B_M A_M F_{\Pi} e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi} &= B_M A_M \int F_{\Pi} e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi} = \left. \begin{aligned} u = F_{\Pi} \quad du = dF_{\Pi} \\ dv = e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi} \quad v = \frac{e^{B_M k_c F_{\Pi}}}{B_M k_c} \end{aligned} \right| = \\ &= B_M A_M \left(\frac{F_{\Pi}}{B_M k_c} e^{B_M k_c F_{\Pi}} - \int \frac{e^{B_M k_c F_{\Pi}}}{B_M k_c} dF_{\Pi} \right) = B_M A_M \left(\frac{F_{\Pi}}{B_M k_c} e^{B_M k_c F_{\Pi}} - \frac{1}{B_M^2 k_c^2} e^{B_M k_c F_{\Pi}} \right) + C_1 = \quad (3.59) \\ &= e^{B_M k_c F_{\Pi}} \left(\frac{A_M F_{\Pi}}{k_c} - \frac{A_M}{B_M k_c^2} \right) + C_1 = e^{B_M k_c F_{\Pi}} \left(\frac{A_M B_M F_{\Pi} k_c - A_M}{B_M k_c^2} \right) + C_1 = \\ &= e^{B_M k_c F_{\Pi}} \left(\frac{A_M (B_M F_{\Pi} k_c - 1)}{B_M k_c^2} \right) + C_1. \end{aligned}$$

$$\int B_M k_{\text{пл}} e^{B_M k_c F_{\Pi}} dF_{\Pi} = B_M k_{\text{пл}} e^{B_M k_c F_{\Pi}} \frac{1}{B_M k_c} = \frac{k_{\text{пл}}}{k_c} e^{B_M k_c F_{\Pi}}. \quad (3.60)$$

После интегрирования получим:

$$u = e^{B_M k_c F_{\Pi}} \left[\frac{A_M (B_M k_c F_{\Pi} - 1)}{B_M k_c^2} - \frac{k_{\text{пл}}}{k_c} \right]. \quad (3.61)$$

Учитывая, что $e_p = uv$, с учетом равенств (3.55) и (3.61) получим выражение для определения пластических деформаций:

$$e_p = \frac{3 \cos^2 \alpha_M}{2 \pi R_M^2 k_c} \left(F_{\Pi} - \frac{k_{\text{пл}}}{k_c} \right) - \frac{k_{\text{пл}}}{k_c}. \quad (3.62)$$

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

$$e = e_p + e_e. \quad (3.63)$$

Подставив равенства (3.48) и (3.62) в (3.63), получим:

$$e = \frac{3 \cos^2 \alpha_m}{2 \pi R_m^2} \left(\frac{F_{\text{п}}}{E} + \frac{F_{\text{п}}}{k_c} - \frac{k_{\eta} r_{\text{уст}}^2}{k_c^2} \right) - \frac{k_{\text{пл}}}{k_c}. \quad (3.64)$$

Полученная формула позволяет найти полную деформацию почвы. Данная величина характеризует процессы, происходящие при обработке почвы в зависимости от глубины обработки, состояния почвы и веса приставки, который определяется геометрическими параметрами и материалом изготовления ее рабочих органов.

Для теоретического исследования взаимодействия прутка с почвой рассмотрим процесс внедрения его в почву. Все прутки равноудалены друг от друга и закреплены на диске на расстоянии $r_{\text{уст}}$ относительно его геометрического центра (рис. 3.22). Радиус самого диска обозначим через R_d .

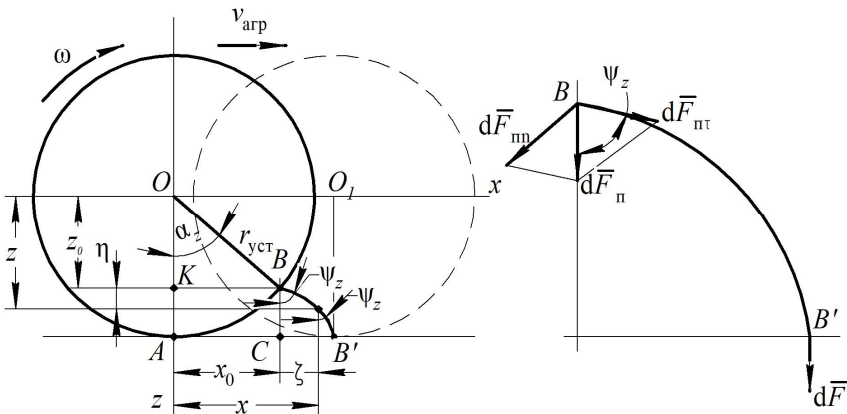


Рис. 3.22. Схема к определению кинематических параметров движения прутка и закономерностей воздействия на почву уплотняющих элементов

Рассмотрим рабочий процесс вхождения диска в почву в плоскости xOz . Обозначим через точку B момент вхождения прутка в почву. Уравнения движения точки B в почве следующие:

$$\begin{cases} x = x_0 + \zeta; & (0 \leq \zeta \leq CB'; \quad x_0 = AC); \\ z = z_0 + \eta; & (0 \leq \eta \leq BC; \quad z_0 = OK), \end{cases} \quad (3.65)$$

или

$$\begin{cases} \zeta = x - x_0 = x - R_d \sin \alpha_z; & (AC \leq x \leq AB'); \\ \eta = z - z_0 = z - R_d \cos \alpha_z; & (0 \leq z \leq OA), \end{cases} \quad (3.66)$$

где α_z – угол, определяющий положение прутка при вхождении в почву, град, $\alpha = \omega t$ (где t – время, с).

Исходя из данных (см. рис. 3.22), для точки B' уравнения (3.66) можно записать в следующем виде:

$$\zeta = r_{\text{уст}} \alpha_z - r_{\text{уст}} \sin \alpha_z = r_{\text{уст}} (\alpha_z - \sin \alpha_z); \quad (3.67)$$

$$\eta = r_{\text{уст}} - r_{\text{уст}} \cos \alpha_z = r_{\text{уст}} (1 - \cos \alpha_z). \quad (3.68)$$

Траекторией движения прутка в почве в плоскости xOz согласно уравнениям (3.67) и (3.68) будет циклоида. При движении по циклоиде прутки крошит и перемещает частицы почвы, изменяя ее плотность. Вектор скорости движения прутка будет проходить по касательной к траектории циклоиды BB' . При этом угол ψ_z между касательной и прямой BC будет меняться, т. е. он зависит от времени $\psi_z = \psi_z(t)$. Примем, что $\psi_z = b_\omega t$ ($b_\omega = \frac{d\psi_z}{dt}$ – угловая частота движения точки B по циклоиде).

$$v = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad (3.69)$$

где ξ – проекция абсолютной скорости прутка по оси x , м/с;

η – проекция абсолютной скорости прутка по оси z , м/с.

Следовательно:

$$\xi = \xi - b_\omega r_{\text{уст}} \cos \psi_z,$$

$$a_z = a_x + b_\omega r_{\text{уст}} \sin \psi_1 = b_\omega r_{\text{уст}} \sin \psi_z.$$

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

$$a = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad (3.70)$$

где ξ – проекция абсолютного ускорения прутка по оси x , м/с²;

η – проекция абсолютного ускорения прутка по оси z , м/с²,

$$\xi = a_x - b_\omega^2 r_{\text{уст}} \cos \psi_z + b_\omega^2 r_{\text{уст}} \sin \psi_z;$$

$$\eta = b_\omega^2 r_{\text{уст}} \sin \psi_z + b_\omega^2 r_{\text{уст}} \cos \psi_z.$$

Таким образом, уплотнение почвы под прутком происходит со скоростью и ускорением согласно уравнениям (3.69) и (3.70). Так как в процессе работы диска может возникать его скольжение и буксование, 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:

$$\zeta = x - \lambda r_{\text{уст}} \sin \alpha_z, \quad (3.71)$$

$$\eta = z - \lambda r_{\text{уст}} \cos \alpha_z, \quad (3.72)$$

где λ – отношение радиусов идеального диска к реальному ($\lambda > 1$ при скольжении и $\lambda < 1$ при буксовании).

Обозначим коэффициент скольжения через k_c , коэффициент буксования – через k_δ . Так как $k_c = \lambda - 1$, $k_\delta = \lambda + 1$, тогда уравнение движения прутка при скольжении диска запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + k_c) r_{\text{уст}} \sin \alpha_z, \\ \eta = z - (1 + k_c) r_{\text{уст}} \cos \alpha_z. \end{cases} \quad (3.73)$$

При буксовании диска получим:

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + k_8)r_{\text{уст}} \sin \alpha_z, \\ \eta = z - (1 + k_8)r_{\text{уст}} \cos \alpha_z. \end{cases} \quad (3.74)$$

Вариант буксования не рассматривается, так как вероятность его возникновения ничтожно мала.

Отметим, что скольжение диска – нередкое явление при обработке почвы. Обозначим результирующую силу, приходящуюся на один пруток при заглублении в почву, через $d\bar{F}_{\text{п}}$, которую разложим на две составляющие: тангенциальную $d\bar{F}_{\text{пт}}$, направленную по касательной к траектории, и $d\bar{F}_{\text{пн}}$, направленную по внутренней нормали к траектории.

Приблизительно в точке B угол между $d\bar{F}_{\text{п}}$ и $d\bar{F}_{\text{пт}}$ равен α_z . Тогда

$$dF_{\text{пт}} = dF_{\text{п}} \cos \psi_z, \quad dF_{\text{пн}} = dF_{\text{п}} \sin \psi_z. \quad (3.75)$$

В процессе движения точки B по траектории углы α_z и ψ_z будут меняться, приближаясь к нулю в точке B' . Таким образом, влияние касательной и нормальной сил на уплотнение почвенных частиц вдоль траектории движения прутка будет разным. В точке B' уплотнение почвы максимально, и его значение зависит от величины касательной силы.

Примем, что при внедрении прутков уплотняет почву лишь нижней поверхностью. Тогда площадь контакта прутка с почвой составит:

$$S_{\text{пр}} = \pi l_{\text{пр}} \frac{d_{\text{пр}}}{2}. \quad (3.76)$$

Будем считать, что уплотняющее воздействие на почву оказывает только нижняя часть прутка площадью $S_{\text{пр}}$, которая контактирует с почвой, поэтому можно записать:

$$dF_{\text{п}} = k_{\text{см}} S_{\text{пр}} dh_{\text{пр}} = k_{\text{см}} \frac{\pi l_{\text{пр}} d_{\text{пр}}}{2} dh_{\text{пр}}, \quad (3.77)$$

где $dh_{\text{пр}}$ – элементарное значение заглубления прутка в почву, м.

Значения коэффициента объемного смятия в зависимости от агрофизического состояния почвы приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Значения коэффициента объемного смятия $k_{см}$ в зависимости от состояния почвы и ее механического состава [37]

Механический состав почвы	Состояние почвы	Влажность, %	Коэффициент объемного смятия, Н/см ³
1	2	3	4
Супесь	Целина	14–16	83–110
	Стерня зерновых	11–13	68–82
	Слежавшаяся пахота	12–14	41–65
Легкий суглинок	Целина	13–14	136–166
	Стерня зерновых	12–13	109–174
	Слежавшаяся пахота	12–13	73–94
Средний суглинок	Целина	10–11	111–199
	Стерня зерновых	12–14	104–107
	Слежавшаяся пахота	16–17	61–108
Тяжелый суглинок	Целина	19–20	116–182
	Стерня зерновых	13–16	98–174
	Слежавшаяся пахота	12–14	73–106
Глина	Целина	12–15	127–207
	Слежавшаяся пахота	10–13	83–147

Отметим, что $k_{см} dh_{пр}$ играет роль элементарного напряжения в зоне контакта прутка с почвой.

Для касательной силы согласно выражениям (3.75) и (3.77) запишем:

$$\int_0^{P_{пт}} dF_{пт} = \int_0^{h_{п}} k_{см} \frac{\pi l_{пр} d_{пр}}{2} \cos \psi_z dh_{пр},$$

следовательно:

$$F_{пт} = k_{см} \frac{\pi l_{пр} d_{пр} h_{пр}}{2} \cos \psi_z. \quad (3.78)$$

Аналогично для нормальной составляющей силы запишем:

$$F_{пн} = k_{см} \frac{\pi l_{пр} d_{пр} h_{пр}}{2} \sin \psi_z . \quad (3.79)$$

В формулах (3.78) и (3.79) левую и правую части поделим на площадь контакта S , получим:

$$\sigma_\tau = h_{пр} k_{см} \cos \psi_z , \quad (3.80)$$

$$\sigma_n = h_{пр} k_{см} \sin \psi_1 . \quad (3.81)$$

Связь между σ_n и σ_τ в зоне контакта прутка с почвой, согласно закону Кулона–Мора, будет следующей [27]:

$$\sigma_\tau = c + f_{тр. п1} \sigma_n , \quad (3.82)$$

где c – удельное сцепление, МПа (табл. 3.6);

$f_{тр. п1}$ – коэффициент внутреннего трения почвы (см. табл. 3.1).

Таблица 3.6

Значения удельного сцепления c для различных типов почв при определении влажности [90]

Тип почвы по механическому составу	Состояние почвы	Влажность, %	Удельное сцепление, МПа
Супесь	Целина	8–10	0,18
		2–4	0,70
Суглинок	Целина	16–20	0,52
		16–20	0,20
	Стерня зерновых	21–22	0,35
		13–14	0,40
	Почва под посев	19–20	0,20
		21–23	0,05

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

$$x - x_0 = \frac{dz}{dx} (z - z_0) ,$$

или

$$\zeta = \frac{d(z_0 + \eta)}{d(x_0 + \zeta)} \eta = \frac{d\eta}{d\zeta} \eta. \quad (3.83)$$

Так как

$$\frac{d\eta}{d\zeta} = \operatorname{tg} \psi_z,$$

следовательно:

$$\psi_z = \operatorname{arctg} \frac{\zeta}{\eta}. \quad (3.84)$$

Уравнение (3.82) с учетом формул (3.80) и (3.81) преобразуем следующим образом:

$$h_{\text{п}} k_{\text{см}} \cos \psi_z = c + f_{\text{тр.п1}} h_{\text{п}} k_{\text{см}} \sin \psi_z.$$

Откуда получим:

$$h_{\text{п}} = \frac{c}{k_{\text{см}} (\cos \psi_z - f_{\text{тр.п1}} \sin \psi_z)}. \quad (3.85)$$

Формула (3.85) показывает, что чем больше коэффициент объемного смятия, тем меньше будет глубина заглубления прутка в почву.

Так как $h_{\text{п}} \geq 0$, то из формулы (3.85) следует, что должно выполняться строгое неравенство:

$$\cos \psi_z - f_{\text{тр.п1}} \sin \psi_z > 0,$$

или

$$\cos \psi_z > f_{\text{тр.п1}} \sin \psi_z.$$

Следовательно:

$$\operatorname{ctg} \psi_z > f_{\text{тр.п1}}.$$

Значение $f_{\text{тр.п1}}$ определяется формулой

$$f_{\text{тр.п1}} = \operatorname{tg} \phi_1,$$

где φ_1 – угол внутреннего трения почвы, град:

$$\operatorname{ctg} \psi_z > \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi_1},$$

или

$$\frac{\eta}{\zeta} > \operatorname{tg} \psi_z; \quad \frac{\eta}{\zeta} > f_{\text{тр.п.п.}}$$

С учетом формулы (3.66) запишем:

$$\frac{z - z_0}{x - x_0} > f_{\text{тр.п.п.}} \quad (3.86)$$

При $h_{\text{пр}} = z - (1 + k_c) r_{\text{уст}} \cos \alpha_z$, $x = 1$, с учетом формулы (3.73), неравенство (3.86) примет вид:

$$\frac{h_{\text{пр}}}{l - (1 + k_c) r_{\text{уст}} \sin \alpha_z} > f_{\text{тр.п.п.}} \quad (3.87)$$

Приняв глубину погружения прутка равной 4 см, при шаге установки прутков 0,056 м и величине угла α_z , стремящейся к нулю, была проведена проверка соблюдения условия (3.87) для радиусов окружности установки прутков от 0,145 до 0,25 м. Расчет показал, что для всех радиусов установки условие уплотнения прутком почвы соблюдается.

В результате теоретических исследований закономерностей взаимодействия прутка с почвой получено уравнение, описывающее траекторию его движения при выполнении технологического процесса, и условие уплотнения им почвы. Однако полученные зависимости не позволяют оценить напряжения и деформации, возникающие в почве при заглублении прутка и определяющие крошение и степень уплотнения почвы.

Методы и результаты исследований рациональных параметров катка с кольчато-прутковыми рабочими органами

На качество обработки почвы оказывают влияние следующие геометрические параметры кольчато-пруткового катка: диаметр

дисков, диаметр окружности, на которой закреплены прутки, расстояние между прутками, диаметр прутков, толщина кромки диска и угол ее заточки. Также влияют на качество обработки почвы скорость движения и масса катка. Изменяя данные параметры, в зависимости от физико-механических свойств почвы, можно достигнуть заданного качества обработки.

Почвенный канал (рис. 3.23) представляет собой бетонное основание, изготовленное в виде канала, который, в зависимости от эксперимента, может заполняться почвой различного механического состава. В канале установлена электрифицированная нагрузочная тележка с навесным устройством и набором контрольно-измерительного оборудования.



Рис. 3.23. Установка для исследований работы рабочих органов приставок в лабораторных условиях

На навесное устройство нагрузочной тележки почвенного канала был установлен двухкорпусный плуг (рис. 3.24). Также на нагрузочной тележке были установлены кронштейны для крепления к ней лабораторного образца секции катков. Конструкция кронштейнов позволяет выдерживать ось тяги параллельно горизонту. Привод ведущих колес тележки осуществляется двумя электродвигателями. Скорость движения тележки можно изменять в зависимости от требований эксперимента. Для определения массы секции катков в канале установлены весы на одном уровне с почвой.



Рис. 3.24. Лабораторный образец плуга

Лабораторный образец секции катков (рис. 3.25) состоял из рамы 1, оси 2 с посаженными на ней экспериментальными катками 4 и нагрузочного лотка 3. Расстояние между дисками изменялось распорными втулками.

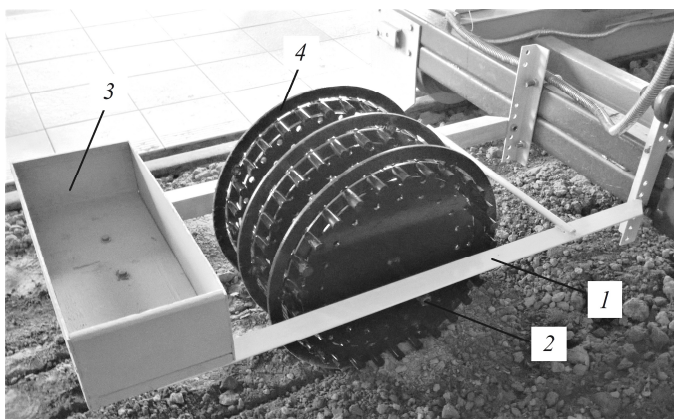


Рис. 3.25. Лабораторный образец секции катков

Нагрузочный лоток заполнялся грузами массой 5, 10, 15 кг (рис. 3.26), в результате масса равномерно распределялась между катками, обеспечивая удельную нагрузку от 20 до 80 Н/см с шагом 20 Н/см.



Рис. 3.26. Набор грузов для проведения лабораторных исследований

Диаметр оси лабораторного образца секции катков был подобран так, чтобы на этой же установке можно было снять основные показатели выпускаемых отечественных и зарубежных рабочих органов приставок для их последующего сравнения с исследуемыми катками.

Основными агротехническими показателями, характеризующими качество обработки почвы приставками, являются: средняя высота неровностей, среднее квадратичное отклонение высоты неровностей, крошение и плотность почвы.

Плотность обрабатываемого слоя при механической обработке почвы претерпевает значительные изменения. Для исследуемого типа почвы (дерново-подзолистая) плотность после вспашки находится в пределах $0,87\text{--}0,91\text{ г/см}^3$ [44–47].

Поскольку накопление и расход влаги, ее передвижение по горизонтам почвы происходят в соответствии с законами влаго-теплопереноса, 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 – $0,7\text{--}0,9\text{ г/см}^3$). Независимо от способа основной обработки

почвы, плотность слоя 5–10 см желательно поддерживать на уровне от 1,10 до 1,15 г/см³, но не более 1,30 г/см³. Такая двухслойная структура пахотного горизонта обеспечивает сохранение влаги в почве, защищает от излишнего испарения и способствует ее накоплению при выпадении осадков [36].

Для обоснования рациональных параметров и режимов работы машины необходимо выбрать параметр оптимизации, а на другие характеристики процесса наложить ограничения.

В лабораторных условиях были проведены исследования по обоснованию конструктивных параметров кольчато-пруткового катка и их влиянию на уплотнение почвы в поверхностном слое (до 10 см).

В качестве основных факторов, влияющих на плотность почвы, были выбраны масса катков, диаметр диска и шаг прутков. Уровни и интервалы варьирования приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Уровни и интервал варьирования факторов
при экспериментальных исследованиях влияния параметров
кольчато-прутковых рабочих органов на плотность почвы по слоям

Уровни	Факторы					
	1-й (масса катков)		2-й (диаметр диска)		3-й (шаг установки прутков)	
	x_1 , кг	X_1	x_2 , мм	X_2	x_3 , мм	X_3
Основной	$x_{10} = 53,5$	0	$x_{20} = 450$	0	$x_{30} = 48$	0
Интервал варьирования	$\Delta x_1 = 26,5$	–	$\Delta x_2 = 60$	–	$\Delta x_3 = 48$	–
Верхний	$x_{1\max} = 80$	+1	$x_{2\max} = 510$	+1	$x_{3\max} = 96$	+1
Нижний	$x_{1\min} = 27$	–1	$x_{2\min} = 390$	–1	$x_{3\min} = 0$	–1

Почву для опытов в почвенном канале подготавливали следующим образом. За сутки до начала опытов ее влажность доводили до величин, соответствующих условиям работы катковых приставок при предпосевной обработке почвы в реальных условиях. Для увлажнения почвы и поддержания значения влажности в заданных

пределах применяли метод искусственного дождевания (рис. 3.27). Поверхность выравнивали с помощью выравнивающего бруса. Для оборота пласта и создания условий, наиболее приближенных к реальным, использовали двухкорпусный плуг. Далее проводили сам опыт: с постоянной скоростью прокатывали лабораторный образец катковой секции.



Рис. 3.27. Распылитель стационарный

После прохода лабораторного образца катковой приставки измеряли значения влажности и плотности почвы по слоям.

Использованы матрица планирования и регрессионный анализ результатов эксперимента по исследованию влияния массы $m_{\text{кпр}}$ катков приставки, диаметра $D_{\text{д}}$ диска и шага l установки прутков на плотность почвы в слое 0–10 см (прилож. Б). Перед проведением опытов проводилась их рандомизация. Проверка гипотез об однородности дисперсий и воспроизводимости опытов по исследованию факторов, влияющих на плотность почвы в слое 0–5 см, выполнялась по G-критерию Кохрена. (Если выполняется условие $G_{\text{экс}} < G_{0,05;6;9}$, следовательно, опыт воспроизводим.) Так как согласно данному условию при обработке опытов:

$$G_{\text{экс}} = \frac{0,0098}{0,0566} = 0,1732 < G_{0,05;6;9} = 0,3067,$$

то полученная оценка подтверждает их воспроизводимость. Аналогично по критерию Кохрена проводится проверка гипотезы об однородности дисперсий и воспроизводимости опытов по исследованию факторов, влияющих на плотность почвы в слое 5–10 см.

$$G_{\text{экс}} = \frac{0,0047}{0,0270} = 0,1740 < G_{0,05;6;15} = 0,2034.$$

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, позволяющие определить значение плотности почвы ρ в зависимости от массы $m_{\text{кпр}}$ катков приставки, диаметра $D_{\text{д}}$ диска и шага l установки прутков:

– для слоя 0–5 см:

$$\text{в кодированном виде: } Y = 0,998 - 0,104X_3,$$

$$\text{в натуральном виде: } \rho = 1,102 - 0,0022l;$$

– для слоя 5–10 см:

$$\text{в кодированном виде: } Y = 0,964 + 0,019X_1 - 0,021X_3 - 0,043 X_1 X_2 - 0,036 X_1 X_3 + 0,043 X_2 X_3 + 0,021 x_1^2 - 0,026 x_3^2,$$

$$\text{в натуральном виде: } \rho = (2,99m_{\text{кпр}}^2 - 1,13l^2 + 49m_{\text{кпр}} + 9,78D_{\text{д}} + 127l - 0,361m_{\text{кпр}}D_{\text{д}} - 2,83m_{\text{кпр}}l + 0,199D_{\text{д}}l + 89000)10^{-5}.$$

Проверка значимости рассчитанных коэффициентов по t -критерию Стьюдента в полученной регрессионной модели по исследованию уплотнения почвы в слое 0–5 см показала, что коэффициенты x_1 и x_2 не значимы. Абсолютная величина коэффициента модели показывает, что в слое почвы 0–5 см при увеличении массы приставки плотность уменьшается, происходит рыхление пласта. Проверка адекватности полученной модели по F -критерию Фишера показала, что она адекватна на уровне значимости 0,05 ($F_{\text{экс}} = 1,118 < F_{0,05;54;7} = 2,274$). На основании полученных результатов эксперимента был построен график (рис. 3.28).

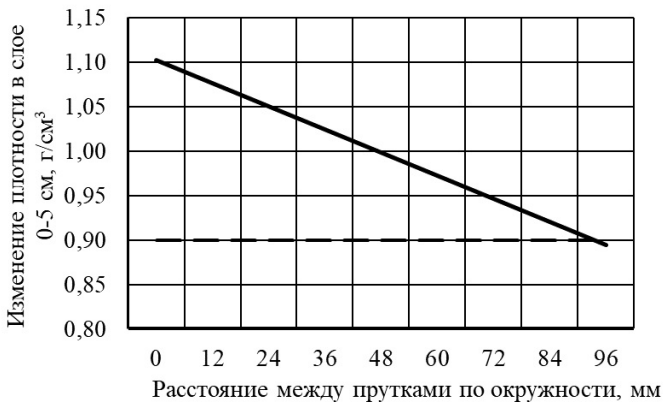


Рис. 3.28. График зависимости изменения плотности почвы в слое 0–5 см от шага установки прутков

Из данных графика (см. рис. 3.28) видно, что наибольшее значение плотности в слое 0–5 см достигается при минимальном расстоянии между прутками (кольчато-дисковый каток). С увеличением шага уменьшается значение параметра, и происходит разуплотнение почвы верхней поверхностью прутков.

Проверка значимости рассчитанных коэффициентов по t -критерию Стьюдента в полученной регрессионной модели по исследованию уплотнения почвы в слое 5–10 см показала, что коэффициенты x_2 и x_2^2 не значимы (прилож. В). Абсолютные величины коэффициентов модели показывают, что в слое почвы 5–10 см все три фактора оказывают значительное влияние на изменение плотности. Проверка адекватности полученной модели по F -критерию Фишера показала, что она адекватна на уровне значимости 0,05 ($F_{\text{экс}} = 2,089 < F_{0,05;90;7} = 2,1$) (рис. 3.29–3.31).

Из данных диаграмм (рис. 3.29–3.31) видно, что с увеличением диаметра диска, при постоянной массе груза, увеличивается плотность в слое 5–10 см, что связано с увеличением пятна контакта катка с почвой, т. е. тот же вес распределяется по большей площади, за счет этого каток заглубляется на меньшую глубину.

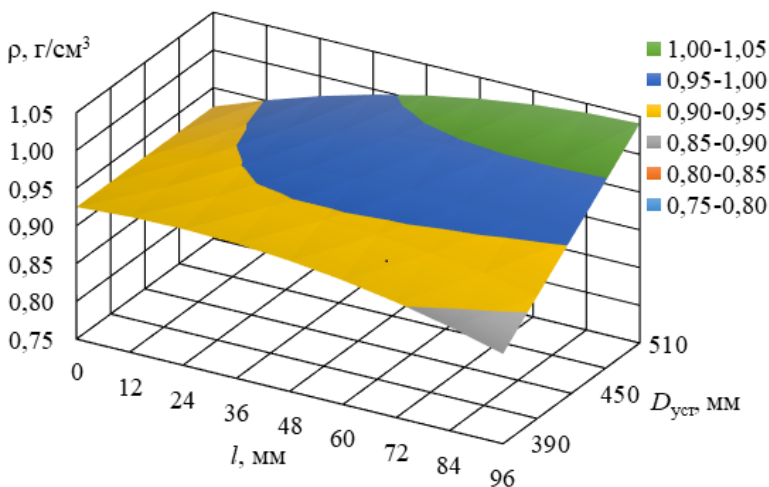


Рис. 3.29. Диаграмма зависимости плотности почвы в слое 5–10 см от диаметра диска и расстояния между прутками при массе катка 27 кг

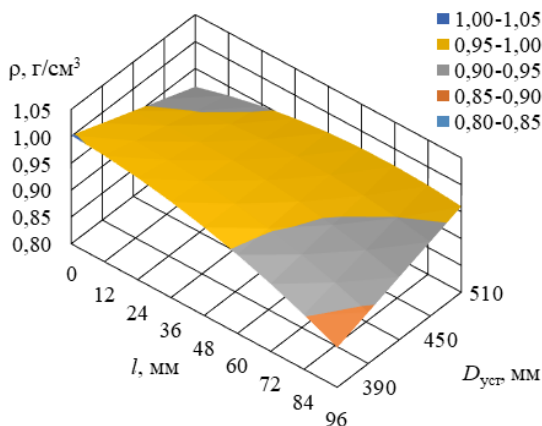


Рис. 3.30. Диаграмма зависимости плотности почвы в слое 5–10 см от диаметра диска и расстояния между прутками при массе катка 53,5 кг

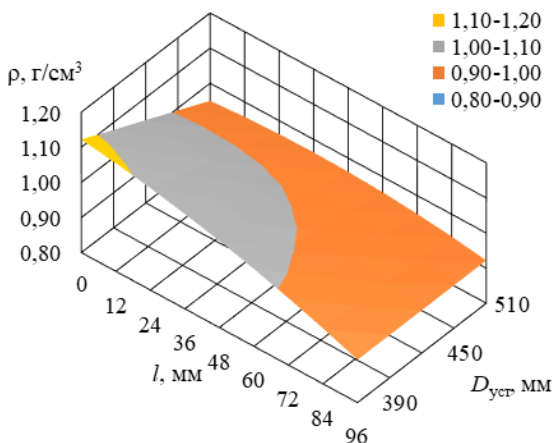


Рис. 3.31. Диаграмма зависимости плотности почвы в слое 5–10 см от диаметра диска и расстояния между прутками при массе катка 80 кг

С целью определения рациональных параметров кольчато-пруткового рабочего органа, при которых достигается требуемая плотность почвы, был проведен поиск экстремальных значений регрессионного уравнения. Для этого уравнение последовательно продифференцировано по X_1 , X_2 , X_3 , полученные уравнения приравнены к нулю и составлена система уравнений.

$$\begin{cases} 0,019 + 0,042X_1 - 0,043X_2 - 0,036X_3 = 0; \\ -0,043X_1 = 0; \\ -0,036X_1 + 0,043X_2 - 0,052X_3 = 0. \end{cases}$$

Решение приведенной системы уравнений показало, что при массе катков приставки 53,5 кг, диаметре диска 0,465 м, диаметре установки прутков 0,405 м и шаге между прутками 0,058 м плотность почвы составит $\rho = 0,96 \text{ г/см}^3$. Для увеличения плотности почвы в слое необходимо увеличивать массу груза.

3.3. Особенности воздействия сферического рабочего органа катковой приставки на почву

Рассмотрим закономерности взаимодействия сферического рабочего органа сельскохозяйственной машины с почвой. Сферическая поверхность диска при поверхностной обработке играет роль рыхлителя и уплотнителя почвенного пласта, поэтому конструктивные параметры и масса диска определяют прогнозируемую плотность и пористость почвы после обработки.

При теоретических исследованиях использован подход, изложенный в работах [1, 2]. Рассмотрим равномерное перемещение диска диаметра BC по поверхности почвы (рис. 3.32).

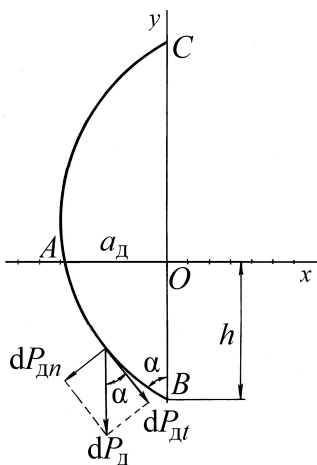


Рис. 3.32. Схема сил, действующих на диск при взаимодействии с почвой

Считаем диск абсолютно жестким телом, погруженным в почву на постоянную глубину h . Поверхность диска BAO , погруженную в почву, можно разбить на элементарные площадки. На каждой из данных площадок будет действовать элементарная сила dP_d , которую можно представить как

$$dP_d = dP_{дн} + dP_{др}, \quad (3.88)$$

где $dP_{дн}$ – нормальная составляющая элементарной силы dP_d ;

$dP_{др}$ – тангенциальная (касательная) составляющая элементарной силы dP_d .

Так как диск заглубляется на небольшую в сравнении с его диаметром глубину (4–8 см), то силами сопротивления со стороны почвы можно пренебречь. По этой же причине можно считать, что угол, отсеченный от вершины сферы плоскостью BC и самой поверхностью BAC , будет примерно равен углу между силой dP_d и ее тангенциальной составляющей $dP_{др}$ и равен α . Тогда можно записать:

$$dP_{др} = dP_d \cos \alpha; \quad dP_{дн} = dP_d \sin \alpha. \quad (3.89)$$

Анализ формул (3.89) показывает, что с увеличением угла α касательные силы уменьшаются, нормальные – увеличиваются. Это может быть учтено при оценке плотности почвы. Контактная поверхность диска с почвой будет составлять четвертую часть площади поверхности конуса с образующей $S = BA$ и основанием радиуса a_d . Тогда элементарную площадь взаимодействия можно рассчитать по формуле

$$dA = \frac{\pi da_d ds}{4}. \quad (3.90)$$

Свойства почвы будем учитывать коэффициентом объемного смятия $k_{см}$ (в зарубежной литературе его иногда называют силой удельного уплотнения), некоторые значения которого, в зависимости от агрофизического состояния почвы, приведены в табл. 3.8.

Уплотнение почвы h или силу P_d можно определить из построенного дифференциального уравнения:

$$dP_d = dA k_{см} (h + h_0), \quad (3.91)$$

где h_0 – глубина первичного уплотнения, м.

Значения $k_{см}$ (Н/см³) в зависимости от состояния почвы

Состояние почвы	$k_{см}$
Рыхлая почва	0,5–1,5
Уплотненная почва среднего механического состава	3–8
Уплотненная почва тяжелого механического состава	6–10
Уплотненная сухая почва тяжелого механического состава	12–20

Отметим, что величины $k_{см}h$ и $k_{см}h_0$ играют роль действующего напряжения и напряжения первичного уплотнения со стороны диска. Уравнение (3.91) можно записать следующим образом:

$$P_d = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\cos \alpha} \int_0^{a_d} da_d \int_0^h k_{см} (h + h_0) dh. \quad (3.92)$$

После интегрирования получим выражение для равнодействующей силы в виде:

$$P_d = \frac{a_{см} k_{см} h(h + 2h_0) \pi}{8 \cos \alpha}. \quad (3.93)$$

Напряжения на контактной поверхности диска с почвой будут определяться следующей зависимостью:

$$\sigma = \frac{k_{см} (h + 2h_0)}{8}. \quad (3.94)$$

Как следует из формулы (3.94), напряжение будет зависеть только от глубины погружения диска и физических свойств почвы, в то время как сила P_d зависит от параметров контактной поверхности, глубины погружения диска в почву и угла (геометрической конструкции диска). Направление напряжения будет таким же, как и направление силы P_d , поэтому угол между касательным напряжением σ_t и напряжением σ останется таким же, как между силой P_d и ее тангенциальной составляющей $P_{дт}$. В этом случае можно записать выражения для нормального напряжения, направленного по

нормали к поверхности диска в рассматриваемой точке, и касательного, направленного по касательной к поверхности в той же точке.

Для нормального напряжения запишем:

$$\sigma_n = \frac{k_{\text{см}}(h + h_0) \sin \alpha}{8}. \quad (3.95)$$

Касательное напряжение будет иметь вид:

$$\sigma_t = \frac{k_{\text{см}}(h + h_0) \cos \alpha}{8}. \quad (3.96)$$

Соотношения (3.95) и (3.96) показывают, что с увеличением угла α нормальные напряжения растут, следовательно, возрастает плотность почвы после прохода диска. В то же время с увеличением угла уменьшается влияние на почву касательных напряжений.

Связь между касательными и нормальными напряжениями в зоне контакта выразим известной зависимостью:

$$\sigma_t = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_1 = c + \sigma_n f_{\text{тр.пл}}; \quad (f_{\text{тр.пл}} = \operatorname{tg} \varphi_1). \quad (3.97)$$

Выражение (3.97) представим в логарифмической системе координат:

$$\lg \sigma_t = \lg c + f_{\text{тр.пл}} \lg \sigma_n. \quad (3.98)$$

Если известны напряжения в двух разных точках (1 и 2), то можно приближенно определить коэффициенты сцепления и внутреннего трения.

Коэффициент внутреннего трения представим в виде:

$$f_{\text{тр.пл}} = \frac{\lg \sigma_{t_2} - \lg \sigma_{t_1}}{\lg \sigma_{n_2} - \lg \sigma_{n_1}}. \quad (3.99)$$

Для коэффициента сцепления имеем выражение:

$$\lg c = 0,5(\lg \sigma_{n_1} + \lg \sigma_{n_2}) - f_{\text{тр.пл}}(\lg \sigma_{n_2} - \lg \sigma_{n_1}); \quad \sigma_{n_2} > \sigma_{n_1}. \quad (3.100)$$

В данной задаче главные напряжения σ_1 и σ_3 будут действовать, соответственно, вдоль осей y и x . В этом случае нормальные и касательные напряжения можно выразить через главные:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta; \quad (3.101)$$

$$\sigma_t = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta,$$

где $\theta = (90^\circ - \alpha)$ при условии неглубокого заглубления диска в почву.

Напряженное состояние точки в зоне контакта (зависимость (3.97)) с учетом формулы (3.101) в системе координат главных напряжений представим в виде:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = c + \mu(\sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta). \quad (3.102)$$

Изменение плотности почвы ρ после прохода диска представим в виде:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{H - H_1}{H}}, \quad (3.103)$$

где ρ_0 – начальная плотность почвы до прохода диска, г/см³;

H – глубина пахотного слоя или слоя, определяемого соответствующим технологическим приемом обработки (например, плужная подошва), м;

H_1 – расстояние от пахотного слоя до точек контакта диска с почвой (так в точке B : $H - H_1 = h$), м.

4. АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПАХОТНЫЙ АГРЕГАТ СИЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА УСТАНОВКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

4.1. Установка приставки спереди энергетического средства

Рассмотрим общий случай движения трактора на подъем по поверхности, расположенной под углом α 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 рабочего орудия, скорости движения и других факторов (рис. 4.1).

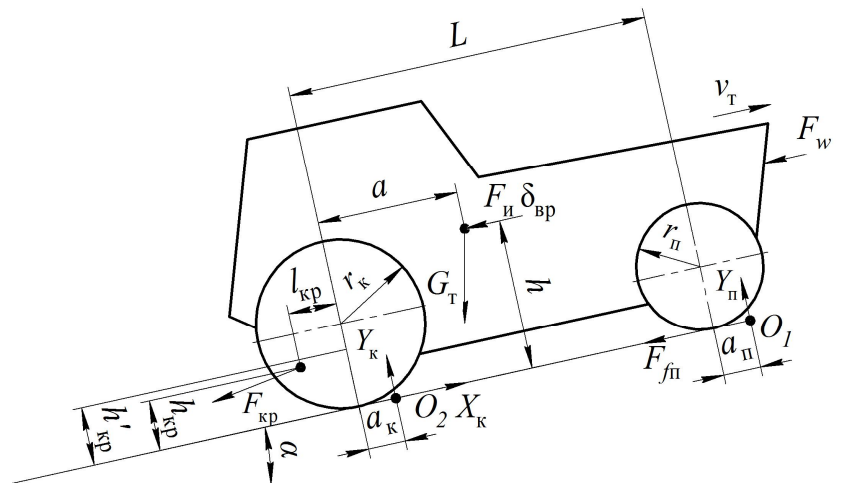


Рис. 4.1. Схема сил, действующих на трактор

При работе трактора «Беларус» с плугом ПН-3-35 мгновенные значения нагрузки $F_{кр}$ существенно отличаются от средних (рис. 4.2) [1]. Для удобства расчетов продлим направление силы тягового сопротивления до пересечения с плоскостью, проходящей через ось ведущих колес, и 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, м.

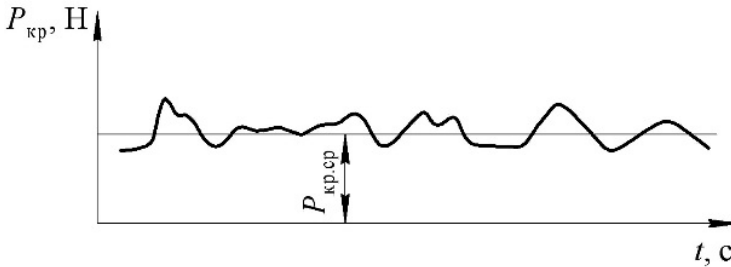


Рис. 4.2. Кривая изменения нагрузки на крюке в реальных эксплуатационных условиях при работе с постоянной скоростью

Сила тяжести трактора G_T , Н, приложенная в центре тяжести и направленная вертикально вниз, определяется по формуле

$$G_T = m_T g,$$

где m_T – масса трактора, кг.

Сила тяжести раскладывается на две составляющие: $G_T \cos \alpha$ (перпендикулярна к направлению движения) и $G_T \sin \alpha$ (параллельна к направлению движения). Тогда:

$$G_T = \left(G_T^2 \cos^2 \alpha + G_T^2 \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} = \left(m_T^2 g^2 \cos^2 \alpha + m_T^2 g^2 \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Сила сопротивления воздуха F_w , приложенная в центре парусности, который расположен на одной высоте $h_{цт}$ 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

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

где k_w – коэффициент обтекаемости;

ρ_w – плотность воздуха, $\rho_w = 1,293 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

S_T – площадь лобовой поверхности трактора (площадь проекции контура трактора на плоскость, перпендикулярную направлению движения), m^2 .

Равнодействующая Y_n нормальных реакций почвы на ведомые колеса приложена на расстоянии a_n по ходу движения от геометрической оси ведомых колес, перпендикулярной направлению движения. При этом она создает момент сопротивления качению ведомых колес:

$$M_{f_n} = Y_n a_n.$$

Равнодействующая Y_k нормальных реакций почвы на ведущие колеса (цепной вес) приложена на расстоянии a_k по ходу движения от геометрической оси ведущих колес, перпендикулярной направлению движения. При этом она создает момент сопротивления качению ведомых колес:

$$M_{f_k} = Y_k a_k.$$

Сила сопротивления F_f перекачиванию трактора 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: $F_{fn} + F_{fk}$. Она направлена против движения и обусловлена необратимыми деформациями почвы под колесами, гистерезисными потерями в пневмошинах, потерями на трение при скольжении ведомых колес. Ее величину можно определить по формуле

$$F_f = G_T f \cos \alpha,$$

где f – коэффициент сопротивления перекачиванию трактора по почве (в зависимости от состояния агрофона для пахоты $f = 0,06-0,10$).

Касательная сила тяги F_{kf} ведущих колес трактора – это 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. Касательная сила тяги создается в пятне

контакта колеса с почвой каждого ведущего колеса на расстоянии, равном радиусу r_k колеса. Эта сила создает ведущий момент и рассчитывается по формуле

$$M_{\text{вед}} = (F_{\text{кф}} - F_{f_k})r_k + Y_k a_k.$$

Разность сил $F_{\text{кф}} - F_{f_k} = X_k$ (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

$$F_{\text{кф}} = \varphi_{\text{исп}} Y_k,$$

где $\varphi_{\text{исп}}$ – коэффициент использования сцепного веса Y_k .

Предельное значение касательной силы тяги можно определить по формуле

$$F_{\text{кф max}} = \varphi_{\text{сц}} Y_k,$$

где $\varphi_{\text{сц}}$ – экспериментально определяемый коэффициент сцепления движителя с почвой. В зависимости от состояния агрофона для пахоты $f = 0,7-0,9$.

Движение трактора возможно при соблюдении условия:

$$F_{\text{кф}} = F_{\text{кр}} \cos \gamma_{\text{кр}} + k_w \rho_B S_T v_T^2 + f(G_T + \cos \alpha + F_{\text{кр}} \sin \gamma_{\text{кр}}) \pm G_T \sin \alpha \pm \delta_{\text{вр}} F_{\text{и}},$$

где $\delta_{\text{вр}} F_{\text{и}}$ – суммарная сила инерции поступательно движущихся и вращающихся масс трактора, возникающая при неравномерной скорости движения, Н, где $\delta_{\text{вр}}$ – коэффициент условного увеличения масс поступательно движущейся части трактора (коэффициент учета вращающихся масс), $F_{\text{и}}$ – сила инерции поступательно движущихся масс, Н:

$$\delta_{\text{вр}} = 1 + \frac{I_{\text{пр}}}{(mr_k^2)},$$

где $I_{\text{пр}}$ – приведенный к оси ведущих колес момент инерции всех вращающихся масс двигателя и трансмиссии, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

m – масса поступательно движущихся частей трактора, кг.

Коэффициент $\delta_{вр}$ зависит от передаточного отношения трансмиссии и массы трактора и находится в пределах 1,05–1,25.

Значения нормальных реакций Y_k и Y_n на задние и передние колеса трактора существенно влияют не только на показатели их

тягово-сцепных свойств ($f = \frac{F_f}{(Y_n + Y_k)}$ и $\phi_{исп} = \frac{F_k}{Y_k}$ (для тракторов

с одним ведущим мостом) или $\phi_{исп} = \frac{F_k}{(Y_n + Y_k)}$ (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, чтобы $Y_{кст} = (0,65–0,70)G$. Уменьшение веса, приходящегося на задние колеса, ухудшает сцепные свойства трактора, 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 результаты опытов показывают, что при малом значении Y_n нарушается агротехника выполняемой технологической операции (выглабляются орудия, неравномерна глубина обработки и пр.). Поэтому необходимо корректировать, регулировать значение реакции Y_n или 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.

Простейший способ регулирования положения мгновенного центра вращения навесной машины – это изменение угла наклона верхней тяги навесного устройства.

Для корректирования значения Y_n без остановки трактора используют гидроцилиндр навесного устройства, в котором регулируют давление и, таким образом, поддерживают значение Y_n в требуемых пределах. Чтобы предотвратить отрыв опорных колес орудия от почвы или излишнее заглубление колес, гидроцилиндр оснащают полуавтоматическим устройством, стабилизирующим заданный уровень давления в гидросистеме.

Корректоры нагрузок того или иного типа устанавливают на колесных тракторах в основном с целью увеличения сцепного веса и уменьшения, таким образом, буксования ведущих колес. Для уточнения этого значения корректоры часто называют гидроувеличителями сцепного веса, или догрузателями ведущих колес трактора.

На пахоте некоторые тракторы идут правыми колесами по дну борозды, образованной за предыдущий проход, а левыми – по поверхности необработанного поля. 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.

Наибольшая 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. Даже на достаточно ровных полях с однородной структурой эту задачу трудно решить без применения автоматических устройств, управляющих силовым гидроцилиндром навесной системы. Одним из таких устройств является позиционно-силовой регулятор. 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.

Большинство тракторов оснащены задней и передней навесными системами. При этом одновременно с орудием задней навески могут использоваться орудия передней.

Рассмотрим агрегат, состоящий из навесного плуга и приставки, навешенной спереди трактора (рис. 4.3). Данный вариант применяется при использовании навесных плугов, когда масса сельскохозяйственной машины ограничивается подъемной способностью задней навески трактора.

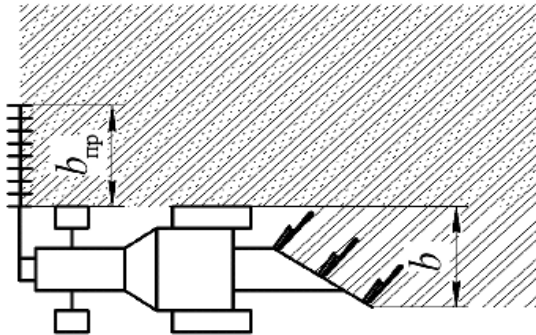


Рис. 4.3. Схема установки приставки спереди трактора:
 $b_{пр}$ – ширина захвата приставки; b – ширина захвата плуга

Из представленной схемы можно выделить несколько условий установки приставок спереди трактора, основными из которых являются отсутствие необработанного пласта почвы и наличие повторного прохода рабочих органов приставки по уже пройденному или невспаханному участкам. Для качественной и согласованной работы рабочих органов данного комбинированного пахотного агрегата необходимым условием [48, 60] является следующее:

$$b = 1,1b_{пр}. \quad (4.1)$$

Для комбинированного пахотного агрегата с установленной на передней навеске трактора приставкой найдем величины нормальных реакций N_k и $N_{п1}$, действующих со стороны почвы, соответственно, на задние и передние колеса трактора (рис. 4.4) [54].

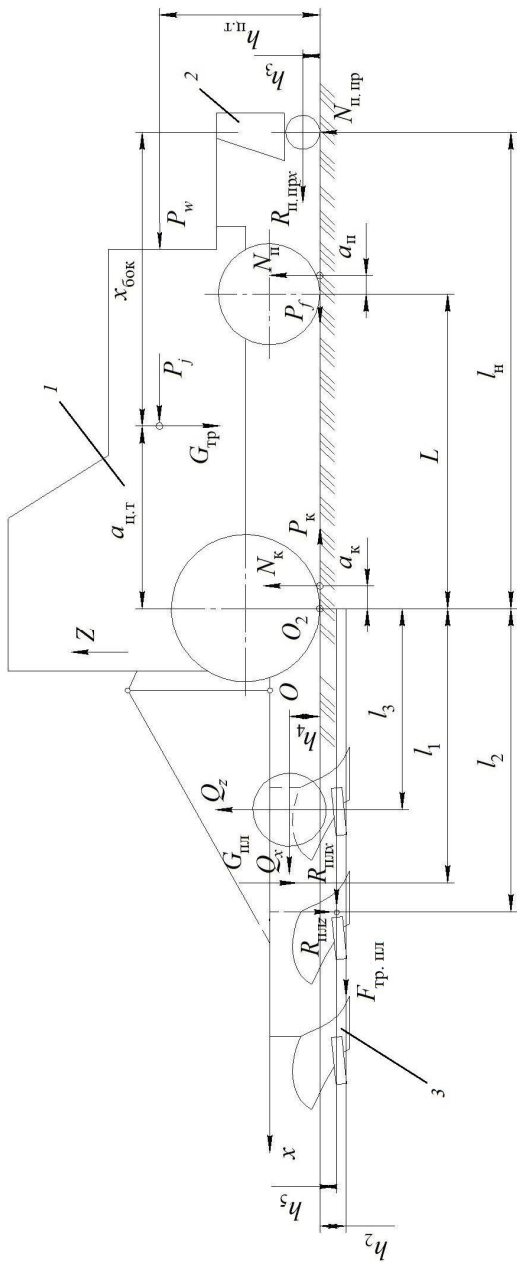


Рис. 4.4. Схема сил, действующих на пахотный комбинированный агрегат:
 1 – трактор; 2 – приставка; 3 – плуг

Значения нормальных реакций N_k и N_n на задние и передние колеса трактора существенно влияют не только на показатели их тягово-сцепных свойств ($f = F_f / (N_n + N_k)$ и $\varphi_{исп} = F_k / N_k$ (для тракторов с одним ведущим мостом) или $\varphi_{исп} = F_k / (N_n + N_k)$ (для тракторов с двумя ведущими мостами)), но и на показатели тормозных свойств, управляемость, устойчивость и прочность ходовой системы [19].

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, чтобы $N_k = (0,65-0,70)G_{тр}$. Уменьшение веса, приходящегося на задние колеса, ухудшает сцепные свойства трактора, 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.

Для повышения тягово-сцепных свойств трактора необходимо уменьшить реакцию почвы $N_{ппр}$ на опорные колеса орудия. Однако результаты опытов показывают, что при малом значении $N_{ппр}$ нарушается агротехника выполняемой технологической операции (выглубляются орудия, что ведет к неравномерности глубины обработки). Поэтому необходимо корректировать значение реакции $N_{ппр}$ или ликвидировать опорные колеса, выполняя условия агротехники другим способом, например, регулированием и стабилизацией тягового сопротивления $R_{плх}$ и силы $R_{плх} \operatorname{tg} \theta$ [84].

Для определения влияния силы $N_{ппр}$ на реакцию N_n рассмотрим условие равновесия агрегата относительно точки O_2 опоры одного из колес.

Условие равновесия относительно точки O_2 запишется в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n M_{O_2}(F_k)_i = 0,$$

$$N_{ппр} l_n + R_{ппрх} h_3 + P_w h_{ц.т} - G_{тр} a_{ц.т} + N_n (a_n + L) + N_k a_k - Q_z l_3 - Q_x h_4 + G_{пл} l_1 - R_{плх} h_5 + R_{плз} l_2 - F_{тр.пл} h_2 = 0, \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{kz i} = 0,$$

$$R_{плз} + N_{нkp} - G_{тр} + N_{п} + N_{к} + Q_z - G_{пл} = 0, \quad (4.3)$$

где $N_{ппр}$ – сила противодействия почвы внедрению приставки, Н;

$R_{ппрх}$ – тяговое сопротивление катка, Н;

P_w – сопротивление ветру, Н;

$G_{тр}$ – вес трактора, Н;

$N_{п}, N_{к}$ – соответственно, реакция передних и задних колес трактора, Н;

Q_z – сила противодействия почвы внедрению опорного колеса, Н;

Q_x – сила противодействия почвы движению опорного колеса, Н;

$G_{пл}$ – вес плуга, Н;

$R_{плх}$ и $R_{плз}$ – составляющая силы R , соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскости на плуг со стороны почвенного пласта, Н;

$h_2, h_3, h_4, h_5, h_{ц.т}$ – соответственно, плечи сил относительно точки O_2 , м;

$F_{тр.пл}$ – сила трения корпусов плуга о почву, Н;

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_{н}, L$ – соответственно, плечи сил относительно точки O_2 , м.

Из уравнений (4.2) и (4.3) можно определить реакции ведущих и ведомых колес $N_{к}$ и $N_{п}$ и их зависимость от величин реакции Q_z и $N_{нkp}$.

На пахоте некоторые тракторы идут правыми колесами по дну борозды, образованной предыдущим проходом, а левыми – по поверхности необработанного поля. 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 плугом. В частности, существенно влияние опорного колеса плуга, которое идет по необработанному полю и создает под действием вертикальной реакции почвы момент, догружающий бороздные и разгружающий полевые колеса трактора. Чем больше нагружено опорное колесо плуга, тем сильнее оно влияет на неравномерность

распределения вертикальных реакций почвы между правыми и левыми колесами трактора. В связи с этим правые и левые ведущие колеса оказываются в разных условиях сцепления с почвой, что отрицательно влияет на тяговые свойства трактора.

Наибольшая 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. Даже на ровных, не засоренных камнями и сорными растениями полях эту задачу трудно решить без применения автоматических устройств, управляющих силовым гидроцилиндром навесной системы. Одним из таких устройств является позиционно-силовой регулятор. При работе с позиционно-силовым регулятором увеличивается производительность агрегата, сцепной вес трактора и уменьшается буксование ведущих колес, чем при работе с опорными колесами на навесном орудии. Однако при этом ухудшается равномерность глубины обработки почвы.

Большинство тракторов оснащаются задней и передней навесными системами. При этом одновременно с орудием задней навески могут использоваться орудия передней.

Запишем для нашего случая уравнения моментов сил, действующих на пахотный агрегат в поперечной плоскости относительно точки присоединения приставки (рис. 4.5, б).

$$\sum_{i=1}^n M_o (F_k)_i = 0,$$

$$-N_{\text{ппп}} \frac{B_{\text{тр}}}{2} + N_{\text{плл}} \frac{B_{\text{тр}}}{2} + N_{\text{ппр}} B_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{тр}} + N_{\text{ппр}} (h_{\text{ппр}} - h'_{\text{пр}}) - \quad (4.4)$$

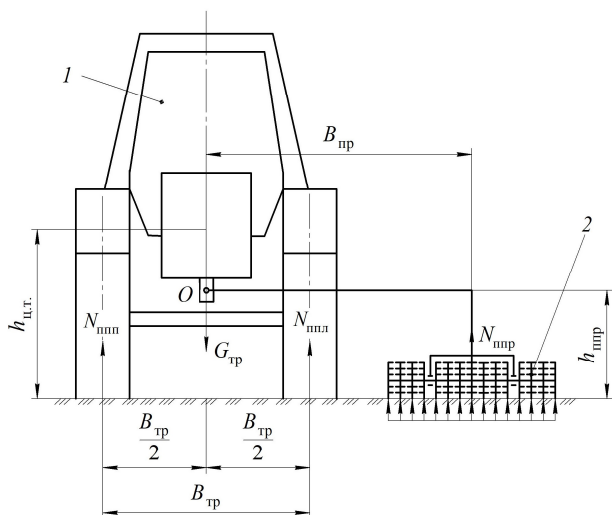
$$- G_{\text{пр}} B_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{тр}} - G_{\text{пр}} (h_{\text{ппр}} - h'_{\text{пр}}) \sin \alpha_{\text{тр}} - G_{\text{тр}} h_{\text{ц.т}} = 0,$$

где $B_{\text{тр}}$ – колея трактора, м;

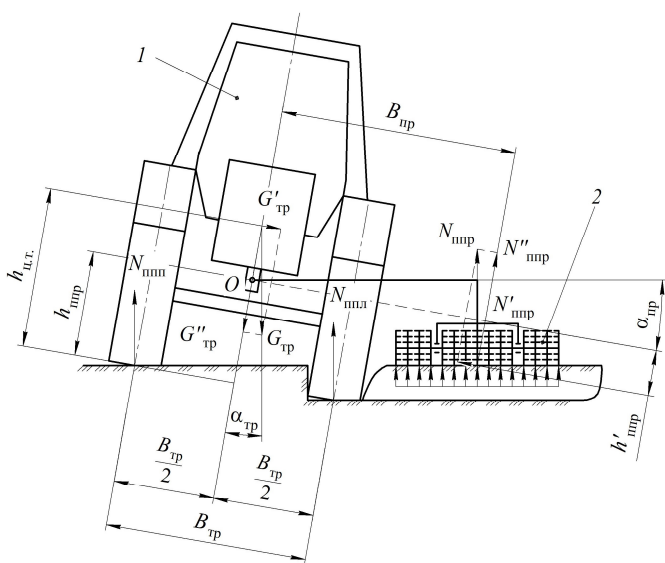
$B_{\text{пр}}$ – плечо силы $N_{\text{ппр}}$ относительно точки О, м;

$\alpha_{\text{тр}}$ – угол наклона трактора относительно вертикальной оси, град.

Зная соотношения между $N_{\text{ппп}}$ и $N_{\text{плл}}$, можно определить допустимую нагрузку на приставку $G_{\text{пр}}$, позволяющую эффективно использовать вес трактора и повысить его управляемость.



a



б

Рис. 4.5. Схема сил, действующих на трактор и приставку в поперечной плоскости при движении вне борозды (*a*) и в борозде (*б*):
1 – трактор; 2 – приставка

4.2. Установка приставки за плугом

Вопросом совмещения основной и поверхностной обработки с применением прицепных дополнительных устройств занимались М.Е. Мацепуро и С.Г. Бабаев [10]. Ими получены следующие зависимости.

При установившемся движении на плуг в горизонтальной плоскости действуют проекции следующих сил (рис. 4.6): силы сопротивления почвы R_k на рабочей поверхности корпуса плуга, реакции стенки борозды на полевою доску N_d , силы тяги $P_{кр}$ и силы сопротивления перекачиванию $R_{п}$, R_6 и R_3 , соответственно, полевого, бороздного и заднего колес.

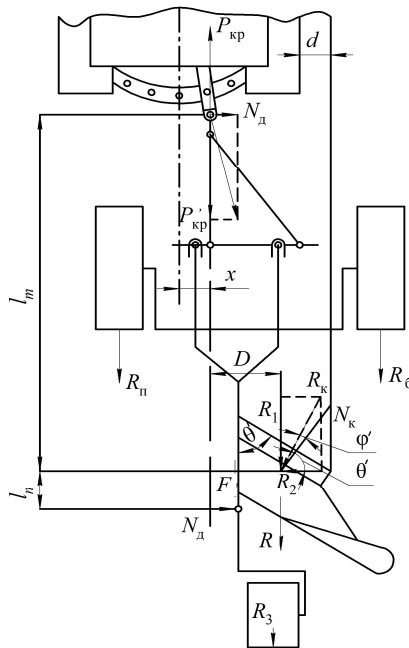


Рис. 4.6. Схема сил, действующих на плуг в горизонтальной плоскости

Реакция стенки борозды на полевою доску составит:

$$N_d = \frac{P_{кр}}{l_m + l_n} \left[\frac{\eta l_m}{\text{tg}(\theta' + \varphi')} + D \right], \quad (4.5)$$

где η – экспериментально выведенный коэффициент (0,50–0,65) [10];

l_m – расстояние от точки прицепа до линии действия силы R_2 , м;

l_n – расстояние от линии действия силы R_2 до точки приложения реакции почвы на полевую доску (точка A), м;

θ' – угол, образованный лезвием лемеха и стенкой борозды, град;

ϕ' – угол отклонения силы R_k от нормали, град;

D – расстояние между линиями действия сил $P_{кр}$ и R , м.

Если прицепная серьга смещена от продольной оси трактора вправо на величину x , то плечо D будет равно:

$$D = \frac{B_r - b}{2} + d - x, \quad (4.6)$$

где B_r – ширина трактора, м;

b – ширина захвата плуга, м;

d – расстояние от стенки борозды до правого колеса трактора, м.

Полное сопротивление определяется по формуле

$$R = P_{кр} = k_{поч} ab. \quad (4.7)$$

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 (см. рис. 4.5).

Для случая крепления дополнительного почвообрабатывающего оборудования (рис. 4.7) возникает дополнительный момент, который рассчитывается по формуле

$$M_{доп} = R_{до} D', \quad (4.8)$$

где $R_{до}$ – сила сопротивления дополнительного оборудования, м;

D' – плечо силы $R_{до}$, м.

Тогда сила полного давления полевой доски на стенку борозды составит:

$$N_{д.полн} = \frac{P_{кр} [\eta l_m \operatorname{ctg}(\theta' + \phi') + D] + R_{до} D'}{l_m + l_n}. \quad (4.9)$$

При этом:

$$D' = \frac{B_r + b_{пр}}{2} - b + d + x_1 - x, \quad (4.10)$$

где x_1 – ширина борозды, м.

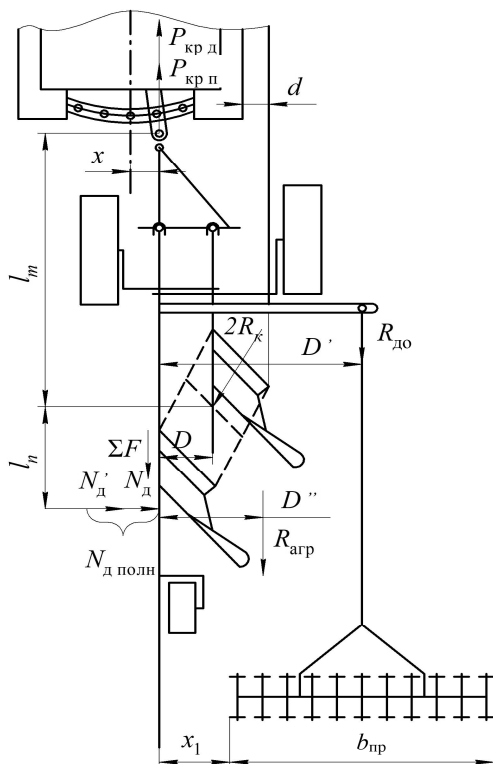


Рис. 4.7. Схема сил, действующих на пахотный агрегат в горизонтальной плоскости

Полученные М.Е. Мацепуро и С.Г. Бабаевым зависимости (4.5), (4.9) позволяют определить влияние дополнительных приспособлений на давление полевой доски [10]. Однако их применение возможно только в прицепных приставках. Также полученные зависимости не позволяют определить рациональные параметры установки приставки относительно плуга.

Вопросами механико-теоретического обоснования пахотных комбинированных агрегатов для совмещения операций обработки почвы в системах интенсивного земледелия занимался Ю.И. Кузнецов [35]. Он описал общие положения о протекании технологического процесса предпосевной обработки почвы, т. е. комплекса операций по ее рыхлению, измельчению комьев, выравниванию и уплотнению; сформулированы и обоснованы требования к этому процессу; обоснованы общие принципы создания комбинированных машин для предпосевной обработки почвы; установлены аналитические связи между параметрами машин для предпосевной подготовки и характеристиками вспаханных почв [35].

В результате проведенных Ю.И. Кузнецовым исследований физико-механических свойств почвенных комков установлено, что их прочность даже при оптимальной влажности (22 %) может достигать больших значений. Значение силы, разрушающей образец почвы при данной влажности, в зависимости от толщины (от 1 до 10 мм) разрушающего штампа составило 1–5 кН. При уменьшении влажности до 14 % прочность образцов увеличивалась в 3 раза, до 6,5 % – в 4–10 раз. Это доказывает, что разрыв между рыхлением почвы и ее измельчением не допустим – глыбы высыхают и упрочняются [35].

Обоснован минимально допустимый диаметр дискового и кольчато-шпорового катка в зависимости от величины деформации почвы под дисками, неровностей поверхности и других условий. Установлено, что диаметр дисков заднего катка комбинированных агрегатов, а также двухрядных катков общего назначения может быть уменьшен с 520 до 300–350 мм без ущерба для качества работы. При этом металлоемкость катков уменьшается на 20 %–30 % [35].

Автор теоретически определил, что место присоединения прицепных дополнительных устройств к плугам должно находиться в середине главного бруса (допустимое смещение назад до 500 мм). Длина соединительной цепи для 8-, 9-корпусных плугов – 5–6 м, для 4-, 6-корпусных – 4–5 м, длина правой ветви цепи – 2,5 м, левой – 2,15 м [35].

Проведенные Ю.И. Кузнецовым исследования были использованы при проектировании приспособления для измельчения почвы, выравнивания, уплотнения на всю глубину пахотного горизонта – ПВР-2,3, ПВР-2,7, ПВР-3,5 (рис. 4.8). Полученные результаты исследований применимы только для прицепных дополнительных

устройств и не учитывают конструктивные особенности навешиваемых непосредственно на раму плуга приставок.

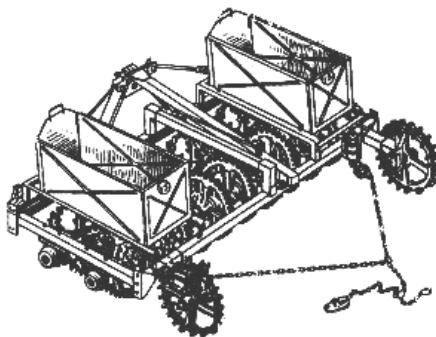


Рис. 4.8. Приспособление ПВП-2,3

Применение прицепных приставок с оборотными плугами создает ряд проблем: при переездах между полями необходимо применять дополнительное транспортное оборудование; перед каждым оборотом плуга приставку отцепляют и прицепляют после оборота заново, что отрицательно сказывается на сменной производительности. Поэтому для оборотных плугов данный способ установки приставок не рекомендуется.

4.3. Установка приставки на раму плуга

Рассмотрим пахотный агрегат, на котором приставка устанавливается на раму навесного плуга (рис. 4.9).

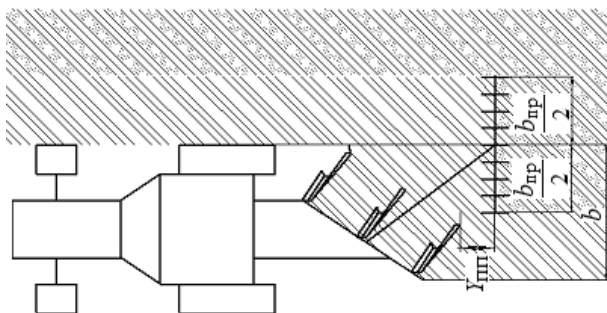


Рис. 4.9. Схема навешивания приставки на раму навесного плуга

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, не попадая на них.

Глубина обработки почвы приставкой определяет, какой из критериев качества (уплотнение, крошение и выравнивание) будет преобладать. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что максимальное крошение пласта рабочими органами приставки достигается при наибольших значениях глубины обработки (не менее 8 см), при минимальной глубине (2–3 см) улучшается выровненность поверхности. Плотность в слое зависит от площади контакта приставки с почвой и глубины обработки [159]. Глубину обработки прицепных приставок изменяют дополнительными грузами. Навесные приставки догружаются за счет сельскохозяйственной машины, с которой агрегируются, поэтому для навесных приставок в каждом конкретном случае необходимо определять допустимую максимальную нагрузку, при которой достигается требуемое качество выполнения основной обработки.

Рассмотрим случай установки приставки на раму плуга, т. е. при догрузке помимо собственного веса катка будут использоваться силы, действующие на плуг. Силы, действующие на комбинированный пахотный агрегат в плоскости zOy , показаны на рис. 4.10.

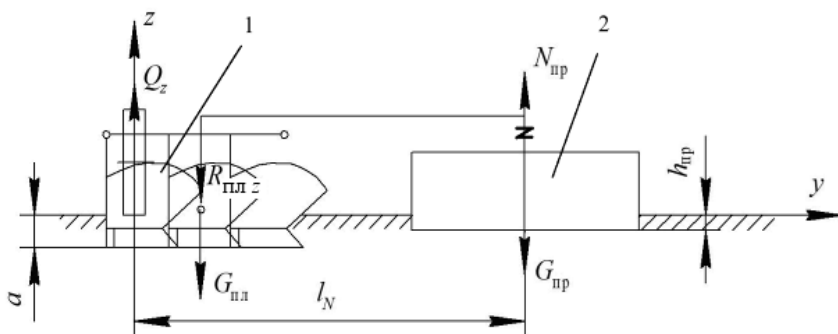


Рис. 4.10. Схема сил, действующих на комбинированный пахотный агрегат:
1 – плуг, 2 – приставка

$$R_{плz} + G_{пл} + G_{пр} = Q_z + N_{пр}. \quad (4.11)$$

Сила давления приставки на почву $G_{\text{пр}}$ складывается из двух сил:

$$G_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} + F_{\text{догр}}, \quad (4.12)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вес катка, Н;

$F_{\text{догр}}$ – сила догружения, Н.

Перед началом работы устанавливается глубина обработки приставки $h_{\text{пр}}$. Если для обеспечения заданной глубины обработки хватает собственного веса катка $P_{\text{пр}}$, то силам $R_{\text{плз}}$ и $G_{\text{пл}}$ противодействует сила Q_z , а сила $F_{\text{догр}}$ стремится к 0. Если силы давления приставки $G_{\text{пр}}$ недостаточно для обеспечения глубины обработки, погружение происходит за счет сил R_z и G .

Силу $R_{\text{плз}}$ находим по формуле [84, с. 213]:

$$R_{\text{плз}} \approx 0,25R_{\text{плх}}. \quad (4.13)$$

Горизонтальная составляющая силы R определяется по формуле [84, с. 213]:

$$R_{\text{плх}} = k_{\text{поч}} ab, \quad (4.14)$$

где $k_{\text{поч}}$ – удельное сопротивление почвы, Н/м²;

a – глубина вспашки, м;

b – ширина захвата плуга, м.

Сила противодействия почвы внедрению приставки $N_{\text{пр}}$ зависит от геометрических параметров ее рабочих органов, которые подбираются в зависимости от требуемого качества обработки почвы.

В формулу (4.11) подставим значения из формул (4.12)–(4.14) и получим:

$$F_{\text{догр}} = Q_z - 0,25k_{\text{поч}} ab - G_{\text{пл}} - P_{\text{пр}} + N_{\text{пр}}. \quad (4.15)$$

Если в формуле (4.15) принять $Q_z = 0$, можно определить допустимое значение силы догружения приставки, при котором не ухудшится качество основной обработки почвы. Формула примет вид:

$$F_{\text{догр}} = N_{\text{пр}} - 0,25k_{\text{поч}} ab - G_{\text{пл}} - P_{\text{пр}}. \quad (4.16)$$

Анализ зависимости (4.16) показывает, что на величину догружающей силы оказывают влияние геометрические параметры приставки, ее вес и состояние почвы.

Следует отметить, что в приставках, применяемых с многокорпусными плугами, допустимая сила догружения будет ограничена прочностными характеристиками рамы. Поэтому катки приставки стремятся расположить как можно ближе к плугу для уменьшения величины напряжений, возникающих в раме приставки.

Рассмотрим пахотный агрегат, на котором приставки установлены на раму многокорпусного полунавесного плуга (рис. 4.11).

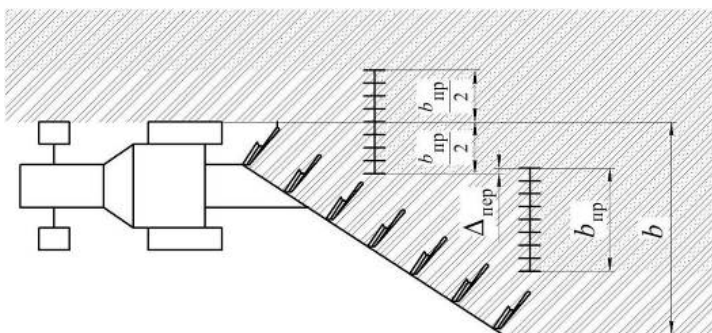


Рис. 4.11. Схема навешивания приставок на раму полунавесного плуга

Анализ данной схемы показал, что условия эффективной работы для данного способа агрегатирования следующие: 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 или иметь наименьшую величину перекрытие Δ между проходами приставок.

Можно выделить несколько положений установки приставки (рис. 4.12): 1 – приставка обрабатывает предыдущий ряд; 2 – приставка движется частично по предыдущему и новому ряду; 3 – только по новому ряду. При выборе положения приставки относительно корпусов плуга следует учитывать вышеназванные условия ее эффективной работы и стремиться к ее минимальной металлоемкости.

Одним из конструктивных отличий корпуса плуга от рабочих органов других почвообрабатывающих орудий является несимметричность. При этом часть энергии затрачивается непроизводительно, причем ее доля неоправданно велика – до 70 %, из которых доля

отвала и лемеха составляет 75 %–80 % (на лемех – 50 %–60 %) [3]. Энергия, непосредственно затрачиваемая на выполнение процесса вспашки, распределяется следующим образом: на деформацию почвы – 16 %, подъем и перемещение почвенного пласта – 12 %, резание почвы – 12 % и на преодоление сил трения – 60 % [3, 34]. Первые три вида работы относятся к полезной работе, преодоление сил трения – технологически бесполезная работа, превышающая по объему полезную.

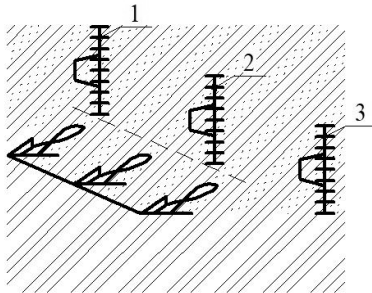


Рис. 4.12. Схема расположения приставки относительно корпуса плуга:
 — — — линия наименьшего расстояния установки приставок
 относительно плуга

Силы, действующие на полунавесной плуг в горизонтальной плоскости, показаны на рис. 4.13. При установке приставок на раму плуга (рис. 4.14) к действующим в горизонтальной плоскости силам добавляются тяговые сопротивления катковых приставок.

Рассмотрим систему сил, действующих на пахотный агрегат в горизонтальной плоскости относительно точки присоединения плуга O при навешивании на него приставок.

$$\sum_{i=1}^n M_o(F_k)_i = 0;$$

$$R_{xy} L_{пп} + R_{пп1} L_{пп1} - R_{пп3} L_{пп3} - (Q_{кк1} L_{кк1} + Q_{кк2} L_{кк2} + Q_{кк3} L_{кк3}) - F_d L_d = 0, \quad (4.17)$$

где R_{xy} – суммарное сопротивление всех корпусов плуга, Н;
 $R_{пп1}, R_{пп3}$ – тяговое сопротивление катковых приставок, Н;
 $Q_{кк1}, Q_{кк2}, Q_{кк3}$ – сопротивление колес плуга, Н;
 F_d – суммарное сопротивление стенки борозды, воспринимаемое полевыми досками корпусов плуга, Н.

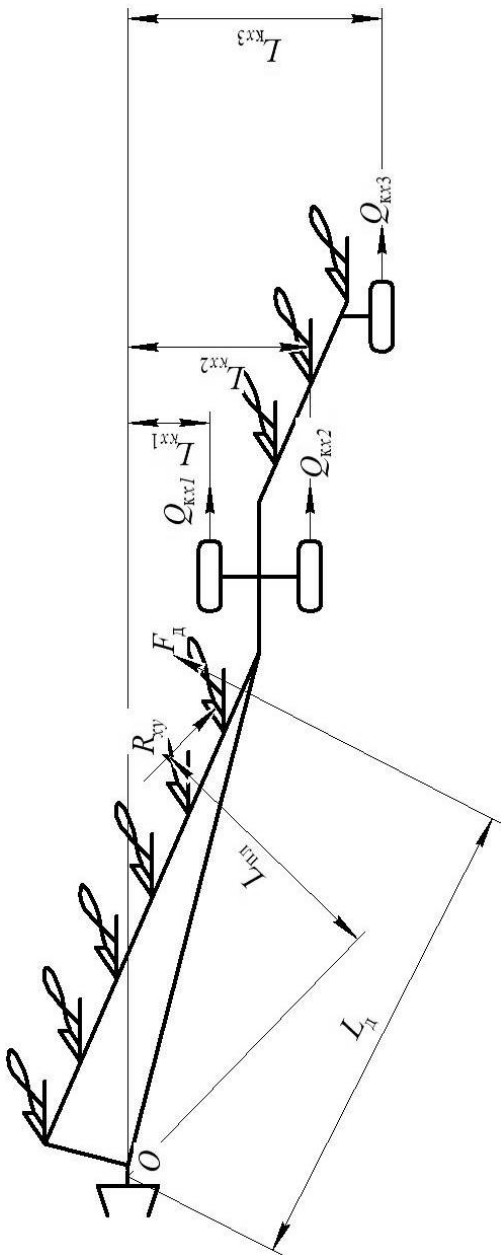


Рис. 4.13. Схема сил, действующих на полунавесной плуг в горизонтальной плоскости

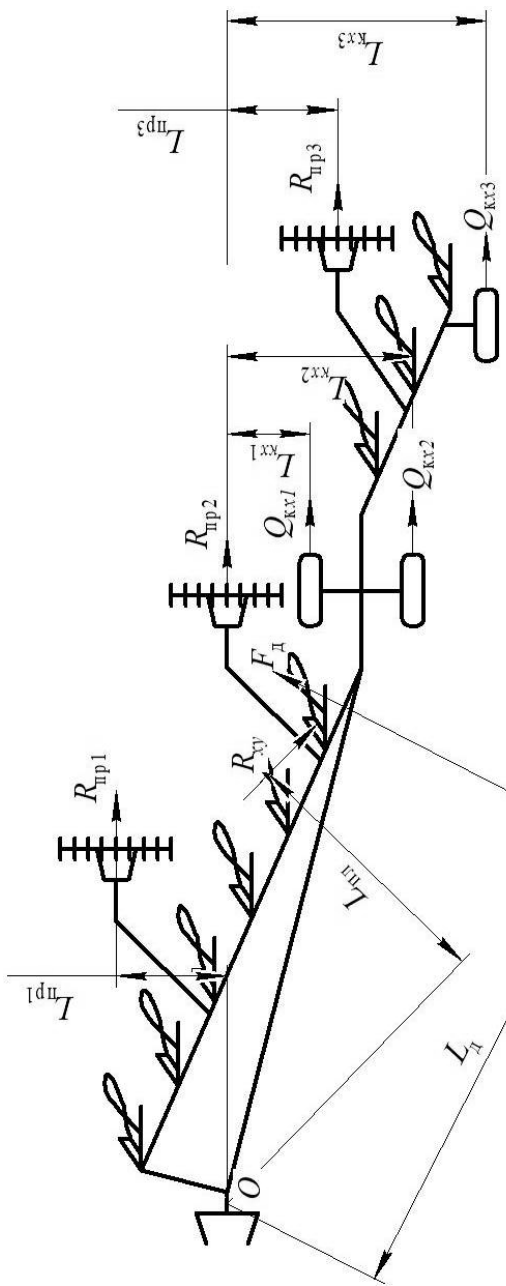


Рис. 4.14. Схема сил, действующих на плуг с закрепленными на раме приставками в горизонтальной плоскости

При установке приставки на раму плуга (см. рис. 4.14) возможны три случая действия сил: сопротивление катковых приставок относительно точки O располагается справа ($R_{\text{пр}1}$), на одной линии ($R_{\text{пр}2}$) и слева ($R_{\text{пр}3}$).

Если сила $R_{\text{пр}1}$ располагается относительно точки O справа по направлению движения, то возникающий момент $R_{\text{пр}1}L_{\text{пр}1}$ по направлению совпадает с моментом $R_{\text{ху}}L_{\text{пл}}$. В результате увеличивается сила трения полевой доски о стенку борозды, что приводит к увеличению энергетических затрат на ее преодоление, следовательно, к росту технологически бесполезной работы и возрастанию расхода топлива, а также к более интенсивному износу полевых досок. Уменьшить момент силы $R_{\text{пр}1}$ можно за счет уменьшения ее плеча $L_{\text{пр}1}$.

Если вектор силы $R_{\text{пр}2}$ проходит через точку O , то возникающий момент будет равен нулю, так как отсутствует плечо силы $L_{\text{пр}2}$. Следовательно, установленная таким образом приставка будет оказывать минимальное воздействие на перераспределение сил и приведет к увеличению необходимого тягового усилия, следовательно, и затрат топлива.

При установке приставки слева от точки O по направлению движения возникающий момент $R_{\text{пр}3}L_{\text{пр}3}$ совпадает по направлению с моментом $F_{\text{д}}L_{\text{д}}$, что приводит к снижению давления на стенку борозды, следовательно, к снижению затрат энергии, необходимой для преодоления силы трения (бесполезной работы плуга). В результате сопротивление катковой приставки может быть компенсировано снижением силы трения полевых досок, что позволит снизить энергоемкость и сократить потребление топлива. Для увеличения положительного эффекта от момента $R_{\text{пр}3}L_{\text{пр}3}$ необходимо увеличить плечо $L_{\text{пр}3}$. Однако следует учитывать, что величина плеча ограничена шириной обработанной поверхности поля.

Анализ сил, действующих на плуг с катковыми приставками, показывает, что размещение приставок слева от точки зацепа по ходу движения позволяет снизить затраты энергии на проведение вспашки и сократить износ рабочих органов за счет снижения бесполезной работы, связанной с преодолением сил трения, возникающих на полевых досках корпусов плугов.

Наименьшее расстояние установки катковых приставок с кольчато-прутковыми рабочими органами определяется условием полного оседания частиц почвы, которым была передана энергия движения

корпуса плуга до начала воздействия на почву рабочих органов (рис. 4.15). То есть в момент соприкосновения рабочего органа дополнительного устройства почвенный пласт должен быть неподвижен.

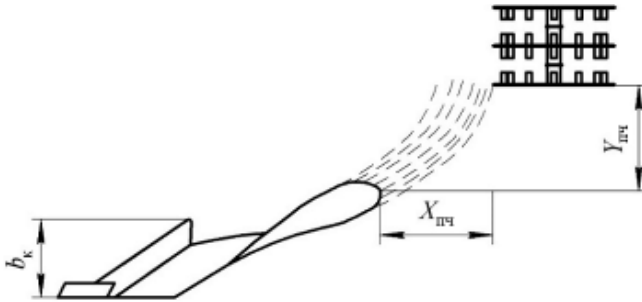


Рис. 4.15. Схема установки дополнительных почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга

Геометрические размеры приставок выбираются в зависимости от способа установки их на пахотных агрегатах и ширины захвата плуга. При этом следует учитывать, что важным параметром установки, влияющим на энергоемкость процесса, является наименьшее расстояние в направлении движения между осью приставки и корпусом плуга. Поэтому определение траектории движения частиц почвы по отвальной поверхности плуга и дальности их отбрасывания является одной из первостепенных задач.

5. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЛУГА

5.1. Определение кинематических параметров движения частицы почвы по рабочей поверхности корпуса плуга и траектории ее падения на поверхность поля

Проектированию рабочих поверхностей корпусов плугов и закономерностей движения по ним почвенных частиц посвящены работы многих известных ученых, занимающихся вопросами земледельческой механики [22, 23, 28, 38, 48, 49, 50, 91, 96].

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

Для изучения закономерностей оборачивания и отбрасывания почвенного пласта корпусом плуга примем следующие допущения: скорость агрегата со временем не изменяется, поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны $R_{отв}$. Почвенный пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала (рис. 5.1). Данное движение рассматривается как относительное (система отсчета связана с отвалом). При подрезании слоя почвы величину относительной скорости принимаем равной величине скорости агрегата: $v_{пч0} = v_{агр}$. Слой почвы начинает двигаться по рабочей поверхности корпуса со скоростью $v_{пч0} \sin \alpha_{л}$, движение вдоль отвала осуществляется со скоростью $v_{пч0} \cos \alpha_{л}$.

Рассмотрим движение частицы почвы массой $m_{пч}$ по поверхности отвала (дуга AB). В верхней точке B отвала (рис. 5.1) на частицу действуют сила тяжести $G_{пч}$, центробежная сила инерции $F_{пч}$, сила реакции $N_{отв}$ поверхности отвала и сила трения $F_{тр}$.

Сила тяжести рассчитывается по формуле

$$G_{пч} = m_{пч} g. \quad (5.1)$$

Данную силу разложим на две составляющие: $m_{пч}g \sin \gamma_{отв}$ – направлена по касательной к поверхности отвала τ – τ , и $m_{пч}g \cos \gamma_{отв}$ – направлена по нормали n – n к указанной поверхности.

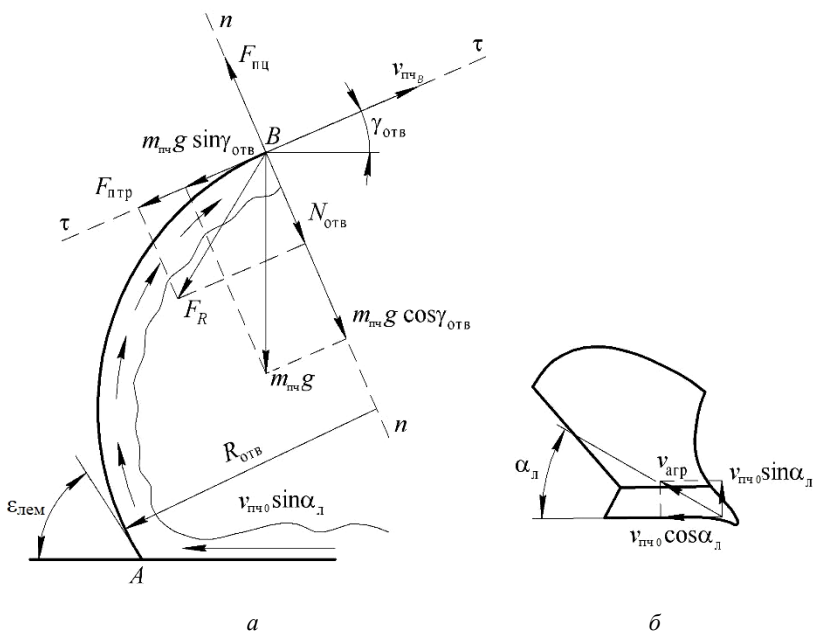


Рис. 5.1. Расчетная схема движения частицы почвы по отвалу корпуса плуга:
 а – сечение, перпендикулярное лемеху; б – корпус плуга (общий вид)

Центробежная сила инерции частицы почвы рассчитывается по формуле

$$F_{\text{пц}} = \frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}0}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}}, \quad (5.2)$$

где $\gamma_{\text{отв}}$ – угол наклона касательной, проведенной к поверхности отвала в точке B , к горизонту, град.

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

Для плугов общего назначения принимаем условие:

$$R_{\text{отв min}} \leq R_{\text{отв}} \leq R_{\text{отв max}}. \quad (5.3)$$

Минимальный и максимальный радиусы определяются по следующим формулам:

$$R_{\text{отв min}} \geq \frac{b_k}{\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_{\text{лем}}\right) \cos \gamma_{\text{лем}}}. \quad (5.4)$$

$$R_{\text{отв max}} = \frac{b_k \sqrt{k_k^2 - 1}}{k_k^2 (\cos \varepsilon_{\text{лем}} - \cos \theta_R)}. \quad (5.5)$$

Угол θ_R определяем по формуле

$$\text{tg} \theta_R = \frac{\sqrt{k_k^2 - 1}}{\cos \gamma_{\text{лем}}}. \quad (5.6)$$

$$k_k = \frac{b_k}{a}. \quad (5.7)$$

При невыполнении неравенства (5.4) минимальный радиус определяется по выражению

$$R_{\text{отв min}} = \frac{\sqrt{k_k^2 - 1}}{k_k (\cos \varepsilon_{\text{лем}} + \sin \Delta \varepsilon_{\text{лем}})}, \quad (5.8)$$

где $\Delta \varepsilon_{\text{лем}}$ – дополнительный угол, на который увеличивается дуга окружности для обеспечения большего прогиба крыла отвала (для культурных отвалов $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 4^\circ - 5^\circ$, для скоростных – $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 5^\circ - 8^\circ$, для полувинтовых – $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 5^\circ - 8^\circ$) [77, 78].

Сила реакции $N_{\text{отв}}$ отвала направлена по нормали.

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

$$F_{\text{тр. п.}} = f_{\text{тр. п.2}} N_{\text{отв}}. \quad (5.9)$$

Значения внешнего коэффициента трения приведены в табл. 3.1. Коэффициент трения зависит от механического состава и влажности почвы, шероховатости рабочих поверхностей, материала рабочих органов, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения почвы (рис. 5.2).

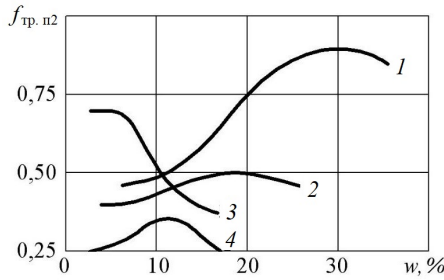


Рис. 5.2. Графики изменения коэффициента трения от влажности и механического состава почвы [67, 77]:
 1 – тяжелые суглинки и глина; 2 – средние суглинки; 3 – супесчаная;
 4 – песчаная

Запишем проекции указанных сил на нормаль $n-n$ и касательную к поверхности отвала $\tau-\tau$, получим уравнения равновесия системы в следующем виде:

$$\frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - m_{\text{пч}} g \cos \gamma_{\text{отв}} - N_{\text{отв}} = 0, \quad (5.10)$$

$$m_{\text{пч}} a_{\text{пч}} = F_{\text{тр.п}} + m_{\text{пч}} g \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (5.11)$$

Из равенства (5.10) при $N_{\text{отв}} = 0$ можно определить критическую для рассматриваемого поперечного сечения скорость движения агрегата, при которой частица будет достигать верхней кромки отвала:

$$v_{\text{пч.кр}} = \sqrt{\frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}}}. \quad (5.12)$$

Если скорость движения агрегата меньше критической скорости для данного сечения $v_{\text{пч.кр}} > v_{\text{арг}}$, то частица падает с отвала, а перед отвалом почва может сгруживаться. При условии $v_{\text{пч.кр}} < v_{\text{арг}}$ обеспечивается отбрасывание слоя пласта без сгруживания.

Дальность отброса частиц почвы 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 движется вместе с агрегатом и имеет переносную скорость $v_{\text{арг}}$. Эта скорость определяет отброс частиц по направлению движения.

Для определения относительной скорости из уравнения (5.10) выразим силу $N_{\text{отв}}$ и подставим в формулу (5.11). Учитывая равенство (5.9), получим:

$$m_{\text{пч}} a_{\text{пч}} = f_{\text{тр.п2}} \frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} m_{\text{пч}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + m_{\text{пч}} g \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (5.13)$$

После деления выражения (5.13) на $m_{\text{пч}}$ и последующих преобразований получим:

$$\frac{v_{\text{пч}} dv_{\text{пч}}}{dx} = f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}, \quad (5.14)$$

или

$$\frac{v_{\text{пч}} dv_{\text{пч}}}{f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = dx,$$

или

$$\int \frac{v_{\text{пч}} dv_{\text{пч}}}{f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = \int dx. \quad (5.15)$$

$$\frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр.п2}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \int \frac{d \left(f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right)}{f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = \int dx.$$

Проинтегрировав данное уравнение, получим:

$$\frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр.п2}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right| = x + C_1.$$

При начальных условиях $x_0 = 0$ и $v_0 = v_{\text{пч}0}$, постоянная интегрирования составит:

$$C_1 = \frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр.п2}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}0}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right|.$$

Тогда:

$$\frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр.п2}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right| =$$

$$= x + \frac{R_{\text{отв}}}{2f_{\text{тр.п2}} \sin^2 \gamma_{\text{отв}}} \ln \left| f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч0}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right|,$$

ИЛИ

$$f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} =$$

$$= e^{2f_{\text{тр.п2}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}} x}{R_{\text{отв}}}} \left(f_{\text{тр.п2}} \frac{v_{\text{пч0}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{тр.п2}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right),$$

$$v_{\text{пч}}^2 = e^{2f_{\text{тр.п2}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}} x}{R_{\text{отв}}}} \left(v_{\text{пч0}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) +$$

$$+ \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}}.$$

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

$$v_{\text{кон}}^2 = e^{2f_{\text{тр.п2}} s_{\text{пч}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}}} \left(v_{\text{пч0}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) +$$

$$+ \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}},$$

ИЛИ

$$v_{\text{пчв}} = v_{\text{кон}} = \left(e^{2f_{\text{тр.п2}} s_{\text{пч}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}}} \left(v_{\text{пч0}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \right. \quad (5.16)$$

$$\left. + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Рассмотрим относительное движение частицы пласта, сходящей с верхней кромки отвала (рис. 5.3). 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 приблизительно под углом $\alpha_{\text{п}}$ к продольной оси пути. Для определения наименьшего расстояния установки приставки необходимо связать координатную ось с крайней точкой отвала 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_1Ox_1 , ось O_1x_1 которой повернута в плоскости xOy на угол $\alpha_{\text{п}}$ относительно оси Ox , соответствующей проекции угла вылета частицы на плоскость xOy .

Из анализа дифференциальных уравнений движения частицы по относительным координатным осям Ox_1 , Oz_1 получим 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 (рис. 5.3). Задача сводится к частному случаю исследований закономерностей движения тела, брошенного под углом к горизонту.

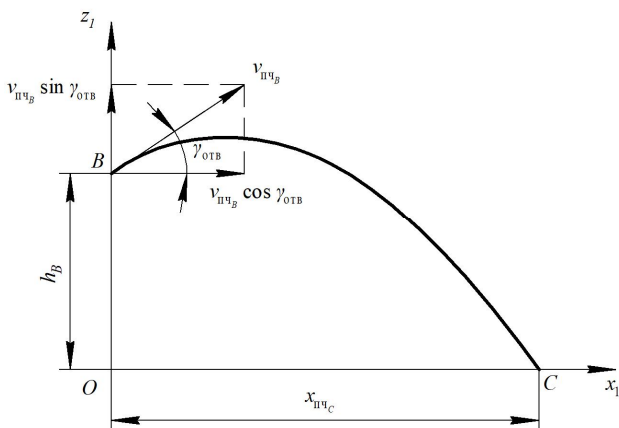


Рис. 5.3. Расчетная схема к определению расстояния падения отбрасываемой отвалом частицы почвы

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

$$t_0 = t_B = 0; \quad x_0 = x_{\text{пч}B} = 0; \quad \mathfrak{A}_{\text{пч}B} = v_{\text{пч}B} \cos \gamma_{\text{отв}}; \quad (5.17)$$

$$z_1 = z_{\text{пч}B} = 0; \quad \mathfrak{A}_{\text{пч}B} = v_{\text{пч}B} \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (5.18)$$

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

$$t_C = t; \quad z_{\text{пч}C} = h_B. \quad (5.19)$$

Запишем дифференциальные уравнения движения частицы в общем виде:

$$m_{\text{пч}} \mathfrak{A}_{\text{пч}B} = \sum_{k=1}^n F_{kx}.$$

Для нашего случая:

$$m_{\text{пч}} \mathfrak{A}_{\text{пч}B} = 0;$$

$$m_{\text{пч}} \mathfrak{A}_{\text{пч}B} = -m_{\text{пч}} g.$$

Откуда:

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}B} = 0; \quad (5.20)$$

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}B} = -g. \quad (5.21)$$

Интегрируем методом разделения переменных:

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}B} = \frac{dv_{\text{пч}Bx}}{dt}, \quad \frac{dv_{\text{пч}Bx}}{dt} = 0.$$

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}B} = \frac{dv_{\text{пч}Bz}}{dt}, \quad \frac{dv_{\text{пч}Bz}}{dt} = -g.$$

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}B} = v_{\text{пч}Bx} = \frac{dv_{\text{пч}Bx}}{dt}. \quad (5.22)$$

$$\mathfrak{A}_{\text{пч}z} = v_{\text{пч}Bz} = v_{\text{пч}Bz} \sin \gamma_{\text{отв}} - gt. \quad (5.23)$$

Выражения (5.22) и (5.23) представляют собой уравнения для проекций скорости полета частицы.

Перепишем уравнения еще раз, подставив, соответственно:

$$v_{\text{пч}_{Bx}} = \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dx}{dt} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}}. \quad (5.24)$$

$$v_{\text{пч}_{Bz}} = \frac{dz}{dt}, \quad \frac{dz}{dt} = v_{\text{пч}_{Bz}} \sin \gamma_{\text{отв}} - gt. \quad (5.25)$$

Проинтегрировав еще раз, получим:

$$x_{\text{пч}_B} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}} t; \quad (5.26)$$

$$z_{\text{пч}_B} = v_{\text{пч}_B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2}. \quad (5.27)$$

Выражения (5.26) и (5.27) являются уравнениями движения тела на участке BC .

Учитывая начальные условия, получим:

$$x_{\text{пч}_C} = v_{\text{пч}_B} \cos \gamma_{\text{отв}} t, \quad (5.28)$$

$$z_{\text{пч}_C} = v_{\text{пч}_B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2} + h_B. \quad (5.29)$$

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

$$z_{\text{пч}_C} = x_{\text{пч}_C} \operatorname{tg} \gamma_{\text{отв}} - \frac{gx_{\text{пч}_C}^2}{2v_{\text{пч}_B}^2 \cos^2 \gamma_{\text{отв}}} + h_B. \quad (5.30)$$

В точке падения частицы на плоскость $z_c = 0$, приравняв правую часть уравнения (5.30) к нулю и решив квадратное уравнение, получим относительную координату точки C , где падают частицы почвы на плоскость xOy .

$$x_{\text{пч}_C} = \frac{v_{\text{пч}_B}}{2g} (v_{\text{пч}_B} \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + \cos \gamma_{\text{отв}} \sqrt{v_{\text{пч}_B}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + 2gh_B}). \quad (5.31)$$

Подставляя в зависимость (5.31) равенство (5.16), определим расстояние, на котором частица почвы упадет на плоскость xOy .

Чтобы определить расстояния между корпусом плуга и крайними рабочими органами катковой приставки, необходимо спроецировать расстояние $x_{пчC}$ на координатные оси. Получим:

$$Y_{пч\min} = \frac{v_{пчB} \sin \alpha_{п}}{2g} (v_{пчB} \sin^2 \gamma_{отв} + \cos \gamma_{отв} \sqrt{v_{пчB}^2 \sin^2 \gamma_{отв} + 2gh_B}), \quad (5.32)$$

$$X_{пч\min} = \frac{v_{пчB} \cos \alpha_{п}}{2g} (v_{пчB} \sin^2 \gamma_{отв} + \cos \gamma_{отв} \sqrt{v_{пчB}^2 \sin^2 \gamma_{отв} + 2gh_B}). \quad (5.33)$$

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

Таблица 5.1

Характеристики рабочих поверхностей корпусов плуга

Тип рабочей поверхности	Характеристики				
	a , см	b_k , см	$\gamma_{лем}$, град	$\epsilon_{лем}$, град	$\Delta\epsilon_{лем}$, 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

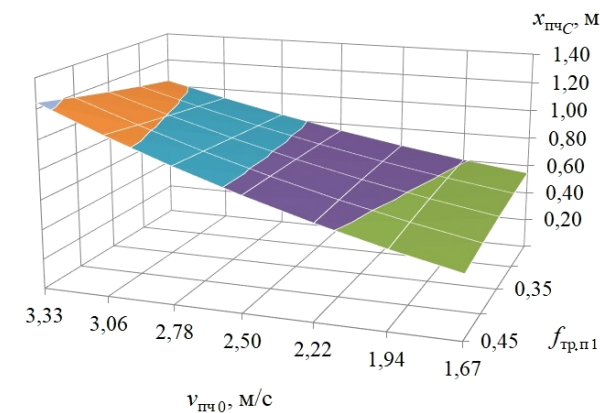
На основании данных табл. 5.1 и полученных формул для расчета параметров различных типов рабочих поверхностей корпусов плуга построены графические зависимости дальности отбрасывания почвы от скорости движения агрегата ($v_{агр} = v_{пч0}$) и состояния почвы ($f_{тр.п1}$) (рис. 5.4).

Диаграммы, показывающие, как ведет себя частица почвы на рабочей поверхности корпуса № 28 фирмы Kverneland, приведены на рис. 5.5.

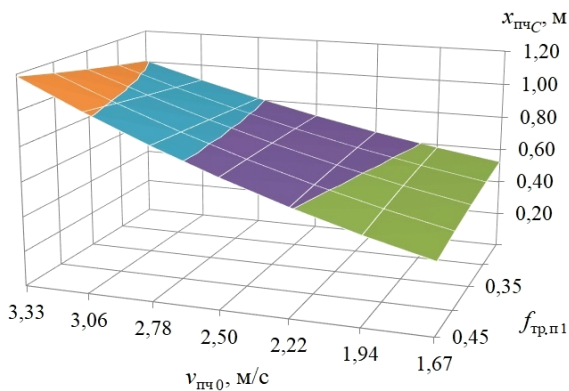
Корпус № 28 предназначен для работы на всех типах почвы. Имея большую длину, он создает более плоский профиль для улучшенной вспашки. Пригоден для ведения пахоты глубиной

от 15 до 30 см и шириной от 35 до 50 см. Подставив основные параметры в формулы (5.16) и (5.31), получили зависимости для корпуса Квернеланд с шириной захвата 35 см (рис. 5.5).

Из полученных зависимостей следует, что наибольшее влияние на дальность полета частицы оказывают форма рабочей поверхности, скорость движения агрегата и свойства почвы.

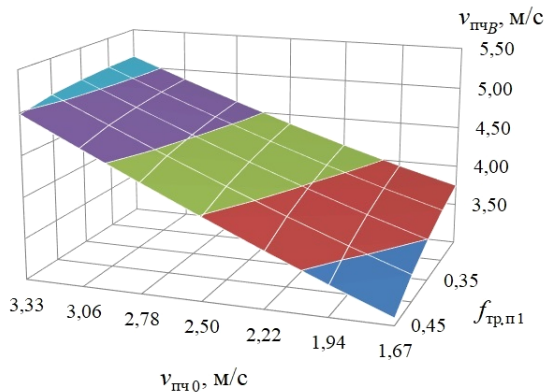


a

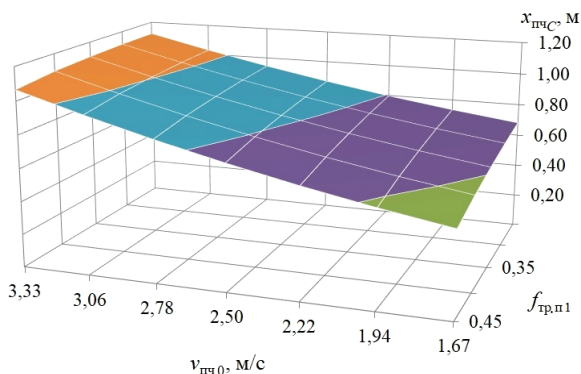


б

Рис. 5.4. Диаграммы зависимости дальности полета частицы почвы от скорости движения агрегата $v_{пч0}$ и состояния почвы для полувинтовой (*a*) и скоростной (*б*) рабочей поверхности корпуса плуга



а



б

Рис. 5.5. Диаграммы зависимости начальной скорости (а) и дальности (б) полета частицы почвы от скорости движения агрегата $v_{пч0}$ и состояния почвы для рабочей поверхности корпуса № 28 фирмы Kverneland

Однако диаграммы зависимости (рис. 5.5) показывают, что скорость движения частицы после прохождения по поверхности корпуса плуга возрастает. Это объясняется тем, что полученные зависимости рассматривают только движение отдельной частицы, а не всего пласта почвы. Для получения более точных результатов необходимо экспериментально определить поправочный коэффициент, учитывающий взаимодействие частиц почвы внутри пласта в зависимости от параметров корпуса плуга.

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

5.2. Определение кинематических параметров движения почвенного пласта по рабочей поверхности корпуса плуга и его падения на поверхность

Кинематические параметры движения пласта по рабочей поверхности плуга зависят от скорости движения агрегата, типов и параметров отвала, свойств почвы. Отметим, что отвал имеет довольно сложную конфигурацию, поэтому опишем сечение рабочей поверхности корпуса плуга, перпендикулярное лемеху, уравнением «перевернутой» циклоиды (рис. 5.6).

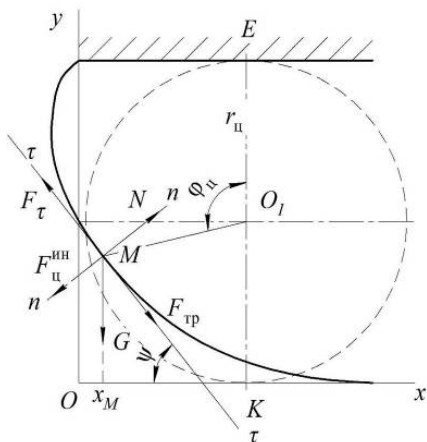


Рис. 5.6. Схема к определению кинематических параметров движения почвенного пласта

Рассмотрим пласт почвы массой $m_{\text{п}}$ на поверхности отвала. Свяжем точку почвенного пласта с подвижной системой координат (τ, n) . Ось τ - τ – касательная к циклоиде, n - n – нормаль. Пласт движется вдоль касательной к траектории движения, которая в каждый момент времени меняет направление. Запишем уравнение движения относительно оси τ - τ . На элемент почвенного пласта будут

действовать: сила тяжести G_n , сила трения $F_{тр} = \mu \mathcal{E}$ [82] (μ – коэффициент сопротивления; Н·с/м; \mathcal{E} – скорость почвенного пласта, м/с; $s = \overset{\cup}{BM}$ – путь, пройденный точкой M за время t , м), затрачиваемая на перемещение пласта по лемешно-отвальной поверхности, сила F_{τ} , и центробежная сила инерции $\bar{F}_{ц}^{ин} = -m_n \bar{a}_n$ (a_n – нормальное ускорение). Сила сопротивления обусловлена внутренним трением частиц пласта почвы, возникающим при его движении по рабочей поверхности отвала.

Для определения коэффициента сопротивления μ предлагается следующая формула [159]:

$$\mu = \eta b_{тр}, \quad (5.34)$$

где η – динамическая вязкость почвы (табл. 5.2), (рис. 5.7) [84], Па·с;
 $b_{тр}$ – размер почвенной частицы, м.

Таблица 5.2

Структура почвы [37]

Тип почвы	Свойства почвы			
	Содержание физической глины (размер частиц – 0,01 мм), %	W, %	η (при объемных деформациях), Па·с	η (при сдвиговых деформациях), Па·с
Суглинок легкий	20–30	13,9	$0,489 \cdot 10^4$	$0,0452 \cdot 10^4$
		11,4	$0,937 \cdot 10^4$	$0,0930 \cdot 10^4$
		9,7	$0,711 \cdot 10^4$	$0,0691 \cdot 10^4$
		7,7	$0,693 \cdot 10^4$	$0,0675 \cdot 10^4$
Суглинок средний	30–40	18,5	$0,453 \cdot 10^4$	$0,0440 \cdot 10^4$
		16,8	$0,925 \cdot 10^4$	$0,0918 \cdot 10^4$
		14,7	$0,847 \cdot 10^4$	$0,0834 \cdot 10^4$
		12,0	$0,845 \cdot 10^4$	$0,0835 \cdot 10^4$
		9,9	$0,677 \cdot 10^4$	$0,0668 \cdot 10^4$
Суглинок тяжелый	40–50	23,8	$0,476 \cdot 10^4$	$0,4730 \cdot 10^4$
		22,0	$0,814 \cdot 10^4$	$0,0810 \cdot 10^4$
		20,5	$0,918 \cdot 10^4$	$0,0920 \cdot 10^4$
		18,3	$0,658 \cdot 10^4$	$0,0649 \cdot 10^4$
		17,3	$0,519 \cdot 10^4$	$0,0507 \cdot 10^4$

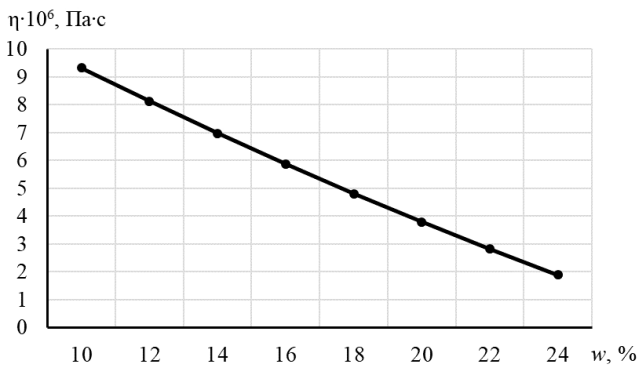


Рис. 5.7. График зависимости коэффициента динамической вязкости среднесуглинистой почвы от абсолютной влажности

Качинский Н.А. предложил разделить все твердые частицы на физический песок (крупнее 0,01 мм) и физическую глину (менее 0,01 мм). По количеству физического песка и физической глины почву относят к различным типам (см. табл. 5.2) [37].

Рассмотрим действующие на пласт силы:

$$m_n \frac{d^2 s}{dt_1^2} = -m_n g \sin \psi - F_{\text{тр}} + F_{\tau}, \quad (5.35)$$

где ψ – угол наклона касательной, проведенной к циклоиде в точке M , к горизонту, град;

m_n – масса пласта, кг.

Учитывая, что $F_{\text{тр}} = \mu R$, уравнение (5.35) можно записать в следующем виде:

$$m_n \frac{d^2 s}{dt_1^2} = -m_n g \sin \psi - \mu \frac{ds}{dt_1} + F_{\tau}. \quad (5.36)$$

Данное уравнение содержит три переменные: s , t_1 , ψ . Уравнения циклоиды представим в следующем виде:

$$\begin{cases} x = r_n (\varphi_n + \sin \varphi_n), \\ y = r_n (1 + \cos \varphi_n), \end{cases} \quad (5.37)$$

где $\varphi_{\text{ц}}$ – угол между прямой, проведенной из центра круга O_1 перпендикулярно к потолку, и отрезком, соединяющим точку M и центр круга O_1 .

Из уравнений (5.37) составим выражение для производной:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{r_{\text{ц}} \sin \varphi_{\text{ц}}}{r_{\text{ц}}(1 - \cos \varphi_{\text{ц}})} = -\frac{2 \sin \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} \cos \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}}{2 \sin^2 \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}} = -\operatorname{ctg} \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}. \quad (5.38)$$

В то же время дифференциал дуги циклоиды

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx. \quad (5.39)$$

Подставив выражение (5.38) в уравнение (5.39), получим дифференциал дуги циклоиды:

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}} dx. \quad (5.40)$$

Из первого уравнения (5.37) найдем:

$$dx = r_{\text{ц}}(1 - \cos \varphi_{\text{ц}}) d\varphi_{\text{ц}} = 2r_{\text{ц}} \sin^2 \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}. \quad (5.41)$$

Тогда дифференциал пути (формула (5.40)) составит:

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}} 2r_{\text{ц}} \sin^2 \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} d\varphi_{\text{ц}} = 2r_{\text{ц}} \sin \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} d\varphi_{\text{ц}}. \quad (5.42)$$

После интегрирования уравнения (5.42) проходимый пластом почвы по рабочей поверхности корпуса путь можно рассчитать по формуле

$$s = \int_0^{\varphi_{\text{ц}}} 2r_{\text{ц}} \sin \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} d\varphi_{\text{ц}} = 4r_{\text{ц}} \cos \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} \Big|_0^{\varphi_{\text{ц}}} = 4r_{\text{ц}} \left(1 - \cos \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2}\right). \quad (5.43)$$

Отсюда:

$$\cos \frac{\varphi_{\text{ц}}}{2} = 1 - \frac{s}{4r_{\text{ц}}}. \quad (5.44)$$

Согласно данным (рис. 5.7) можно записать:

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

Учитывая равенство (5.38), путем простых преобразований получим:

$$\sin \psi = \operatorname{tg}\psi \cos \psi = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} = \frac{-\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_{\text{н}}}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi_{\text{н}}}{2}}} = \cos \frac{\varphi_{\text{н}}}{2}. \quad (5.45)$$

Из равенств (5.44) и (5.45) получим:

$$\sin \psi = 1 - \frac{s}{4r_{\text{н}}}. \quad (5.46)$$

Уравнение движения (5.36) пласта почвы по поверхности плуга с учетом равенства (5.46) запишем в следующем виде:

$$m_{\text{н}} \ddot{s} = -m_{\text{н}} g \left(1 - \frac{s}{4r_{\text{н}}}\right) - \mu \dot{s} + F_{\tau},$$

где $\dot{s} = \frac{ds}{dt_1}$; $\ddot{s} = \frac{d^2s}{dt_1^2}$, (t_1 – время движения почвы по рабочей поверхности плуга, с).

Уравнение преобразуем:

$$m_{\text{н}} \ddot{s} = -m_{\text{н}} g + \frac{m_{\text{н}} g}{4r_{\text{н}}} s - \mu \dot{s} + F_{\tau},$$

или

$$\ddot{s} = -g + \frac{gs}{4r_{\text{н}}} - \frac{\mu}{m_{\text{н}}} \dot{s} + \frac{F_{\tau}}{m_{\text{н}}}. \quad (5.47)$$

Введем обозначения:

$$A = \frac{\mu}{m_{\text{н}}}; \quad B = \frac{g}{4r_{\text{н}}}; \quad D = \frac{F_{\tau}}{m_{\text{н}}}. \quad (5.48)$$

Тогда уравнение (5.47), с учетом принятых обозначений (5.48), примет вид:

$$A\ddot{s} - Bs = \Phi, \quad (5.49)$$

где $\Phi = D - g$.

Решение уравнения (5.49) запишем в виде суммы:

$$s = s_1 + s_2,$$

где s_1 – общий интеграл уравнения;

s_2 – частный интеграл уравнения.

Решение однородного уравнения

$$A\ddot{s} - Bs = 0 \quad (5.50)$$

ищем в виде $s_1 = e^{\lambda t}$.

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

$$\lambda_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B}}{2}. \quad (5.51)$$

Поэтому решение уравнения (5.50) имеет вид:

$$s_1 = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (5.52)$$

Частное решение запишем в следующем виде:

$$s_2 = E_s \quad (E_s = \text{const}). \quad (5.53)$$

Так как

$$\ddot{s}_2 = 0, \quad \ddot{s}_1 = 0,$$

то из уравнения (5.49) получим:

$$s_2 = E_s = -\frac{\Phi}{B} = 4r_{\text{ц}} \left(1 - \frac{D}{g} \right). \quad (5.54)$$

С учетом равенств (5.39) и (5.41), решение уравнения (5.36) примет вид:

$$s = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + E_s. \quad (5.55)$$

В начальный момент времени $t_0 = 0$, $s_0 = 0$, $\mathbf{v}_0 = v_{\text{арр}} \cdot \cos \psi = v_{n_0}$.
 Продифференцируем равенство (5.55) по t_1 :

$$\dot{s} = c_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1}. \quad (5.56)$$

Подставив начальные условия в равенства (5.55) и (5.56), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = -E_s, \\ \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = v_{n_0}. \end{cases} \quad (5.57)$$

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 (5.57), найдем:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -E_s \\ \lambda_2 & v_{n_0} \end{vmatrix} = v_{n_0} + E_s \lambda_1.$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -E_s & 1 \\ v_{n_0} & \lambda_2 \end{vmatrix} = -E_s \lambda_2 - v_{n_0} = -(E_s \lambda_2 + v_{n_0}).$$

Следовательно:

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{E_s \lambda_2 + v_{n_0}}{\sqrt{A^2 + 4B}}, \quad (5.58)$$

$$c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{v_{n_0} + E_s \lambda_1}{-\sqrt{A^2 + 4B}}. \quad (5.59)$$

Подставив c_1 и c_2 в равенство (5.55), получим уравнение движения пласта почвы по рабочей поверхности корпуса плуга:

$$s = \frac{E_s \lambda_2 + v_{n_0}}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{v_{n_0} + E_s \lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1} + E_s. \quad (5.60)$$

Взяв производную по времени (формула (5.47)), получим скорость движения пласта:

$$\dot{s} = \frac{(E_s \lambda_2 + v_{n_0}) \lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{(v_{n_0} + E_s \lambda_1) \lambda_2}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1}. \quad (5.61)$$

Преобразуем равенства (5.60) и (5.61):

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s \lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} + v_{n_0} e^{\lambda_1 t_1} - v_{n_0} e^{\lambda_2 t_1} - E_s \lambda_1 e^{\lambda_2 t_1} \right] + E_s = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s (\lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t_1}) + v_{n_0} (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1}) \right] + E_s, \end{aligned} \quad (5.62)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s \lambda_2 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + v_{n_0} \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - v_{n_0} \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} - E_s \lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} \right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s \lambda_1 \lambda_2 (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1}) + v_{n_0} (\lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1}) \right]. \end{aligned} \quad (5.63)$$

С учетом формул (5.35) и (5.41) формула (5.50) примет вид:

$$\begin{aligned} v_{n_B} &= \left(\left(\frac{F_\tau}{m_{n_1}} - g + v_{n_0} \left(-\frac{\mu}{2m_{n_1}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{\mu}{m_{n_1}}\right)^2 + \frac{g}{r_{u_1}}}}{2} \right) \right) e^{-\frac{\mu}{2m_{n_1}} t_1} + g - \frac{F_\tau}{gm_{n_1}} \right) \\ &+ v_{n_0} \left(\frac{\mu}{2m_{n_1}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{\mu}{m_{n_1}}\right)^2 + \frac{g}{r_{u_1}}}}{2} \right) e^{\frac{\sqrt{\left(\frac{\mu}{m_{n_1}}\right)^2 + \frac{g}{r_{u_1}}}}{2} t_1} \left(\left(\frac{\mu}{m_{n_1}}\right)^2 + \frac{g}{r_{u_1}} \right)^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (5.64)$$

Заметим, что:

$$\begin{aligned}\lambda_1\lambda_2 &= \left(-\frac{A}{2} + \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) \left(-\frac{A}{2} - \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) = \\ &= \left(-\frac{A}{2} \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right)^2 = \frac{A^2}{4} - \frac{A^2 + 4B}{4} = -B = -\frac{g}{4r_{\text{ц}}}. \\ E_s &= 4r_{\text{ц}} \left(1 - \frac{D}{g} \right) = 4r_{\text{ц}} \left(1 - \frac{F_{\tau}}{m_{\text{п}}g} \right), \\ E_s\lambda_1\lambda_2 &= \left(4r_{\text{ц}} - \frac{4r_{\text{ц}}F_{\tau}}{m_{\text{п}}g} \right) \left(-\frac{g}{4r_{\text{ц}}} \right) = \frac{F_{\tau}}{m_{\text{п}}} - g.\end{aligned}$$

Должно выполняться следующее условие:

$$\frac{F_{\tau}}{m_{\text{п}}} - g > 0 \Rightarrow F_{\tau} > m_{\text{п}}g. \quad (5.65)$$

Анализ равенств (5.62) и (5.63) показывает, что s и δ будут расти, если соблюдается неравенство $F_{\tau} > m_{\text{п}}g$, следовательно, сила, затрачиваемая на перемещение пласта почвы, должна быть больше его силы тяжести в каждой точке траектории движения по поверхности отвала.

Для определения силы, затрачиваемой на перемещение пласта в любой точке траектории движения по лемешно-отвальной поверхности плуга, составим уравнения равновесия относительно касательной и нормальной осей.

Рассмотрим систему сил, действующих на пласт почвы. Силу тяги плуга F_{τ} разложим на две составляющие вдоль осей τ и n (см. рис. 5.7):

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n (F_{k\tau})_i &= 0; F_{\tau} - F_{\text{тр}} - m_{\text{п}}g \sin \psi = 0; \\ \sum_{i=1}^n (F_{kn})_i &= 0; N_{\text{отв}} - F_{\text{н}} - m_{\text{п}}g \cos \psi = 0.\end{aligned} \quad (5.66)$$

Откуда:

$$F_{\tau} = F_{\text{тр}} + m_{\text{п}}g \sin \psi = f_{\text{тр.п2}} N_{\text{отв}} + m_{\text{п}}g \sin \psi. \quad (5.67)$$

Определим силу реакции отвала.

$$N_{\text{отв}} = F_n + m_n g \cos \psi = F_T \sin \psi + m_n g \cos \psi. \quad (5.68)$$

Подставив равенство (5.68) в выражение (5.67), получим силу, затрачиваемую на перемещение пласта по лемешно-отвальной поверхности:

$$\begin{aligned} F_\tau &= f_{\text{тр.п2}}(F_T \sin \psi + m_{\text{пч}} g \cos \psi) + m_{\text{пч}} g \sin \psi = \\ &= f_{\text{тр.п2}} F_T \sin \psi + m_{\text{пч}} g (f_{\text{тр.п2}} \cos \psi + \sin \psi). \end{aligned} \quad (5.69)$$

При $\psi = 0$ сила, затрачиваемая на перемещение пласта по лемешно-отвальной поверхности, будет равна силе тяге плуга:

$$F_\tau = f_{\text{тр.п2}} m_n g = N_{\text{отв}} f_{\text{тр.п2}} = F_T. \quad (5.70)$$

В момент начала движения пласта по поверхности плуга $\psi = 30^\circ$, в момент схода $\psi = 90^\circ$.

При $\psi = 90^\circ$ из равенства (5.68) имеем:

$$F_\tau = f_{\text{тр.п2}} F_T + m_n g. \quad (5.71)$$

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

$$F_\tau = m_n g. \quad (5.72)$$

В формулах (5.49) и (5.50) разложим $e^{\lambda_i t}$ ($i = 1, 2$) в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами. Тогда равенство (5.62) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s [\lambda_2 (1 + \lambda_1 t_1) - \lambda_1 (1 + \lambda_2 t_1)] + v_{\text{п0}} (1 + \lambda_1 t_1 - 1 - \lambda_2 t_1) \right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s (\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{п0}} \right] + \frac{t_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[v_{\text{п0}} (\lambda_1 - \lambda_2) \right]. \end{aligned} \quad (5.73)$$

Откуда найдем время движения пласта почвы по отвалу корпуса плуга:

$$\frac{t_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[v_{\text{п0}} (\lambda_1 - \lambda_2) \right] = s - \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} \left[E_s (\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{п0}} \right].$$

Следовательно:

$$t_1 = \frac{s\sqrt{A^2 + 4B} - E_s(\lambda_2 - \lambda_1) - v_{п0}}{v_{п0}(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

Подставив данную зависимость в равенства (5.48) и (5.54), получим:

$$t_1 = \frac{s + 4r_{ц} \left(1 - \frac{F_{\tau}}{m_{п}g}\right) - v_{п0} \sqrt{\left(\frac{\mu}{m_{п}}\right)^2 + \frac{g}{r_{ц}}}}{v_{п0}}. \quad (5.74)$$

Зная время движения пласта по рабочей поверхности корпуса (формула (5.74)), по формуле (5.64) можно определить его скорость $v_{п} = \frac{ds}{dt}$ вдоль траектории s , в том числе и скорость на кромке отвала относительно корпуса плуга: в момент времени t_1 она будет равна $v_{пБ}$.

Как видно из данных (рис. 5.8), скорость пласта почвы относительно корпуса плуга в начальный момент времени резко падает, что связано с началом деформации почвенного пласта на лемехе плуга (сгруживание).

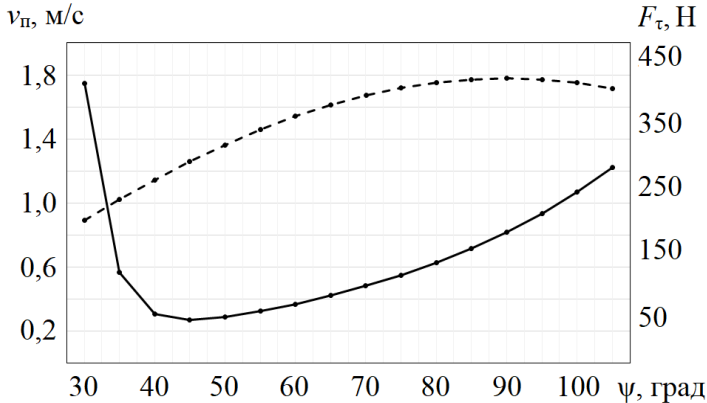


Рис. 5.8. Графическая зависимость скорости движения и силы, затрачиваемой на перемещение пласта по поверхности отвала, от положения пласта на корпусе плуга (угла ψ):
 - - - тяговое сопротивление пласта; — скорости движения пласта

С помощью формул (5.64), (5.68), (5.74) можно исследовать изменение скорости движения пласта по рабочей поверхности корпуса плуга в зависимости от изменения угла ψ .

При построении графиков учитывалась максимальная длина пути, проходимого пластом по рабочей поверхности плуга. Построен график зависимости изменения скорости движения пласта (рис. 5.9) и длины его пути (рис. 5.10) от скорости агрегата.

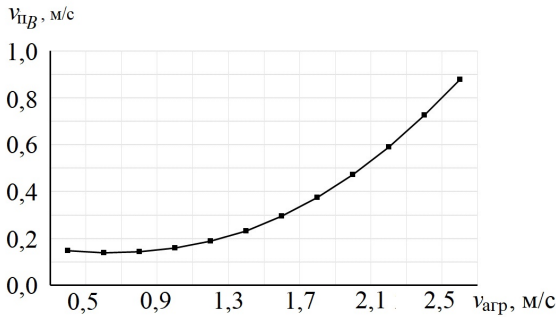


Рис. 5.9. Графическая зависимость изменения скорости движения пласта на выходе с отвала от скорости движения агрегата

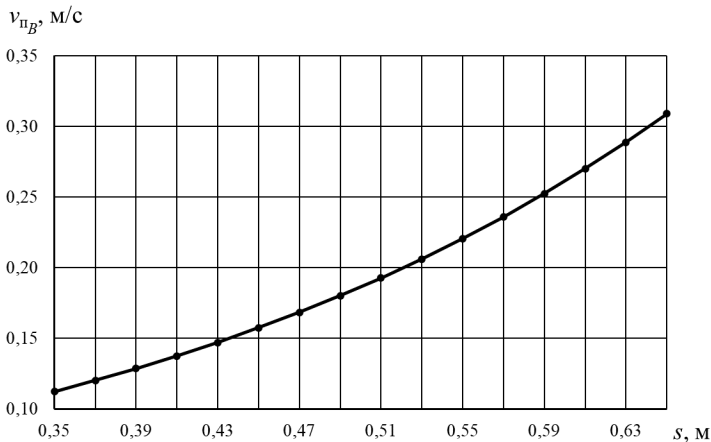


Рис. 5.10. Графическая зависимость скорости от длины пути

Пласт почвы на верхней кромке отвала разрушается. Следовательно, далее необходимо рассматривать движение почвенной частицы,

вылетающей с верхней кромки отвала, которая движется в пространстве относительно неподвижной системы координат (рис. 5.11).

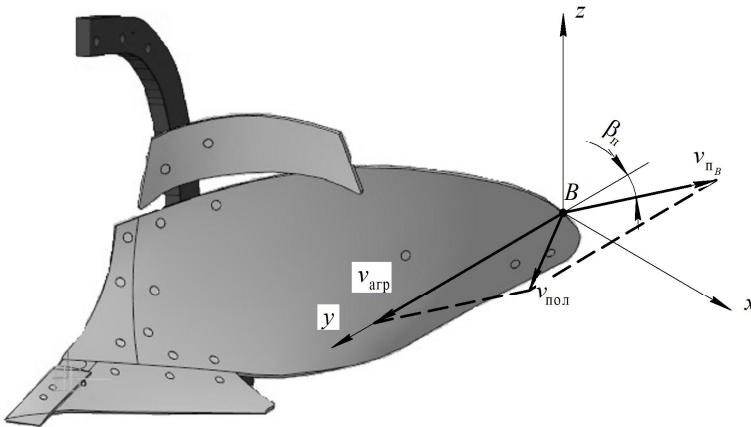


Рис. 5.11. Схема для определения скоростей почвенной частицы в момент схождения с отвала

Полная начальная скорость движения почвенной частицы зависит от двух составляющих: скорости $v_{пБ}$ движущегося пласта на кромке отвала относительно корпуса плуга и скорости $v_{агр}$ движения агрегата (рис. 5.11). Полную начальную скорость движения почвенной частицы определим по формуле

$$v_{пол} = \sqrt{v_{агр}^2 + v_{пБ}^2 - 2v_{агр}v_{пБ} \cos\beta_{п}}, \quad (5.75)$$

где $\beta_{п}$ – угол между вектором скорости $v_{пБ}$ и осью y .

Из данных (рис. 5.11) видно, что на дальность полета частиц почвы относительно корпуса плуга вдоль оси x и z влияет только одна из составляющих полной скорости $v_{пБ}$ движения почвенной частицы. Поэтому для определения максимальной дальности полета частиц почвы примем начальную скорость v_0 , равную конечной скорости $v_{пБ}$ движения пласта на кромке отвала относительно корпуса плуга, которую можно получить из формулы (5.64), подставив

в нее данные о времени движения пласта почвы по отвалу (формула (5.74)).

Полет частиц почвы при отсутствии сил сопротивления воздуха можно описать уравнениями движения (рис. 5.12):

$$\begin{aligned} m_{\text{пч}} \ddot{x} &= 0, \\ m_{\text{пч}} \ddot{y} &= 0, \\ m_{\text{пч}} \ddot{z} &= -m_{\text{пч}} g. \end{aligned} \quad (5.76)$$

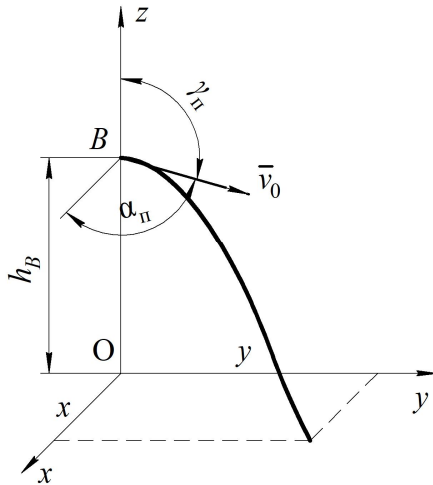


Рис. 5.12. Схема траектории движения пласта почвы

После интегрирования получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= c_1, \\ x &= c_1 t_2 + c_2, \\ \dot{y} &= c_3, \\ y &= c_3 t_2 + c_4, \\ \dot{z} &= -gt_2 + c_5, \\ z &= -\frac{gt_2^2}{2} + c_5 t_2 + c_6, \end{aligned} \right\} \quad (5.77)$$

где t_2 – время полета частицы почвы, с.

При $t_2 = 0$, $z = h_B$, $v_0 = v_{пБ}$:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= v_{пБ} \cos \alpha_{п}; x_0 = 0, \\ y_0 &= v_{пБ} \cos \beta_{п}; y_0 = 0, \\ z_0 &= v_{пБ} \cos \gamma_{п}; z_0 = z_0 = h_B. \end{aligned} \right\} \quad (5.78)$$

Найдем c_i ($i = 1-6$):

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= v_{пБ} \cos \alpha_{п}, \\ c_2 &= 0, \\ c_3 &= v_{пБ} \cos \beta_{п}, \\ c_4 &= 0, \\ c_5 &= v_{пБ} \cos \gamma_{п}, \\ c_6 &= h_B. \end{aligned} \right\} \quad (5.79)$$

Подставим значения системы уравнений (5.78) в равенство (5.76) и получим уравнения движения:

$$\begin{cases} x = v_{пБ} t_2 \cos \alpha_{п}, \\ y = v_{пБ} t_2 \cos \beta_{п}, \\ z = -0,5 g t_2^2 + v_{пБ} t_2 \cos \gamma_{п} + h_B. \end{cases} \quad (5.80)$$

Определим время падения частиц почвы из третьего уравнения (5.80), принимая $z = 0$:

$$0 = -\frac{g t_2^2}{2} + v_{пБ} t_2 \cos \gamma_{п} + h_B,$$

или

$$g t_2^2 - 2 v_{пБ} t_2 \cos \gamma_{п} - 2 h_B = 0,$$

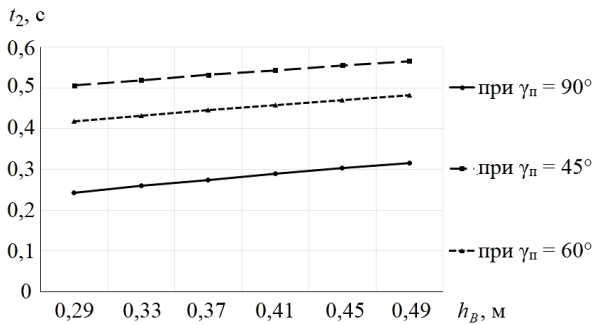
или

$$t_2 = \frac{v_{пБ} \cos \gamma_{п} \pm \sqrt{v_{пБ}^2 \cos^2 \gamma_{п} + 2 g h_B}}{g}. \quad (5.81)$$

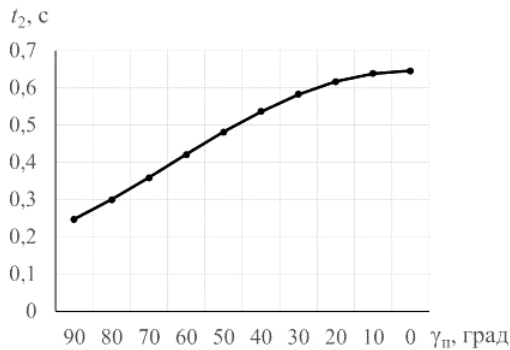
Время падения будет соответствовать положительному значению выражения (5.81). Как видно из формулы (5.81), время падения частиц почвы на поле зависит от скорости пласта на кромке отвала, высоты корпуса плуга и угла между осью Oz и вектором скорости на кромке отвала. При $\gamma_n = \pi / 2$ рассчитаем время падения:

$$t_2 = \frac{\sqrt{2gh_B}}{g}. \quad (5.82)$$

Графики изменения времени падения по зависимостям (5.81) (при $v_{арп} = 2,7$ м/с) и (5.82) представлены на рис. 5.13.



а



б

Рис. 5.13. Графики зависимости времени полета частицы от высоты корпуса (а) и угла (б)

Полагая, что поступательное движение плуга осуществляется вдоль оси y , определим координату $(x_{пч_c}; y_{пч_c})$ места падения частицы почвы на поле. Учитывая выражение (5.82), из первых двух уравнений (5.80) получим:

$$\begin{cases} x_{пч_c} = \frac{v_{пБ} \sqrt{2gh_B}}{g} \cos \alpha_{п}, \\ y_{пч_c} = \frac{v_{пБ} \sqrt{2gh_B}}{g} \cos \beta_{п}. \end{cases} \quad (5.83)$$

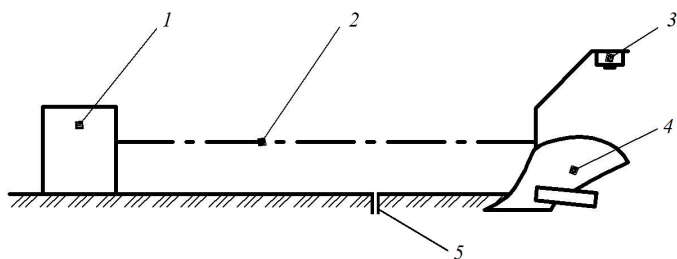
Отметим, что углы $\alpha_{п}$, $\beta_{п}$, $\gamma_{п}$ задаются конструктивными параметрами отвала (кромки отвала). Полученные значения координат будут показывать ближайшую к корпусу точку, поэтому к окончательному значению необходимо добавить высоту пласта (глубину обработки).

При скорости движения агрегата 2,64 м/с, коэффициенте сопротивления 260 Н·с/м и ширине захвата корпуса 0,4 м полная начальная скорость движения почвенной частицы в момент отрыва от кромки отвала будет 2,09 м/с, время движения пласта по поверхности – 0,13 с, при этом максимальная дальность полета составит 0,87 м.

Полученные уравнения позволяют определить дальность полета частицы и обосновать параметры установки приставок на различные типы плугов, что обеспечит снижение давления на полевые доски, следовательно, уменьшит их износ и снизит энергозатраты при совмещении операции основной и поверхностной обработки.

5.3. Методы и результаты полевых исследований дальности отбрасывания почвы корпусом плуга

Для определения степени влияния технологических параметров корпуса плуга на дальность полета частиц почвы и определения места установки приставки относительно корпуса в реальных условиях была разработана и изготовлена установка (рис. 5.14), состоящая из электролебедки 1, троса 2, скоростной камеры 3 и плуга 4. За базовый вариант установки принята лебедка сельскохозяйственная ЛС-100А [39]. Основные технические характеристики установки приведены в табл. 5.3.



a



б

Рис. 5.14. Схема (*a*) и общий вид (*б*) лабораторной установки:
 1 – электролебедка; 2 – трос; 3 – камера; 4 – плуг; 5 – слой индикаторный

Таблица 5.3

Техническая характеристика лабораторной установки [39]

Номинальная потребляемая мощность	1500 Вт
Тип отвала	Культурный
Глубина обработки	0,15 м
Ширина захвата	0,20 м
Скорость перемещения рабочего органа	1,8–2,5 км/ч (0,5–0,7 м/с)
Длина тягового каната	40 м
Габаритные размеры	550×530×1040 мм
Масса лебедки	50 кг

Перед проведением эксперимента определялись основные физико-механические свойства почвы (влажность, твердость, плотность, коэффициент внешнего трения) и характеристики участка (тип почвы, температура почвы, засоренность участка сорными растениями, засоренность участка камнями, уклон местности).

На плуг крепили камеру GoPro (рис. 5.15), при помощи которой проводили съемку движения пласта почвы по поверхности корпуса и за его пределами до полной укладки на поверхности поля.



Рис. 5.15. Камера GoPro

При работе плуг оборачивает пласт почвы в сторону необработанного участка поля, а камера фиксирует максимальную дальность полета частиц. На основании скоростной съемки можно оценить скорость движения почвы на кромке отвала. Для этого на всю глубину обработки пласта закладывается индикаторный слой 5 белого цвета (см. рис. 5.14), в начале обработки которого фиксировалось время с начала его движения по поверхности плужного корпуса до точки схода с последнего.

Эксперимент проводился на дерново-подзолистых почвах среднего суглинка при влажности 17 % по стерне многолетних трав. Глубина вспашки составляла 15 см, ширина захвата корпуса плуга – 20 см. В качестве основного фактора X_4 , влияющего на дальность полета частицы, была выбрана скорость движения

агрегата $v_{\text{агр}}$. При проведении эксперимента лебедкой изменялась скорость движения корпуса плуга в пределах 0,3–0,7 м/с. Скоростной режим был ограничен техническими характеристиками установки. Данные об уровнях и интервале варьирования приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Уровни и интервал варьирования факторов
при исследовании закономерностей движения почвенного пласта

Уровни варьирования факторов	$v_{\text{агр}}$	
	x_1 , м/с	X_4
Основной	$x_{10} = 0,50$	0
Верхний	$x_{1\text{max}} = 0,70$	+1
Нижний	$x_{1\text{min}} = 0,30$	-1
Интервал варьирования	$\Delta x_1 = 0,05$	–

На основании представленной методики исследований был проведен эксперимент (прилож. Г), в котором сходящий с корпуса пласт снимался скоростной камерой (рис. 5.16).

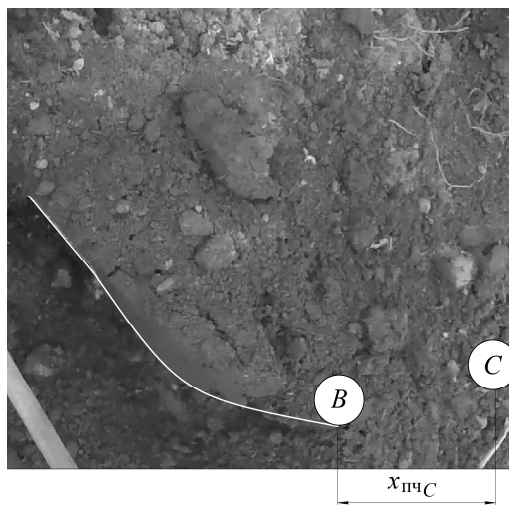


Рис. 5.16. Точки схода пласта с кромки отвала (B) и его падения на поверхность поля (C)

После обработки экспериментальных данных полевого эксперимента получена зависимость дальности полета частицы $x_{пч\ C}$ от скорости движения агрегата $v_{агр}$:

$$\begin{aligned} &\text{в кодированном виде: } Y = 0,03X_4 + 0,178, \\ &\text{в натуральном виде: } x_{пч\ C} = 0,15 v_{агр} + 0,1. \end{aligned} \quad (5.84)$$

Для рассматриваемого в эксперименте корпуса плуга построены графики изменения дальности полета почвенного пласта в зависимости от скорости агрегата (рис. 5.17, линия *a*), построена зависимость по формуле (5.27), при определении которой рассматривается движение частицы почвы по корпусу. График зависимости (рис. 5.17, линия *б*) получен по формуле (5.80), где рассматривается движение пласта почвы по корпусу плуга. График, построенный на основании экспериментальных исследований (формула (5.84)), приведен на рис. 5.17, линия *в*.

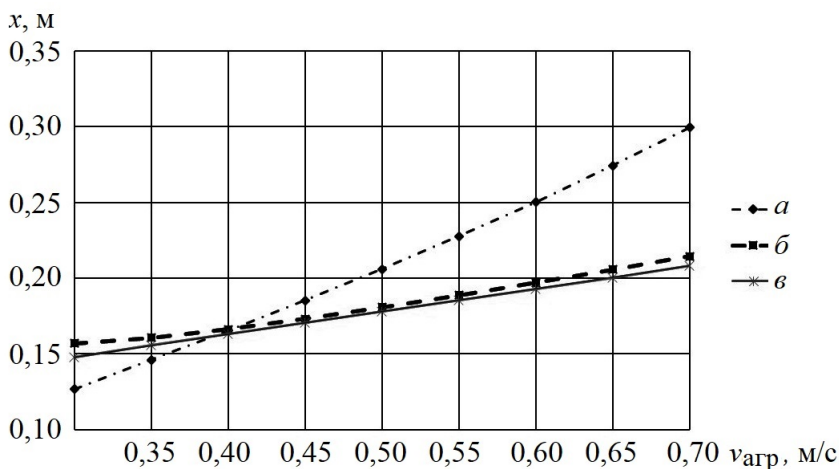


Рис. 5.17. Графики зависимостей дальности полета частицы (*a*) и пласта (*б*) от скорости движения агрегата

При проведении эксперимента на скорости 0,3 м/с, кроме дальности полета частицы пласта почвы, фиксировали скорость почвенной частицы на кромке отвала (0,21 м/с) и время движения пласта по поверхности плуга (2,1 с). При этом дальность полета частицы составила 0,14 м, для данной точки теоретически полученная дальность полета частицы составляет 0,143 м, следова-

тельно, погрешность теоретической зависимости по отношению к экспериментальной в данной точке будет 2,8 %, что соответствует наибольшей относительной погрешности на исследуемом участке.

При проведении испытаний плуга ПО-(8+4)-40 с катковыми приставками в полевых условиях КУП «Минская овощная фабрика» Минского района по приведенной методике для скорости движения плуга 2,63 м/с была определена дальность полета частиц почвы относительно корпуса плуга, которая составила 0,83 м. Для данной точки теоретически полученная дальность полета частицы составила 0,87 м, при этом погрешность составила 4,5 %.

На основании данных, полученных в ходе экспериментов, можно сделать вывод, что полученная математическая модель, описывающая движение почвы как пласта по корпусу плуга, с большой точностью позволяет определить дальность полета частицы.

6. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ УСТРОЙСТВ К ОБОРОТНЫМ ПЛУГАМ ДЛЯ РАЗДЕЛКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ

Создана конструкция механизма навешивания приставки на раму плуга, которая позволяет бесступенчато изменять положения приставки относительно плуга в вертикальной плоскости. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат (рис. 6.1) состоит из плуга 1, к раме 2 которого шарнирно крепится балка 3 приставки, состоящая из кронштейнов 4 и 5, гидроцилиндра 6, рамки 7 с секцией 8 рабочих органов.

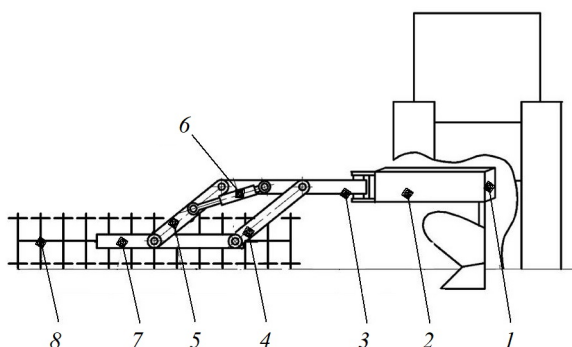


Рис. 6.1. Схема механизма крепления приставки к раме плуга

Комбинированный почвообрабатывающий агрегат работает следующим образом. Перед началом работы определяется тип почвы и устанавливается требуемая глубина хода секции 8 рабочих органов. При работе комбинированного почвообрабатывающего агрегата рабочие органы плуга 1 заглубляются в почву на заданную глубину. Так как с рамой 2 плуга 1 шарнирно соединена балка 3 приспособления, то жесткая конструкция, образованная кронштейнами 4 и 5 и гидроцилиндром 6, воздействует на рамку 7 с секцией 8 рабочих органов, заглубляет их, обеспечивая качественную дополнительную обработку почвы за один проход агрегата, что снижает затраты энергии в технологии возделывания сельскохозяйственных культур.

На тяжелых почвах, где сопротивление движению рабочих органов возрастает, давление на них необходимо увеличить. Для этого штоком гидроцилиндра 6 нижний шарнир кронштейна 5 перемещается в горизонтальной плоскости в сторону плуга 1. При этом угол между кронштейном 5 и балкой 3 уменьшается, действие силы тяжести агрегата на кронштейн 5, следовательно, и на рамку 7 с секцией 8 рабочих органов, возрастает. В данном случае для обеспечения заданной глубины хода рабочих органов используется сила тяжести плуга, что дает требуемое качество обработки почвы за один проход и снижает затраты энергии на выполняемый технологический процесс.

На легких почвах давление на рамку 7 с рабочими органами необходимо уменьшить. Для этого шток гидроцилиндра 6 перемещает нижнюю опору кронштейна 5 в сторону, противоположную от плуга 1. В данном случае нагрузка на рамку 7 с секцией 8 рабочих органов уменьшается, следовательно, глубина их хода при работе на легких почвах не возрастает, значит, не увеличивается тяговое сопротивление, что обеспечивает качество обработки почвы при минимальных энергозатратах.

Для исследования качества обработки почвы и оценки энергоёмкости процесса при использовании дополнительных почвообрабатывающих орудий были изготовлены экспериментальные образцы приставок (см. рис. 6.1) с различными способами крепления на раме плуга (рис. 6.2–6.5) [64, 65].

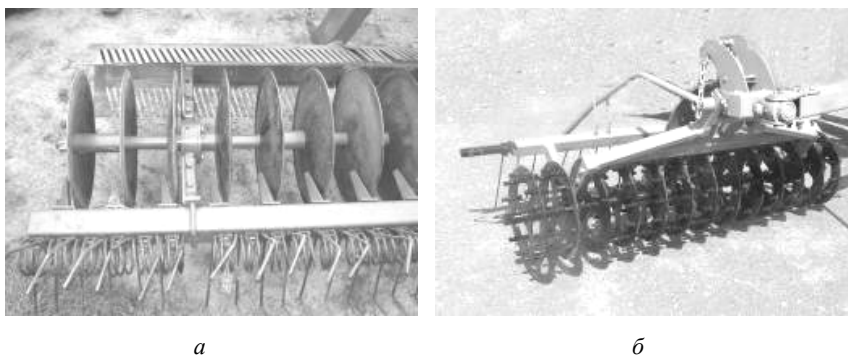


Рис. 6.2. Конструкции приставок со сферическими (а) и кольчато-прутковыми (б) почвообрабатывающими рабочими органами



a



б



в

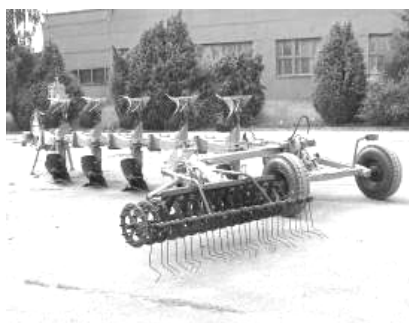


г

Рис. 6.3. Плуг ПО-4+1-40К с устройством для разделки и поверхностной обработки почвенных пластов (сферические диски) и механизмом догружения в транспортном (*a, б*) и рабочем (*в, г*) положениях



a



б

Рис. 6.4. Плуг ППО-5-40 с катковой приставкой (кольчато-прутковые катки) в транспортном (*a*) и рабочем (*б*) положениях



a



б



в



г

Рис. 6.5. Плуг ППО-4+1-40 с катковой приставкой (сферические диски) и механизмом догружения в транспортном (*a, б*) и рабочем (*в, г*) положениях

Для плуга ПО-(8+4)-40 изготовлены три секции приставок (рис. 6.б). Приставка состоит из следующих основных узлов: несущая балка, секция катков, рама, кронштейны крепления приспособления к плугу, механизм регулировки глубины обработки почвы. Секция кольчато-прутковых катков предназначена для дробления глыб, уплотнения верхних слоев почвы.

Перевод из рабочего положения в транспортное осуществляется с помощью шарнирного механизма, обеспечивающего горизонтальное положение рабочего органа как в работе, так и при транспортных переездах.



a



б

*Рис. 6.6. Плуг ПО-(8+4)-40 с тремя катковыми приставками (а)
(кольчато-прутковые катки (б))*

Предложенный параллелограммный механизм навески катковой приставки на раму оборотного плуга был изготовлен ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод» и ДП «Минойтовский ремонтный завод» и испытан в заводских и полевых условиях в Калинковичском и Лидском районах. Пахотный агрегат состоял из плуга ПО-4+1-40К с кольчатой катковой приставкой и трактора «Беларус-1221» (рис. 6.7).



Рис. 6.7. Плуг ПО-4+1-40К с кольчатой катковой приставкой

В результате проведения лабораторно-полевых испытаний установлено, что при вспашке приставка обеспечивает дополнительное дробление глыб и выравнивание верхнего слоя почвы (рис. 6.8). Так, фракции почвы размером до 5,0 см составляют 96 %, гребнистость поверхности пашни – 4 см, плотность почвы в слое 5–8 см – 0,95 г/см³. Удельный расход топлива составил 13 кг/га при работе плуга без приставок и 14 кг/га – с приставками.

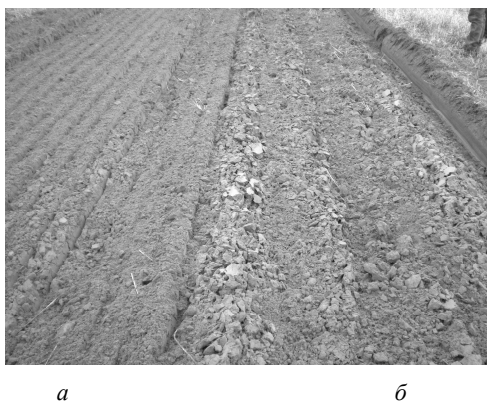


Рис. 6.8. Верхний слой почвы после обработки пахотным агрегатом с приставками (а) и без приставок (б)

Испытания показали, что при установке приставки с учетом рациональных расчетных параметров (рис. 6.9, *а*) она качественно крошит и выравнивает поверхностный слой поля. Установка приставок на большем расстоянии от корпуса плуга, чем рекомендованное, не сказывается на качестве обработки, но ведет к увеличению металлоемкости конструкции, перераспределению сил, действующих на плуг, следовательно, к удорожанию приставки и увеличению затрат топлива. При установке приставки на меньшем расстоянии, чем рекомендованное (рис. 6.9, *б*), почвенный пласт с корпуса плуга попадает на приставку, при этом она начинает заглубляться, почва сгружается перед ней, ухудшая качество обработки, возрастает сопротивление движению пахотного агрегата и повышается удельный расход топлива.



а



б

Рис. 6.9. Плуг с приставкой в процессе обработки почвы при соблюдении параметров (*а*) установки приставок и их нарушении (*б*)

Испытания показали, что несоблюдение параметров установки приставки приводит к повышению энергетических затрат на проведение основной обработки почвы.

Эксплуатационно-технологические, функциональные показатели и показатели энергопотребления плуга ППО-5-40 с катковой приставкой с кольчато-прутковыми рабочими органами в агрегате с трактором «Беларус-1523.3В» определялись на полях ДП «Минийтовский ремонтный завод» Лидского района Гродненской области на вспашке стерни зерновых культур и многолетних трав после химической обработки (рис. 6.10, 6.11).



Рис. 6.10. Плуг ППО-5-40 с приставкой на вспашке многолетних трав



Рис. 6.11. Плуг ППО-5-40 с приставкой на вспашке стерни зерновых

В результате проведения лабораторно-полевых испытаний установлено, что при вспашке приставка обеспечивает дополнительное дробление глыб, уплотнение и выравнивание верхнего слоя почвы. Так, фракции почвы размером до 5,0 см составляют 94 %–95 %, гребнистость поверхности пашни – 2 см, плотность почвы в слое 5–8 см – 1,0 г/см³ [64, 65].

В результате энергетической оценки плуга ППО-5-40, укомплектованного приставкой, проведенной в агрегате с трактором «Беларус-1523.3В», установлено, что расход топлива за основное время работы на указанных фонах составил 21,6 и 22,1 кг/ч, при этом коэффициенты использования эксплуатационной мощности двигателя составили 76 % и 79 %. Удельные энергозатраты плуга с приставкой, при агрегатировании с указанным трактором, составили 48,3 и 50,0 кВт·ч/га соответственно.

Удельный расход топлива при вспашке с приставкой составил 13,5 и 13,9 кг/га, соответственно, на перечисленных выше фонах. Удельный расход топлива при вспашке плугом ППО-5-40 без приставок составил 13,0 и 13,4 кг/га соответственно.

Полученные данные показывают, что применение кольчато-прутковых приставок в пахотных агрегатах приводит к улучшению качества обработки. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований на «Минойтовском ремонтном заводе» к плугу ПО-(8+4)-40 (рис. 6.12) были изготовлены три катковые приставки с кольчато-прутковыми рабочими органами (рис. 6.13). Полевой эксперимент проводился в КУП «Минская овощная фабрика» Минского района, полученные результаты приведены в таблице.



а

б

Рис. 6.12. Плуг ПО-(8+4)-40 с приставками в работе:
а – вид сбоку; *б* – вид сзади



Рис. 6.13. Катковая приставка с кольчато-прутковыми рабочими органами

Таблица

Результаты испытаний плуга ПО-(8+4)-40 [66]

Наименование показателя	Результат испытаний	
Дата проведения испытаний	11.11.2016	11.11.2016
Состав агрегата, марка: – трактор	«Беларус-4522»	«Беларус-4522»
– плуг	ПО-(8+4)-40 с приставками	ПО-(8+4)-40 без приставок
Вид работы	Вспашка поля со стерней кукурузы	Вспашка поля со стерней кукурузы
Тип почвы и название по механическому составу	Дерново-подзолистая, средний суглинок	
Влажность почвы, % в слое 0–10 см	19,3 %	
Твердость почвы, МПа, в слое 0–10 см	2,7	
Рабочая скорость, км/ч	9,4	9,5
Масса плуга, кг	8360	7460

Наименование показателя	Результат испытаний	
Дата проведения испытаний	11.11.2016	11.11.2016
Глубина обработки:		
– средняя, см	21	21
– стандартное отклонение, ±см	0,9	1,5
– коэффициент вариации, %	4,3	7,0
Глубина заделки пожнивных и растительных остатков, см	13	12
Полнота заделки растительных и пожнивных остатков, %	98,8	98,4
Крошение пласта на фракции размером до 50 мм, %	81,5	78,7
Гребнистость поверхности пашни (высота гребней), см	3	4
Угол оборота пласта, град	147	148
Плотность почвы, г/см ³ , в слоях, см:		
0–5	1,01	0,91
5–10	1,08	0,92
Забивание и залипание рабочих органов	Не наблюдалось	
Удельный расход топлива, кг/га	16,8	16,6

Как видно из данных результатов опытов, применение приставок в пахотном агрегате улучшает крошение пласта (количество фракции размером до 50 мм повысилось на 2,8 %), уплотнение почвы (в слое 5–10 см плотность повысилась на 0,16 г/см³) и выровненность поверхности (высота гребней уменьшилась на 1 см) (рис. 6.14). При этом наблюдается снижение производительности на 0,14 га/ч, повышение удельных затрат топлива на 0,2 кг/га.



a

б

Рис. 6.14. Почва после обработки пахотным агрегатом без приставок (*a*) и с приставками (*б*)

В традиционной технологии возделывания озимой пшеницы после проведения вспашки проводится культивация, цель которой – окончательная подготовка почвы к посеву [51, 87]. На основании полученных в ходе эксперимента данных можно сделать вывод, что применение катковой приставки с кольчато-прутковыми рабочими органами позволяет исключить дополнительную культивацию из технологии подготовки почвы под посев озимых культур.

7. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИСКЛЮЧЕНИЯ ЗАБИВАНИЯ МЕЖКАТКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВОЙ

В процессе работы кольчато-прутковых катков возможны случаи, когда межкатковое пространство забивается почвой по причине ее налипания на поверхность кольца (диска) и защемления между соседними уплотняющими прутками. Вследствие этого почва вращается вместе с катком до контакта с чистиком (рис. 7.1), что увеличивает массу секции и повышает энергоёмкость выполняемого процесса.

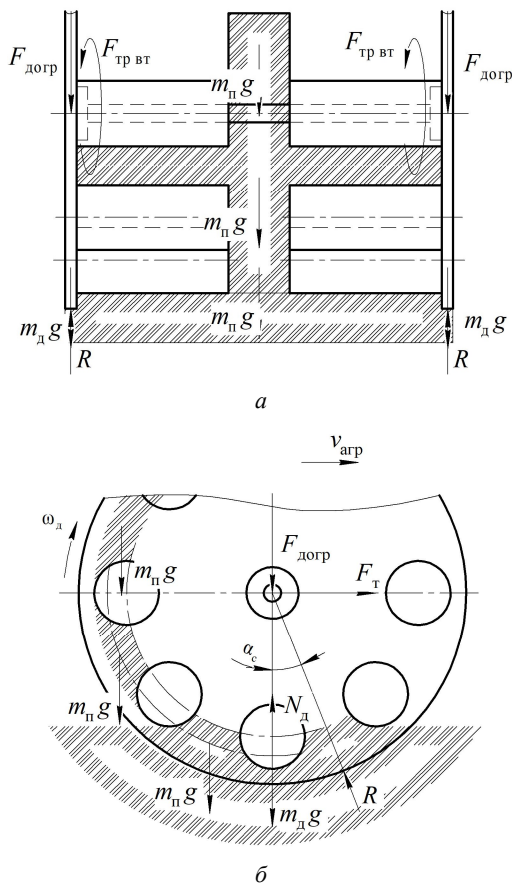


Рис. 7.1. Схема забивания почвой межкаткового и межпруткового пространств: а – каток (вид спереди); б – каток (вид слева)

Для снижения энергетических затрат следует размещать чистики как можно ближе к почве (влечет забивание пространства между чистиками и поверхностью катка почвой и растительными остатками, что приводит к явлению заклинивания) или разрабатывать конструкцию секции, обеспечивающую создание эффекта самоочистки рабочих органов. Рассмотрим случаи налипания почвы на поверхности колец (дисков) и заклинивания ее между уплотняющими элементами кольчато-прутковых катков для определения условия самоочистки почвообрабатывающих поверхностей.

Случай 1. Процесс вхождения уплотняющих элементов (прутков) кольчато-пруткового катка в почву (рис. 7.2).

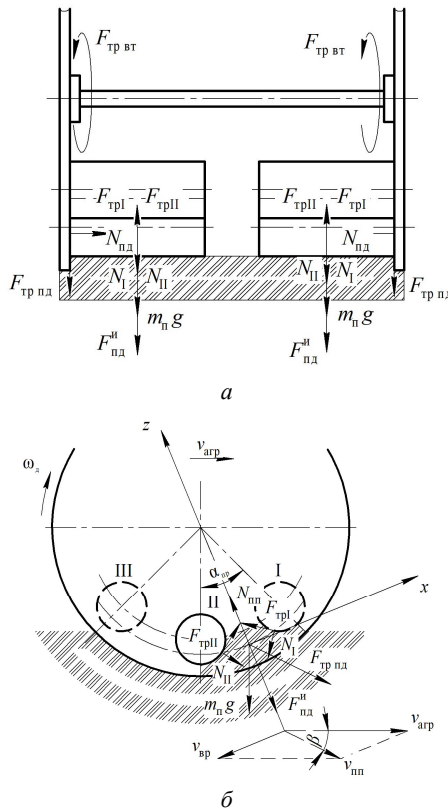


Рис. 7.2. Схема сил, действующих на почвенный элемент при внедрении уплотняющих прутков катка в почву: а – каток (вид спереди); б – каток (вид слева)

Проекция сил на ось Ox :

$$\sum \bar{F} = 0,$$

$$F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2} \right) - m_{\text{и}} g \sin \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2} - N_{\text{I}} \cos \gamma - \\ - F_{\text{трI}} \sin \gamma + N_{\text{II}} \cos \gamma + F_{\text{трII}} \sin \gamma = 0 \quad (7.1)$$

где $F_{\text{тр. пд}}$ – сила трения о поверхность диска, Н;

β – угол между направлением движения агрегата и вектором скорости движения объема почвы, град;

$\alpha_{\text{пр}}$ – угол между центрами соседних прутков, град;

$N_{\text{I}}, N_{\text{II}}$ – сила реакции со стороны рабочих поверхностей прутков I и II, Н;

γ – угол между направлением силы реакции поверхности прутка параллельно касательной к траектории движения центра тяжести заземленного объема почвы, град;

$F_{\text{трI}}, F_{\text{трII}}$ – сила трения о поверхность прутков I и II, Н.

Проекция сил на ось Oz :

$$N_{\text{пн}} - F_{\text{пд}}^{\text{и}} - F_{\text{тр пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2} \right) - m_{\text{и}} g \cos \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2} - \\ - N_{\text{I}} \sin \gamma + F_{\text{трI}} \cos \gamma - N_{\text{II}} \sin \gamma + F_{\text{трII}} \cos \gamma = 0, \quad (7.2)$$

где $N_{\text{пн}}$ – сила реакции со стороны заземленной почвы, Н;

$F_{\text{пд}}^{\text{и}}$ – центробежная сила инерции, Н.

$$\sin \gamma = \frac{1}{r_{\text{пр}}} \left(OC - r_{\text{уст}} \cos \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2} \right), \quad \cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma}.$$

$$\cos \beta = \frac{v_{\text{пн}}^2 + v_{\text{ар}}^2 - v_{\text{вр}}^2}{2v_{\text{пн}} v_{\text{ар}}}, \quad \sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta},$$

где $v_{\text{пн}}$ – скорость движения пласта почвы, м/с;

$v_{\text{вр}}$ – скорость вращения диска, м/с;

$v_{\text{ар}}$ – скорость движения агрегата, м/с.

$$F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right) - m_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} + (N_{\text{II}} - N_{\text{I}}) (\cos \gamma + f_{\text{тр. п2}} \sin \gamma) = 0.$$

$$N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^{\text{II}} - F_{\text{тр. пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right) - m_{\text{п}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} - \\ -(N_{\text{I}} + N_{\text{II}}) (\sin \gamma - f_{\text{тр. п2}} \cos \gamma) = 0;$$

$$N_{\text{II}} - N_{\text{I}} = \frac{m_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} - F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right)}{\cos \gamma + f_{\text{тр. п2}} \sin \gamma};$$

$$N_{\text{I}} + N_{\text{II}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^{\text{II}} - F_{\text{тр. пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right) - m_{\text{п}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{тр. п2}} \cos \gamma};$$

$$N_{\text{II}} - N_{\text{I}} = \frac{\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} - f_{\text{тр. п2}} \cdot N_{\text{нд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right)}{\cos \gamma + f_{\text{тр. п2}} \sin \gamma},$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность почвы, Г/м³;

$V_{\text{п}}$ – объем почвы, м³.

$$N_{\text{I}} + N_{\text{II}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^{\text{II}} - f_{\text{тр. п2}} \cdot N_{\text{нд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{тр. п2}} \cos \gamma};$$

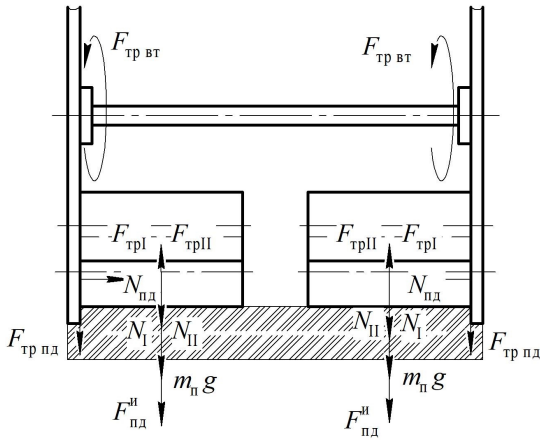
$$N_{\text{II}} = N_{\text{I}};$$

$$\frac{\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} - f_{\text{тр. п2}} \cdot N_{\text{нд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2} \right)}{\cos \gamma + f_{\text{тр. п2}} \sin \gamma} = 0;$$

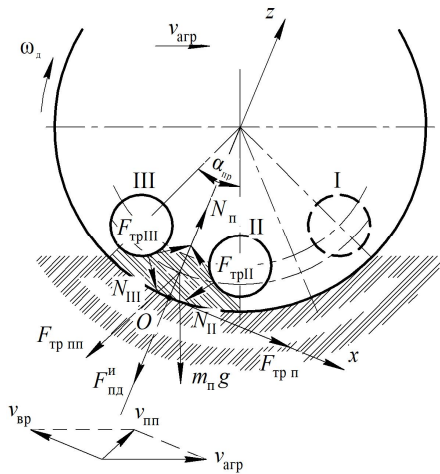
$$f_{\text{тр. п2}} = \frac{\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нп}}}{2}}{N_{\text{нд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (7.3)$$

Случай 2. Движение уплотняющих элементов в почве (рис. 7.3):

$$\sum \bar{F} = 0.$$



a



б

Рис. 7.3. Схема сил, действующих на почвенный элемент при движении уплотняющих прутков в почве: а – каток (вид спереди); б – каток (вид слева)

Проекция сил на ось Ox :

$$-F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) + m_{\text{н}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} - N_{\text{II}} \cos \gamma - F_{\text{тр. II}} \sin \gamma + \\ + N_{\text{III}} \cos \gamma + F_{\text{тр. III}} \sin \gamma + F_{\text{тр. н}} = 0, \quad (7.4)$$

где N_{III} – сила реакции со стороны рабочих поверхностей прутков III, H;

$F_{\text{тр. III}}$ – сила трения о поверхность прутков III, H.

Проекция сил на ось Oz :

$$N_{\text{III}} - F_{\text{пд}}^{\text{н}} - F_{\text{тр. пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) - m_{\text{н}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} - N_{\text{II}} \sin \gamma + \\ + F_{\text{тр. II}} \cos \gamma - N_{\text{III}} \sin \gamma + F_{\text{тр. III}} \cos \gamma = 0. \quad (7.5)$$

$$-F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) + m_{\text{н}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} + (N_{\text{III}} - N_{\text{II}}) (\cos \gamma + \mu \sin \gamma) + F_{\text{тр. н}} = 0.$$

$$N_{\text{III}} - F_{\text{пд}}^{\text{н}} - F_{\text{тр. пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) - m_{\text{н}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} - (N_{\text{III}} + N_{\text{II}}) (\sin \gamma - \mu \cos \gamma) = 0.$$

$$N_{\text{III}} - N_{\text{II}} = \frac{F_{\text{тр. пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) - m_{\text{н}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} - F_{\text{тр. н}}}{\cos \gamma + f_{\text{тр. н2}} \sin \gamma}.$$

$$N_{\text{III}} + N_{\text{II}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{пд}}^{\text{н}} - F_{\text{тр. пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) - m_{\text{н}} g \cos \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{тр. н2}} \cos \gamma}.$$

$$N_{\text{III}} - N_{\text{II}} = \frac{f_{\text{тр. н2}} N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} \right) - \rho_{\text{н}} V_{\text{н}} g \sin \frac{\alpha_{\text{нр}}}{2} - f_{\text{тр. н2}} N_{\text{III}}}{\cos \gamma + f_{\text{тр. н2}} \sin \gamma},$$

где $N_{\text{пд}}$ – сила реакции со стороны рабочих поверхностей диска, H.

$$N_{\text{III}} + N_{\text{II}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^u - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{нд}} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{тр.п2}} \cos \gamma};$$

$$N_{\text{III}} = 0;$$

$$\begin{aligned} & \frac{f_{\text{тр.п2}} N_{\text{нд}} \cos\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{III}}}{\cos \gamma + f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma} + \\ & + \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^u - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{нд}} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{тр.п2}} \cos \gamma} = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(f_{\text{тр.п2}} N_{\text{нд}} \cos\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{III}} \right) (\sin \gamma - f_{\text{тр.п2}} \cos \gamma) + \\ & + \left(N_{\text{III}} - F_{\text{нд}}^u - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{нд}} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} \right) (\cos \gamma + f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma) = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & f_{\text{тр.п2}}^2 \left(N_{\text{III}} \cos \gamma - N_{\text{нд}} \cos\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) \cos \gamma - N_{\text{нд}} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) \sin \gamma \right) + \\ & + f_{\text{тр.п2}} \left(N_{\text{нд}} \cos\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) \sin \gamma - N_{\text{III}} \sin \gamma + \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} \cos \gamma - \right. \\ & \left. - N_{\text{нд}} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2}\right) \cos \gamma - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} \sin \gamma + N_{\text{III}} \sin \gamma - F_{\text{нд}}^u \sin \gamma \right) + \\ & + N_{\text{III}} \cos \gamma - F_{\text{нд}}^u \cos \gamma - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} \cos \gamma - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{мп}}}{2} \sin \gamma = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& f_{\text{тп.п2}}^2 \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right) + \\
& + f_{\text{тп.п2}} \left(-N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) + \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \right) + \\
& + N_{\text{пп}} \cos \gamma - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \cos \gamma - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) = 0. \\
D = & \left(N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) + F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \right)^2 - \\
- 4 & \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right) \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \cos \gamma - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right). \\
f_{\text{тп.п2 } 1,2} = & \frac{N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) + F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \pm \sqrt{D}}{2 \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right)}. \\
D = & \left(N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) + F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \right)^2 + \\
+ 4 & \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right) \left(F_{\text{пд}}^{\text{н}} \cos \gamma + \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - N_{\text{пп}} \cos \gamma \right). \\
f_{\text{тп.п2 } 1,2} = & \frac{N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) + F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \pm \sqrt{D}}{2 \left(N_{\text{пп}} \cos \gamma - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{пп}}}{2} - \gamma \right) \right)}. \quad (7.6)
\end{aligned}$$

Случай 3. Процесс выхода уплотняющих элементов из почвы (рис. 7.4).

$$\sum \bar{F} = 0.$$

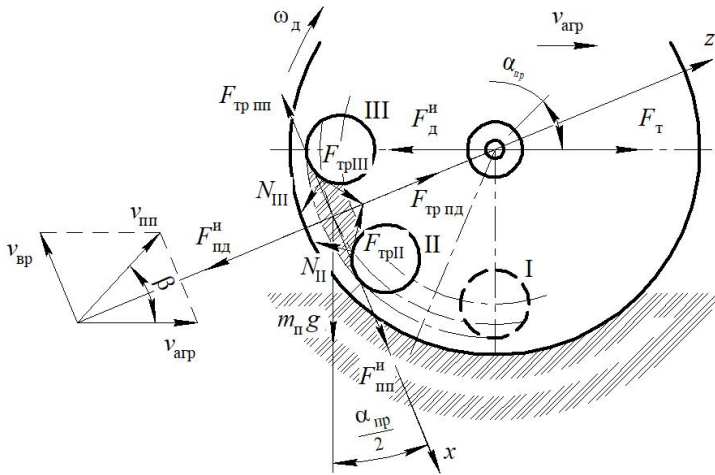


Рис. 7.4. Схема сил, действующих на почвенный элемент, защемленный между уплотняющими элементами при их выходе из почвы

Проекция сил на ось Ox :

$$F_{тр. пп} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{вп}}{2} \right) + m_n g \cos \frac{\alpha_{вп}}{2} - N_{III} \cos \gamma -$$

$$- F_{тр. III} \sin \gamma + N_{IV} \cos \gamma + F_{тр. IV} \sin \gamma = 0, \quad (7.7)$$

где N_{IV} – сила реакции со стороны рабочих поверхностей прутков IV, H;

$F_{тр. IV}$ – сила трения о поверхность прутков IV, H.

Проекция сил на ось Oz :

$$N_{пп} - F_{пд}^H - F_{тр. пд} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{вп}}{2} \right) - m_n g \sin \frac{\alpha_{вп}}{2} -$$

$$- N_{III} \sin \gamma + F_{тр. III} \cos \gamma - N_{IV} \sin \gamma + F_{тр. IV} \cos \gamma = 0. \quad (7.8)$$

$$F_{тр. пп} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{вп}}{2} \right) + m_n g \cos \frac{\alpha_{вп}}{2} - N_{III} \cos \gamma - f_{тр. п2} N_{III} \sin \gamma +$$

$$+ N_{IV} \cos \gamma + f_{тр. п2} N_{IV} \sin \gamma = 0.$$

$$\begin{aligned}
& N_{\text{III}} - F_{\text{III}}^{\text{H}} - F_{\text{TP. III}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - m_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} - N_{\text{III}} \sin \gamma + \\
& \quad + f_{\text{TP. n2}} N_{\text{III}} \cos \gamma - N_{\text{IV}} \sin \gamma + f_{\text{TP. n2}} N_{\text{IV}} \cos \gamma = 0. \\
& F_{\text{TP. III}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) + m_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} + (N_{\text{IV}} - N_{\text{III}}) (\cos \gamma + f_{\text{TP. n2}} \sin \gamma) = 0. \\
& N_{\text{III}} - F_{\text{III}}^{\text{H}} - F_{\text{TP. III}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - m_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} - (N_{\text{IV}} + N_{\text{III}}) (\sin \gamma - f_{\text{TP. n2}} \cos \gamma) = 0. \\
& N_{\text{IV}} - N_{\text{III}} = \frac{-F_{\text{TP. III}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - m_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\cos \gamma + f_{\text{TP. n2}} \sin \gamma}. \\
& N_{\text{IV}} + N_{\text{III}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{III}}^{\text{H}} - F_{\text{TP. III}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - m_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{TP. n2}} \cos \gamma}. \\
& N_{\text{IV}} - N_{\text{III}} = \frac{-f_{\text{TP. n2}} N_{\text{III}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\cos \gamma + f_{\text{TP. n2}} \sin \gamma}. \\
& N_{\text{IV}} + N_{\text{III}} = \frac{N_{\text{III}} - F_{\text{III}}^{\text{H}} - f_{\text{TP. n2}} N_{\text{III}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{TP. n2}} \cos \gamma}. \\
& N_{\text{IV}} = 0 \quad N_{\text{III}} = 0. \\
& \frac{-f_{\text{TP. n2}} N_{\text{III}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \cos \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\cos \gamma + f_{\text{TP. n2}} \sin \gamma} + \\
& \quad + \frac{-F_{\text{III}}^{\text{H}} - f_{\text{TP. n2}} N_{\text{III}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{np}}}{2} \right) - \rho_{\text{n}} V_{\text{n}} g \sin \frac{\alpha_{\text{np}}}{2}}{\sin \gamma - f_{\text{TP. n2}} \cos \gamma} = 0.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(-f_{\text{тр.п2}} N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} \right) \left(\sin \gamma - f_{\text{тр.п2}} \cos \gamma \right) + \\
& + \left(-F_{\text{пд}}^{\text{н}} - f_{\text{тр.п2}} N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} \right) - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} \right) \left(\cos \gamma + f_{\text{тр.п2}} \sin \gamma \right) = 0. \\
& f_{\text{тр.п2}}^2 N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right) + f_{\text{тр.п2}} \left(\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} + \gamma \right) - \right. \\
& \left. - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right) - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \right) - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \cos \gamma - \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} + \gamma \right) = 0. \\
& D = \left(\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} + \gamma \right) - N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right) - F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \right)^2 + \\
& + 4 N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right) \left(F_{\text{пд}}^{\text{н}} \cos \gamma + \rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \sin \left(\frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} + \gamma \right) \right). \\
& f_{\text{тр.п2 } 1,2} = \frac{-\rho_{\text{п}} V_{\text{п}} g \cos \left(\frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} + \gamma \right) + N_{\text{пд}} \cos \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right) + F_{\text{пд}}^{\text{н}} \sin \gamma \pm \sqrt{D}}{2 N_{\text{пд}} \sin \left(\beta + \frac{\alpha_{\text{ип}}}{2} - \gamma \right)}. \quad (7.9)
\end{aligned}$$

Из зависимостей (7.3), (7.6) и (7.9) можно определить условия незащемления почвенных элементов в межпрутковом пространстве кольчато-прутковых катков и самоочищения пространства между двумя соседними катками, когда значения правой их части больше значений левой.

С целью исключения забивания межкаткового пространства секции или его быстрого самоочищения были предложены две конструкции катковых (дисковых) секций приставок.

Секция почвообрабатывающей дисковой бороны [21] состоит из рамы, соединенной стойками с осью, на которую насажены диски с установленными между ними распорными шпильками. Недостатком данной секции почвообрабатывающей дисковой бороны является подверженность забиванию междискового пространства землей и камнями при работе, что приводит к увеличению

энергоёмкости технологического процесса и снижению качества обработки.

Дисковая борона [22] состоит из насаженных на ось сферических дисков и штанги с закрепленными на ней чистиками. Недостатком данной дисковой бороны является то, что между вогнутой поверхностью дисков и неподвижными чистиками имеется зазор, который в ходе работы забивается растительностью и почвой, что приводит к увеличению энергоёмкости технологического процесса. Кроме того, налипшая на дисках и попавшая в междисковое пространство почва вращается вместе с дисками до момента контакта с чистиками (при этом диски совершают почти половину своего оборота) и также приводит к существенному увеличению энергоёмкости технологического процесса и снижению качества обработки почвы, а установка дополнительных элементов увеличивает массу секции, что также приводит к увеличению энергоёмкости и материалоёмкости процесса.

Задача снижения энергоёмкости технологического процесса и повышение качества поверхностной обработки различного типа почв решается с помощью дисковой секции, состоящей из рамы, закрепленных на ней стоек с подшипниковыми узлами, установленными на оси с возможностью ее вращения, а также насаженных на ось дисков, которые установлены с зазором с возможностью вращательного и осевого относительного перемещения. Между дисками на оси с радиальным зазором коаксиально насажена прорезная пружина, при этом на одном из торцов каждой прорезной пружины закреплена своим дном коаксиально и симметрично оси симметрии прорезной пружины тарелка, наружный диаметр которой в два раза больше наружного диаметра прорезной пружины. Приподнятые края тарелки выступают в сторону, противоположную прорезной пружине, и ребро краев тарелки расположено в плоскости, перпендикулярной оси симметрии прорезной пружины, причем дно тарелки выполнено с отверстием, диаметр и контур которого совпадают с диаметром и контуром внутреннего цилиндрического отверстия прорезной пружины. При этом на примыкающих к оси участках, считая от ее внешнего края, нечетные диски охвачены впритык с обеих сторон торцами прорезных пружин, а четные диски охвачены впритык с обеих сторон ребрами тарелок, причем на концах оси выполнена резьба, на которую навинчены регулировочные гайки, упирающиеся своими торцами в насаженные

с зазором на ось коаксиально распорные втулки, с возможностью регулировки степени прижатия торцов прорезных пружин и ребер тарелок к дискам.

Секция катковой приставки (рис. 7.5) 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 совпадают 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 впрыток с обеих сторон торцами прорезных пружин 6, а четные диски охвачены впрыток 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.

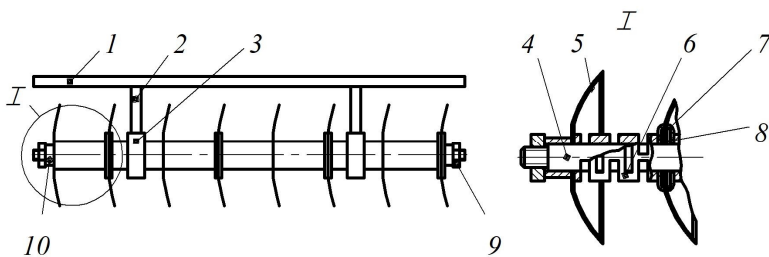


Рис. 7.5. Секция катковой приставки

Устройство работает следующим образом. 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 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. 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.

Задача снижения энергоемкости технологического процесса и повышение качества поверхностной обработки различного типа почв также решается с помощью секции почвообрабатывающей дисковой бороны, состоящей из рамы, закрепленных на ней стоек с подшипниковыми узлами, установленными на оси с возможностью ее вращения, а также насаженных на ось дисков, где диски на оси установлены с зазором с возможностью вращательного и осевого относительного перемещения, между дисками на оси с радиальным зазором коаксиально насажена прорезная пружина, при этом на примыкающих к оси участках диски охвачены впритык с обеих сторон торцами прорезных пружин, причем на концах оси выполнена резьба, на которую навинчены регулировочные гайки, упирающиеся своими торцами в насаженные с зазором на ось коаксиально распорные

втулки с возможностью регулировки степени прижатия торцов прорезных пружин к дискам.

Секция катковой приставки (рис. 7.6) 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.

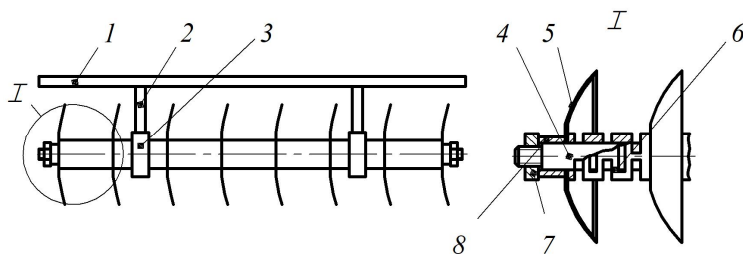


Рис. 7.6. Секция катковой приставки

Устройство работает следующим образом. При обработке почвы диски 5, прижатые своими боковыми сторонами к торцам прорезных пружин 6, под действием силы тяжести заглубляются в почву 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 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 со стороны почвы сил,

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.

8. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОБОРОТНЫХ ПЛУГАХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАЗДЕЛКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ

В настоящее время 12-корпусные оборотные плуги серийно выпускают фирмы Kverneland (Норвегия), Lemken (Германия), Kuhn (Франция), Vogel & Noot (Австрия), Gregoire Besson (Франция), Agritex и «РусАгроМаш» (Россия). Приставки к своим 12-корпусным плугам выпускают фирмы Kverneland и Lemken.

На основании обзора зарубежных и отечественных аналогов [56, 59, 63, 99], для экономической оценки в качестве аналога примем плуг «ЕвроТитан-10» (8+3+1) L 100 с почвоуплотнителем «ВариоПак S110WD70» фирмы Lemken [29].

Исходные данные для расчета основных экономических показателей приведены в табл. 8.1, полученные результаты – в табл. 8.2. Методика расчета (прилож. Д) приведена в [76].

Таблица 8.1

Исходные данные для расчета экономических показателей

Наименование показателей	Значение	
	для иностранного аналога	для исследуемой машины
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Наименование сельскохозяйственной операции	Вспашка	Вспашка
Марка: – трактор – сельскохозяйственная машина	«Беларус-4522С» «ЕвроТитан-10» (8+3+1) L 100 + «ВариоПак S110WD70»	«Беларус-4522С» ПО-(8+4)-40 с приставкой
Обслуживающий персонал, чел., по категориям: – тракторист (количество/разряд)	1/IV	1/ IV
Сменная производительность, га/ч	3,03	3,34

Окончание таблицы 8.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Расход топлива, кг/га	18,5	16,8
Цена топлива, руб./кг	1,5	1,5
Коэффициент отчислений: на амортизацию:		
– плуг	0,125	0,125
– приставка	0,125	0,125
– трактор	0,083	0,083
на текущий ремонт и периодиче- ское техническое обслуживание:		
– плуг	0,4	0,4
– приставка	0,05	0,05
– трактор	0,099	0,099
Годовая загрузка, ч:		
– сельскохозяйственная машина	150	150
– трактор	1000	1000
Годовая наработка, га	454,5	501,0

Таблица 8.2

Показатели экономической эффективности

Наименование показателей	Значение	
	для иностранного аналога	для исследуемой машины
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Затраты труда, чел.-ч/га	0,33	0,30
Прямые эксплуатационные затраты (себестоимость), руб./га, по элементам:		
– зарплата	0,246	0,223
– амортизация	53,29	21,39
– ремонт и техническое обслуживание	144,38	50,88
– топливо	30,53	27,72
Всего	228,75	100,21

Окончание таблицы 8.2

1	2	3
Удельные капитальные вложения (с учетом нормативного коэффициента эффективности $E = 0,2$), руб./га	77,07	38,20
Сумма приведенных затрат, руб./га	305,8	138,4
Годовая экономия затрат труда, чел.-ч		15,03
Степень снижения затрат труда, %		9,1
Годовой приведенный экономический эффект, руб.		83 867,4
Годовая экономия себестоимости механизированных работ, руб.		64 398,5
Степень снижения себестоимости механизированных работ, %		56,2
Годовая экономия топлива, кг		851,7
Степень снижения расхода топлива, %		9,2
Срок окупаемости абсолютных капитальных вложений, лет		1,02
Капитализированная стоимость новой техники, руб.		324 053,5
Цена (плуг + приставка) (без НДС), руб.		66 000

На основании расчетных данных (табл. 8.2) можно сделать вывод, что применение плуга ПО-(8+4)-40 с приставками в агрегатировании с трактором «Беларус-4522С» экономически более выгодно, чем использование его иностранного аналога. При этом затраты труда и расход топлива, соответственно, снизились на 9,1 % и 9,2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии получены следующие результаты.

1. Обоснована конструкция кольчато-пруткового катка для поверхностной обработки почвы, которая обеспечивает качественное крошение, уплотнение и выравнивание поверхностного слоя почвы. Получены зависимости перераспределения нагрузок, действующих в пахотных агрегатах, при навешивании катковых приставок на раму плуга, позволяющие обосновать конструктивно-технологическую схему и рациональные параметры их установки при наименьших энергетических затратах. Предложена конструкция механизма крепления приставок, которая бесступенчато изменяет положение приставки относительно плуга в вертикальной плоскости, что позволяет обеспечить качественную обработку различных почв, создавая необходимое усилие заглабления путем рационального использования веса плуга.

2. Получены аналитические зависимости, определяющие кинематические и технологические параметры движения пласта почвы по рабочей поверхности корпуса плуга в зависимости от конструктивных и технологических параметров плуга и условий его работы.

3. Получены зависимости для определения рациональных конструктивных и технологических параметров кольчато-прутковых рабочих органов в зависимости от физико-механических свойств почвы, агротехнических требований к качеству выполнения процесса, металлоемкости и надежности конструкции приставки.

4. Полученные результаты исследований использованы при разработке катковых приставок для оборотных плугов. Проведенные испытания подтвердили эффективность конструкторских разработок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов, С. Обоснование параметров уплотнительного катка к предпосевному орудью для хлопководства: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. Аминов. – Янгиюль, 1988. – 160 с.
2. Ахмеджанов, М.А. Комплексное исследование и разработка технологии и средств механизации при эксплуатационной планировке орошаемых земель в зоне хлопкосеяния СССР: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.А. Ахмеджанов. – Янгиюль, 1983. – 539 с.
3. Безрукий, А.П. От серпа до комбайна / А.П. Безрукий, Н.К. Макеев. – Минск : Ураджай, 1984. – 239 с.
4. Беларусь и страны мира. Статистический сборник. – Минск : Нац. статист. комитет Республики Беларусь, 2016. – 389 с.
5. Валько, В.П. Почва – фундамент биосферы / В.П. Валько // Междунар. аграр. журнал: Ежемесячный науч.-производ. журнал для работников агропромышленного комплекса / В.П. Валько. – Минск, 1999. – С. 18–21.
6. Ветров, Ю.А. Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю.А. Ветров. – Киев : Изд-во Киевского ун-та, 1965. – 123 с.
7. Ветров, Ю.А. Соппротивление грунтов резанию / Ю.А. Ветров. – Киев : Изд-во Киевского ун-та, 1962. – 96 с.
8. Виноградов, Ю.А. Обоснование параметров пруткового сетчато-зубового катка, используемого в технологическом процессе предпосевной обработки почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ю.А. Виноградов; МИИСП. – М., 1992. – 20 с.
9. Влияние состояния протектора колес энергетических средств на уплотнение почв / Ю.В. Чигарев [и др.] // Агропанорама. – 2012. – № 4. – С. 7–10.
10. Вопросы земледельческой механики: в 5 т. / Ин-т механизации и электрификации сел. хозяйства; М.Е. Мацепуро (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Изд-во Академии с.-х. наук БССР. – 1960. – Т. 5. – 320 с.
11. География почв Беларуси : учебное пособие / Н.В. Клебанович [и др.]; под ред. Н.В. Клебановича. – Минск : БГУ, 2009. – 198 с.
12. Голубев, В.В. Обоснование параметров и режимов работы почвообрабатывающего катка для предпосевной обработки почвы под мелкосеменные культуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Голубев; Тверская гос. с.-х. академия. – Тверь, 2004. – 20 с.

13. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М. : Изд-во по строительству, 1971. – 368 с.
14. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин; ред. Н.Д. Лучинский. – М. : Колос, 1965. – Т. 1. – 720 с.
15. Далин, А.Д. Ротационные почвообрабатывающие и землеройные машины / А.Д. Далин, П.В. Павлов. – М. : Машгиз, 1950. – 252 с.
16. Дроздов, В.Н. Комбинированные почвообрабатывающе-посевные машины / В.Н. Дроздов, А.Н. Сердечный. – М. : Агропромиздат, 1988. – 112 с.
17. Ерзамаев, М.П. Повышение эффективности вспашки разработкой и применением способа ярусной обработки почвы и комбинированного плуга: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.П. Ерзамаев; Самарская ГСХА. – Пенза, 2012. – 19 с.
18. Желиговский, В.А. Колея и механика качения колеса: сборник трудов по земледельческой механике / В.А. Желиговский. – М. : Сельхозиздат, 1956. – Т. 1. – С. 419–450.
19. Захаров, А.В. Улучшение курсовой устойчивости и тягово-энергетических показателей пахотного агрегата стабилизацией в горизонтальной плоскости (на базе тракторов «Беларус» тяговых классов 3 и 5): дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Захаров. – Минск, 2008. – 143 с.
20. Зерновые культуры (выращивание, уборка, доработка и использование) / Д. Шпаар [и др.]; под ред. Д.Шпаара. – 3-е изд., испр. – М. : DLV АГРОДЕЛО, 2008. – 656 с.
21. Избасарова, З.И. Обоснование конструктивно-технологических и режимных параметров спирального пневматического катка для уплотнения почв повышенной влажности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / З.И. Избасарова; Оренбург. гос. аграр. ун-т. – Оренбург, 2009. – 22 с.
22. Казакевич, П.П. Механизация улучшения мелкозалежных торфяных почв методом глубокой мелиоративной вспашки: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / П.П. Казакевич. – Минск, 1985. – 244 с.
23. Казакевич, П.П. Улучшение агроэкологических свойств почв на основе разработки специальных отвальных плугов: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.01 / П.П. Казакевич. – Минск, 1998. – 277 с.
24. Капустин, А.Н. Основы теории и расчета машин для основной и поверхностной обработки почв, посевных машин и машин для внесения удобрений : курс лекций / А.Н. Капустин; Юргинский технолог. ин-т. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. – 134 с.

25. Кацыгин, В.В. О закономерности сопротивления почв сжатую / В.В. Кацыгин // Механизация и электрификация социалистического сел. хоз-ва. – 1962. – № 5. – С. 28–29.

26. Кацыгин, В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск : Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5–147.

27. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – М. : Колос, 1994. – 751 с.

28. Клочков, А.В. Совершенствование орудий для энергоресурсосберегающей технологии обработки почвы при возделывании зерновых в Белоруссии: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.01 / А.В. Клочков. – Ленинград–Пушкин, 1991. – 38 с.

29. Клочков, А.В. Сельскохозяйственные машины / А.В. Клочков, Н.В. Чайчиц, В.П. Буяшов. – Минск : Ураджай, 1997. – 494 с.

30. Кнаус, А.А. Совершенствование катка-выравнивателя для подготовки почвы к посеву: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Кнаус. – Новосибирск, 1987. – 163 с.

31. Кобяков, И.Д. Влияние хода дискового ножа на деформацию почвы / И.Д. Кобяков // Достижение науки и техники в АПК. – 2008. – № 4. – С. 41–43.

32. Кольчато-шпоровый каток: пат. 7334 Респ. Беларусь, МПК А 01В 29/04 / А.С. Назаров, Н.Г. Бакач, С.П. Кострома, Ю.Л. Минич, И.Е. Мажугин; заявитель РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хозяйства». – № u 20100958; заявл. 19.11.2010; опубл. 30.06.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 270.

33. Кольчато-шпоровый каток: пат. 8918 Респ. Беларусь, МПК А 01В 29/04 / А.Н. Басаревский, А.С. Назаров, Ю.Л. Минич, И.Е. Мажугин; заявитель РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хозяйства». – № u 20120627; заявл. 22.06.2012; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1. – С. 286.

34. Компенсация боковой составляющей сопротивления корпуса плуга / В.Я. Тимошенко [и др.] // Агропанорама. – 2009. – № 6. – С. 35–37.

35. Кузнецов, Ю.И. Механико-технологическое обоснование и разработка комплексов комбинированных агрегатов для совмещения операций обработки почвы в системе интенсивного

земледелия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ю.И. Кузнецов; ВИМ. – М., 1991. – 51 с.

36. Кузыченко, Ю.А. Научное обоснование эффективности систем основной обработки почвы под культуры полевых севооборотов на различных типах почв Центрального и Восточного Предкавказья: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Ю.А. Кузыченко; Ставропольский НИИСХ. – Ставрополь, 2014. – 290 с.

37. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев : Урожай, 1989. – 139 с.

38. Лаврухин, В.А. Оптимизация рабочих поверхностей корпусов плуга / В.А. Лаврухин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 5. – С. 39–40.

39. Лебедка сельскохозяйственная ЛС-100А [Электронный ресурс] // ОАО «Могилевлифтмаш». – Режим доступа: <https://www.liftmach.by/catalog/lebyedki-selskokhozyaystvennye>. – Дата доступа: 10.07.2019.

40. Лепешкин, Н.Д. Основные направления развития механизации обработки почвы и посева в Республике Беларусь до 2030 года / Н.Д. Лепешкин, А.А. Точицкий, В.В. Мижурин, Д.В. Заяц // Механизация и электрификация сел. хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хозяйства». – Минск, 2018. – Вып. 51. – С. 10–16.

41. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины / М.Н. Летошнев. – М. : Сельхозгиз, 1955. – 759 с.

42. Мармалюков, В.П. Исследование процесса механизации предпосевной обработки почвы катком-выравнивателем в условиях нечерноземной зоны: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.П. Мармалюков. – Минск, 1980. – 196 с.

43. Мацепуро, М.Е. Укатывание торфяно-болотных почв / М.Е. Мацепуро, В.А. Новичихин // Вопросы земледельческой механики: сб. науч. трудов. – Минск, 1960. – Т. IV. – С. 78–96.

44. Медведев, В.В. Использование агрофизических свойств черноземов при разработке почвообрабатывающих машин / В.В. Медведев, П.И. Слободюк, В.Ф. Пащенко // Механизация и электрификация сел. хозяйства. – 1987. – № 3. – С. 6–8.

45. Медведев, В.В. Некоторые изменения физических свойств черноземов при обработке / В.В. Медведев // Почвоведение. – 1979. – № 1. – С. 79–97.

46. Медведев, В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов / В.В. Медведев. – М. : Агропромиздат, 1988. – 157 с.

47. Медведев, В.В. Физические свойства и характер залегания плужной подошвы в разных типах пахотных почв / В.В. Медведев // Почвоведение. – 2011. – № 12. – С. 148–149.

48. Моделирование рабочей поверхности плуга в САПР / С.Г. Мударисов [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. — 2008. – № 7–1. – С. 37–40.

49. Мударисов, С.Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой / С.Г. Мударисов // Тракторы и с.-х. машины. – 2005. – № 7. – С. 27–30.

50. Мударисов, С.Г. Оптимизация геометрии лемешно-отвальной поверхности плуга / С.Г. Мударисов, В.Г. Муфтеев, И.М. Фархутдинов // Механизация и электрификация сел. хозяйства. – 2009. – № 4. – С. 17–18.

51. Непарко, Т.А. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства : учебное пособие / Т.А. Непарко, А.В. Новиков, И.Н. Шило; под общ. ред. Т.А. Непарко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2015. – 199 с.

52. Новичихин, В.А. Деформация опорными поверхностями сжимаемой среды / В.А. Новичихин. – Минск : Высш. школа, 1964. – 137 с.

53. Обосновать основные параметры, разработать и внедрить устройство для разделки и поверхностной обработки почвенного пласта к плугу для гладкой вспашки: отчет о НИР / БГАТУ; рук. темы Ю.В. Чигарев. – Минск, 2007. – № ГР 20072650.

54. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Мащенко, А.С. Солонский; под ред. В.А. Скотникова. – М. : Агропромиздат, 1986. – 383 с.

55. Падальцин, К.Д. Снижение энергозатрат и повышение качества показателей поверхностной обработки почвы комбинированием рабочих органов культиватора: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / К.Д. Падальцин. – Ставрополь, 2015. – 128 с.

56. Полунавесные оборотные плуги EURO TITAN и VARITITAN // Фирма Лемкен [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://lemken.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Produkte/Bodenbearbeitung/Pfl%C3%BCgen/EuroTitan-VariTitan_ru.pdf. – Дата доступа: 10.06.2019.

57. Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия: СТБ 1388–2003. – Введ. 19.03.2003. – Минск : Госстандарт, 2009. – 13 с.

58. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов / М.Д. Подскребко. – Минск : Выш. школа, 2007. – 797 с.

59. Потребительские характеристики орудий для рыхления почвы и заделки стерни / М.С. Добровольский [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 4. – С. 5–9.

60. Почвоуплотнители VARIOPACK, FIXPACK и FLEXPACK // Фирма Лемкен [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://lemken.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Produkte/Bodenbearbeitung/R%C3%BCckverfestigung/VarioPack-FixPack-FlexPack_ru.pdf. – Дата доступа: 10.06.2019.

61. Почвы Беларуси : учебное пособие / А.И. Горбылева [и др.]; под ред. А.И. Горбылевой. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – 184 с.

62. Почвы способствуют смягчению последствий изменения климата [Электронный ресурс] // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. – Режим доступа: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/ru/c/292793>. – Дата доступа: 04.04.2019.

63. Прайс-лист на технику. Обработка почвы. Посев. Защита растений. – Введ. в действие 01.01.2015. – Alpen : LEMKEN GmbH&Co. KG, 2015. – 436 с.

64. Приемочные испытания опытного образца приставки ПД-1.6 к плугу четырехкорпусному оборотному ППО-4-40. Протокол № 205 Б ½–2009 от 16 декабря 2009 года. – Привольный : Белорусская МИС, 2009. – 51 с.

65. Приемочные испытания опытного образца приставки ПД-2,0 к плугу пятикорпусному оборотному ППО-5-40. Протокол № 204 Б ½–2009 от 16 декабря 2009 года. – Привольный : Белорусская МИС, 2009. – 54 с.

66. Приемочные испытания опытного плуга 12-корпусного оборотного ПО-(8+4)-40. Протокол № 093 Б ½–2016ИЦ от 27 декабря 2016 года. – Привольный : Белорусская МИС, 2016. – 75 с.

67. Ревут, И.Б. Физика почв / И.Б. Ревут. – Д. : Колос, 1972. – 368 с.

68. Рожков, П.Н. Исследование процесса взаимодействия гладких катков с почвой и обоснование их формы: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / П.Н. Рожков; МИМСХ. – Харьков, 1975. – 27 с.

69. Руководство оператора: ТанDEMная дисковая борона серии 800NT. – США : Wishek, 2008. – 64 с.

70. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М. : ВИМ, 1998. – 368 с.

71. Саакян, Д.Н. Контроль качества механизированных работ в полеводстве / Д.Н. Саакян. – М. : Колос, 1973. – 272 с.

72. Саакян, С.С. Взаимодействие ведомого колеса и почвы / С.С. Саакян. – Ереван : Мин-во сел. хоз-ва Арм. ССР, 1959. – 65 с.

73. Сев озимых культур под урожай 2014 года [Электронный ресурс] : рекомендации Минсельхозпрода РБ и РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию», 17.07.2013 / РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию». – Режим доступа: <http://izis.by/wp-content/uploads/articles/ozimyi-sev-recomendacii-pod-urozhai-2014.pdf>. – Дата доступа: 23.01.2019.

74. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистич. сборник. – Минск : Нац. статистич. комитет Республики Беларусь, 2019. – 212 с.

75. Сельскохозяйственная техника. Машины почвообрабатывающие. Правила установления показателей назначения = Сельскагаспадарчая тэхніка. Машыны глебаапрацоўчыя. Правілы ўсталявання паказчыкаў прызначэння: ТКП 079–2007 (02150) (СТО АИСТ 10 4.6–2003). – Введ. 19.04.2007. – Минск : Минсельхозпрод, 2007. – 28 с.

76. Сельскохозяйственная техника. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей = Выпрабаванне сельскагаспадарчай тэхнікі. Метады эканамічнай ацэнкі. Парадак вызначэння паказчыкаў: ТКП 151–2008 (02150). – Введ. 01.02.2009. – Минск : Минсельхозпрод, 2009. – 20 с.

77. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1986. – 687 с.

78. Сельскохозяйственные машины / А.В. Клочков [и др.]; под ред. Р.Я. Лифшица. – Минск : Ураджай, 1997. – 494 с.

79. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 331 с.

80. Скорик, В.И. Исследование некоторых вопросов процесса взаимодействия гладких катков и почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.И. Скорик; МИИСП. – М., 1965. – 19 с.

81. Соколовский, И.В. Почвоведение : учебное пособие / И.В. Соколовский. – Минск : БГТУ, 2005. – 329 с.

82. Соппротивление почв : конспект лекций для специальности 74.06.01 «Технич. обесп. процессов с.-х. производства» / Министерство сел. хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, БГАТУ, Каф. «Соппротивление материалов и деталей машин»; сост. А.Н. Орда. – Минск, 2002. – 94 с.

83. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин / В.И. Александров [и др.]; под ред. А.В. Красниченко. – М. : Машиностроение, 1961. – 864 с.

84. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин: в 4 т. / под ред. М.И. Клецкина. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 2. – 830 с.

85. Старовойтов, С.И. Исследование вязкости среднесуглинистой почвы / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2011. – № 2. – С. 55–56.

86. Тетеркин, А.Е. Соппротивление материалов : методическое пособие для самостоятельной работы студентов / А.Е. Тетеркин, Д.Н. Колоско. – Минск : БГАТУ, 2002. – 126 с.

87. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Курсовое проектирование : пособие / Т.А. Непарко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 288 с.

88. Тряпичкин, С.В. Исследование сельскохозяйственных катков на повышенных скоростях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.В. Тряпичкин; СИБНИИЗХОЗ. – Омск, 1963. – 23 с.

89. Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины: теория, расчет, результаты испытаний / В.И. Ветохин [и др.]. – К. : Феникс, 2009. – 264 с.

90. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. – К. : Феникс, 2008. – 266 с.

91. Хахулин, А.Н. Совершенствование процесса вспашки путем увеличения угла оборота почвенных пластов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Хахулин. – Воронеж, 2017. – 173 с.

92. Цитович, Н.А. Основы механики грунтов / Н.А. Цитович. – М. : Главная ред. строит. лит-ры, 1934. – 305 с.

93. Чигарев, Ю.В. Математические основы механики почв : учебное пособие / Ю.В. Чигарев, П.Н. Синкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 164 с.

94. ЧУДО-ПЛУГ [Электронный ресурс] // Интегрированная информационно-аналитическая и инвестиционно-деловая Интернет-

видеосеть. – Режим доступа: <http://www.agronet.ru/articles/plug2.htm>. – Дата доступа: 10.03.2019.

95. Шаганов, И.А. Практические рекомендации по освоению интенсивной технологии выращивания озимых зерновых культур / И.А. Шаганов. – Минск : Равноденствие, 2008. – 96 с.

96. Юрин, А.Н. Повышение эффективности отвального лущения обоснованием параметров рабочих органов плуга-лушительника: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Юрин. – Минск, 2006. – 171 с.

97. Яковчик, С.Г. Перспективные направления создания инновационной сельскохозяйственной техники в Республике Беларусь / С.Г. Яковчик [и др.] // Механизация и электрификация сел. хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хозяйства». – Минск, 2018. – Вып. 51. – С. 3–9.

98. Яковчик, С.Г. Создание инновационной сельскохозяйственной техники в Республике Беларусь / С.Г. Яковчик [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хозяйства», Минск, 18–20 окт. 2017 г. / редкол.: П.П. Казакевич (гл. ред.), Л.Ж. Кострома. – Минск : Беларус. навука, 2017. – С. 3–9.

99. Kverneland PW–RW. Эффективный, гибкий и легкий в эксплуатации плуг «3-в-1» для высокопроизводительной вспашки. [Электронный ресурс] // Kverneland group. – Режим доступа: <https://ru.kverneland.com/Obrabotka-pochvy/Plugi/Polunavesnye-oborotnye-plugi/Kverneland-PW-RW>. – Дата доступа: 10.06.2019.

100. Фельдман, О.В. Потоковые модели агроэкосистем / О.В. Фельдман // Математическое моделирование. – 1999. – № 10. – С. 31–48.

101. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 416 с.

102. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов : учебное пособие для строительных вузов / С.С. Вялов. – М. : Высш. школа, 1978. – 447 с.

103. Чыгароў, Ю.У. Ацэнка агра-тэхнічнага пашкоджання глебы пры тэхнічным дэфармаванні / Ю.У. Чыгароў // Весці АН БССР. Сер. сельскагаспадарчых навук. – 1991. – № 3. – С. 51–54.

104. Проектирование катковых приставок для пахотных агрегатов. Рекомендации / И.С. Крук [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2017. – 104 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Алгоритм двухфакторного анализа зависимости глубины погружения от массы диска и влажности почвы

План эксперимента				Результаты опытов и обработки эксперимента							
N_{20+1}	X_{0j}	X_{1j}	X_{2j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	\bar{Y}_j	S_j^2	Y_j^p	$(\bar{Y}_j - Y_j^p)^2$
1	1	-	-	17,5	13,5	21,5	16,7	17,3	10,83	19,88	6,64
2	1	+	-	60,2	49,0	63,5	60,8	58,4	41,18	57,33	1,12
3	1	-	+	23,5	21,7	20,0	30,0	23,8	19,06	22,75	1,12
4	1	+	+	65,0	58,0	52,5	55,0	57,6	29,23	60,20	6,64
5	1	0	0	41,0	51,0	40,0	40,3	43,1	28,09	40,04	9,21
$\sum_{j=1}^5 X_{0j}$	5	0	0								
$\sum_{j=1}^5 X_{1j}^2$	5	4	4								
Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии								Проверка адекватности модели			
b_r	40,04	18,73	1,44					$\sum_{j=1}^5 S_{rj}^2 = 128,39$	$\Phi = 24,75$		
S_{br}^2	1,28	1,60	1,60			Критерий Стьюдента		$S^2_{восп} = 25,67$	$S^2_{ад} = 49,49$		
S_{br}	1,13	1,27	1,27			$t_{15;0,95} = 2,13$		F_3	1,93		
Δb_r	2,41	2,70	2,70					F (критерий Фишера)	3,68		
Вывод ($ b_r > \Delta b_r$)	знач.	знач.	незнач.					Вывод ($F < F_3$)	Модель адекватна		
Уравнение регрессии (модель первого порядка)							Уравнение регрессии				
$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$							$Y = 40,04 + 18,73x_1$				

Приложение Б

Алгоритм трехфакторного анализа зависимости величины уплотнения почвы в слое 0–5 см от массы катковой приставки, диаметра дисков и шага установки на них прутков

Журнал планирования эксперимента					Наименование и обозначение объекта							
Контролируемые переменные (факторы) (условные обозначения)	$m_{гр}$	D	l		Кольчато-прутковый каток							
					Априорные сведения			Особые указания				
Единицы измерения параметров	кг	мм	мм		За параметр оптимизации принят коэффициент вариации плотности почвы			Исследования проводились в почвенном канале БГАТУ, на дерново-подзолистых почвах при влажности 17 %				
Верхний уровень	80	510	96									
Нижний уровень	27	390	0									
Основной уровень	53,5	450	48									
Интервал варьирования	26,5	60	48									
План эксперимента					Результаты опытов							
N_{30+1}	X_{0j}	X_{1j}	X_{2j}	X_{3j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	Y_{5j}	Y_{6j}	Y_{7j}	\bar{Y}_j
1	+	-	-	-	1,07	1,06	1,11	1,13	1,08	1,07	1,11	1,090
2	+	+	-	-	1,10	1,13	1,15	1,11	1,09	1,16	1,11	1,121
3	+	-	+	-	1,06	1,06	1,11	1,13	1,08	1,07	1,11	1,089
4	+	+	+	-	1,10	1,13	1,15	1,11	1,09	1,16	1,11	1,121
5	+	-	-	+	0,73	1,01	1,13	0,86	0,79	0,95	0,93	0,914
6	+	+	-	+	0,90	0,92	0,92	0,90	0,84	0,93	0,86	0,895
7	+	-	+	+	0,89	0,92	0,89	0,88	0,94	0,95	1,00	0,925
8	+	+	+	+	0,77	0,80	0,86	0,82	0,87	0,89	0,99	0,857
9	+	0	0	0	1,05	0,82	1,04	0,96	0,89	0,95	1,06	0,968
$\sum_{j=1}^9 X_{0j}$	9	0	0	0								
$\sum_{j=1}^9 X_{0j}^2$	9	8	8	8								

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии						Проверка адекватности модели	
b_r	0,998	-0,003	-0,004	-0,104	Критерий Стьюдента	$\sum_{j=1}^9 S_j^2 = 0,037$	$\varphi = 0,005$
S_{br}^2	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$		$S_{\text{восп}}^2 = 0,041$	$S_{\text{ад}}^2 = 0,46$
S_{br}	0,0081	0,0085	0,0085	0,0085	$t_{54;0,95} = 2,005$	F_3	1,118
Δb_r	0,016	0,017	0,017	0,017		F (критерий Фишера)	2,274
Вывод ($ b_r > \Delta b_r$)	знач.	незнач.	незнач.	знач.		Вывод ($F < F_3$)	Модель адекватна
Уравнение регрессии (модель первого порядка)					Уравнение регрессии		
$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$					$Y = 0,998 - 0,104 x_3$		

Приложение В

Алгоритм трехфакторного анализа зависимости величины уплотнения почвы в слое 5–10 см от массы катковой приставки, диаметра дисков и шага установки на них прутков

Журнал планирования эксперимента				Наименование и обозначение объекта								
Контролируемые переменные (факторы) (условные обозначения)	$m_{гр}$	D	l	Кольчато-прутковый каток								
				Априорные сведения	Особые указания							
Единицы измерения параметров	кг	мм	мм	За параметр оптимизации принят коэффициент вариации плотности почвы	Исследования проводились в почвенном канале БГАТУ, на дерново-подзолистых почвах при влажности 17 %							
Верхний уровень	80	510	96									
Нижний уровень	27	390	0									
Основной уровень	53,5	450	48									
Интервал варьирования	26,5	60	48									
Уравнение регрессии первого порядка												
План эксперимента				Результаты опытов								
N_{30+1}	X_{0j}	X_{1j}	X_{2j}	X_{3j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	Y_{5j}	Y_{6j}	Y_{7j}	\bar{Y}_j
1	+	-	-	-	0,92	0,93	0,92	0,91	0,93	0,95	0,93	0,927
2	+	+	-	-	1,13	1,14	1,15	1,08	1,09	1,16	1,16	1,130
3	+	-	+	-	0,91	0,91	0,92	0,91	0,93	0,90	0,91	0,913
4	+	+	+	-	0,93	0,94	0,95	0,94	0,93	0,94	0,96	0,941
5	+	-	-	+	0,87	0,83	0,83	0,92	0,88	0,92	0,84	0,870
6	+	+	-	+	0,91	0,91	0,96	0,95	0,92	0,93	0,92	0,929
7	+	-	+	+	1,06	1,01	1,01	1,08	0,99	1,03	1,02	1,027
8	+	+	+	+	0,97	0,95	0,84	0,96	0,92	0,85	0,90	0,913
9	+	0	0	0	1,02	1,01	0,88	0,93	0,89	1,03	0,96	0,960
$\sum_{j=1}^9 X_{0j}$	9	0	0	0								
$\sum_{j=1}^9 X_{0j}^2$	9	8	8	8								

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии					Проверка адекватности модели		
b_r	0,957	0,022	-0,008	-0,022	Критерий Стьюдента	$\sum_{j=1}^9 S_j^2 = 0,011$	$\varphi = 0,040$
S_{br}^2	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$		$S_{восп}^2 = 0,0012$	$S_{ад}^2 = 0,040$
S_{br}	0,0044	0,0047	0,0047	0,0047	$t_{54;0,95} = 2,005$	F_3	32469
Δb_r	0,009	0,009	0,009	0,009		F (критерий Фишера)	2,274
Вывод ($ b_r > \Delta b_r$)	знач.	знач.	незнач.	знач.		Вывод ($F < F_3$)	Модель неадекватна
Уравнение регрессии (модель первого порядка)					Уравнение регрессии		
$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$					$Y = 0,957 + 0,022X_1 - 0,022X_3$		

Приложение Г

Алгоритм анализа дальности полета частиц почвы относительно корпуса плуга в зависимости от скорости движения плуга

Журнал планирования эксперимента		Наименование и обозначение объекта								
Контролируемые переменные (факторы) (условные обозначения)	$V_{\text{гр}}$	Кольчато-прутковый каток								
		Априорные сведения						Особые указания		
Единицы измерения параметров	м/с	Дальность полета частиц почвы относительно корпуса плуга						Поля КУП «Минская овощная фабрика» Минского района		
Верхний уровень	2,78									
Нижний уровень	2,22									
Основной уровень	2,5									
Интервал варьирования	0,14									
Результаты опытов и обработки эксперимента										
N_{30+1}	X_0	X_1	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	\bar{Y}_j	S_j^2	Y_j^p	$(\bar{Y}_j - Y_j^p)^2$
1	1	-1	0,59	0,62	0,66	0,68	0,64	0,0016	0,67	0,0010
2	1	-0,5	0,67	0,68	0,74	0,72	0,70	0,0010	0,71	0,0002
3	1	0	0,79	0,78	0,74	0,82	0,77	0,0016	0,77	0,0000
4	1	0,5	0,84	0,82	0,81	0,85	0,83	0,0003	0,81	0,0002
5	1	1	0,85	0,91	0,87	0,93	0,89	0,0013	0,86	0,0008
$\sum_{j=1}^5 X_{0j}$	5	0								
$\sum_{j=1}^5 X_{0j}^2$	5	2,5								
Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии							Проверка адекватности модели			
b_r	0,7655	0,0949	Критерий Стьюдента		$\sum_{j=1}^5 S_{rj}^2 = 0,0061$		$\Phi = 0,0025$			
S_{br}^2	0,0001	0,00012	$t_{15; 0,95} = 2,13$		$S^2_{\text{восп}} = 0,0012$		$S^2_{\text{ад}} = 0,0034$			
S_{br}	0,009	0,011			F_3		2,76			
Δb_r	0,019	0,023			F (критерий Фишера)		2,9			
Вывод ($ b_r > \Delta b_r$)	знач.	знач.			Вывод ($F < F_3$)		Модель адекватна			
Уравнение регрессии (модель первого порядка)					Уравнение регрессии					
$Y = b_0 + b_1 x_1$					$Y = 0,765 - 0,095 x_1$					

Приложение Д

Методика расчета экономических показателей

При сравнительной экономической оценке сельскохозяйственной техники в качестве критерия используется минимизация показателей, которые определяются по следующим зависимостям.

Производительность агрегата на механизированных полевых работах за 1 ч сменного времени:

$$W = 0,1B_p \cdot v_p \cdot \tau, \quad (\text{Д.1})$$

где B_p – рабочая ширина захвата, м;

v_p – средняя рабочая скорость движения агрегата, км/ч;

τ – коэффициент использования времени смены,

$$\tau = \frac{T_p}{T}, \quad (\text{Д.2})$$

где T_p – чистое рабочее время, ч;

T – нормативное время смены, ч,

$$T = T_p + t_x + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6, \quad (\text{Д.3})$$

где t_x – время на холостые повороты и заезды при работе на загоне, ч;

t_1 – время остановок агрегата на технологическое обслуживание, ч;

t_2 – время на техническое обслуживание агрегата в поле, ч;

t_3 – время простоев по техническим неисправностям, ч;

t_4 – время простоев по организационным причинам, ч;

t_5 – время на отдых и личные надобности механизатора, ч;

t_6 – подготовительно-заключительное время, ч,

$$t_6 = t_{\text{ЕТО}} + t_{\text{ПП}} + t_{\text{ПН}} + t_{\text{ПНК}}, \quad (\text{Д.4})$$

где $t_{\text{ЕТО}}$ – время на проведение ежесменного технического обслуживания, ч;

$t_{\text{ПП}}$ – время на подготовку агрегата к переезду, ч;

$t_{\text{ПН}}$ – время на получение наряда и сдачу работы, ч;

$t_{\text{ПНК}}$ – время на переезды в начале и конце смены, ч.

Чистое рабочее время определяем как

$$T_p = \frac{2 \cdot L_p \cdot n_{\text{ц}}}{3600 \cdot v_p}, \quad (\text{Д.5})$$

где L_p – рабочая длина гона, м;

$n_{\text{ц}}$ – количество циклов работы агрегата за смену,

$$n_{\text{ц}} = \frac{T - t_2 - t_5 - t_6}{t_{\text{ц}}}, \quad (\text{Д.6})$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла (между двумя технологическими обслуживаниями), ч,

$$t_{\text{ц}} = \frac{10^{-3}}{3,6} \left(\frac{2 \cdot L_p}{v_p} + \frac{2 \cdot l_x}{v_x} + 60 \cdot t_{\text{оп}} \right), \quad (\text{Д.7})$$

где l_x – длина холостого хода, м;

v_x – скорость движения агрегата на холостом ходу, км/ч;

$t_{\text{оп}}$ – время остановки на устранение технологических отказов, мин,

$$L_p = L - 2E, \quad (\text{Д.8})$$

где L – длина гона, м,

E – ширина поворотной полосы, м,

$$E = 2,8R_0 + 0,5d_k + e, \quad (\text{Д.9})$$

где R_0 – радиус поворота, м;

d_k – кинематическая ширина агрегата, м;

e – длина выезда агрегата, м,

$$e = (0,25 - 0,75) l_k, \quad (\text{Д.10})$$

где l_k – кинематическая длина агрегата, м,

$$l_k = l_T + l_M, \quad (\text{Д.11})$$

где l_T – кинематическая длина трактора, м;

l_M – кинематическая длина машины, м.

Время холостых поворотов за смену:

$$t_x = \frac{l_x \cdot n_{\text{п}}}{3600 \cdot v_x}. \quad (\text{Д.12})$$

Длина холостого хода:

$$l_x = (6,6-8,0) R_0 + 2 \cdot e. \quad (\text{Д. 13})$$

Время остановок за смену:

$$t_1 = t_{\text{он}} n_{\text{п}}. \quad (\text{Д.14})$$

Экономическую оценку проводят на основании ТКП 151–2008 (02150) (ОСТ 102.18–2001) «Методы экономической оценки. Порядок определения показателей».

Себестоимость механизированных работ $I_{\text{п}}$ (руб./га) вычисляют по формуле

$$I_{\text{п}} = З + \Gamma + R + A, \quad (\text{Д.15})$$

где $З$ – затраты на оплату труда обслуживающего персонала, руб./га;

Γ – затраты средства на ГСМ и другие энергоресурсы, руб./га;

R – затраты средств на ремонт и техническое обслуживание в целом по агрегату, руб./га;

A – отчисления на амортизацию, руб./га.

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала ($З$, руб./га) вычисляют по формуле

$$З = \frac{1}{W_{\text{см}}} \sum_j Л \cdot t_j, \quad (\text{Д.16})$$

где $W_{\text{см}}$ – производительность агрегата за час сменного времени, га/ч;

$Л$ – количество обслуживающего персонала, чел.;

t_j – часовая тарифная ставка оплаты труда обслуживающего персонала по j -му разряду, руб./чел.-ч.

Затраты средства на ГСМ и другие энергоресурсы (Γ , руб./га) вычисляют по формуле

$$\Gamma = q_{\text{т}} \Pi_{\text{т}} K_{\text{мс}}, \quad (\text{Д. 17})$$

где q_T – удельный расход топлива, кг/га;

Π_T – цена одного килограмма топлива, руб./кг;

$K_{см}$ – коэффициент учета стоимости смазочных материалов (отечественной техники и стран СНГ – 1,10; зарубежной – 1,25).

Удельный расход топлива можно определить по следующей формуле:

$$q_T = \frac{G_T}{W_{см}}, \quad (Д.18)$$

где G_T – расход топлива за час сменного времени, соответствующий загрузке двигателя, кг/ч.

Затраты средств на ремонт и техническое обслуживание в целом по агрегату (R , руб./га) вычисляют по формуле

$$R = \sum_{j=1}^m \frac{B_{нj} r_j}{W_{смj} T_3}, \quad (Д.19)$$

где $B_{нj}$ – балансовая цена j -й машины, руб.;

r_j – коэффициент отчислений на ремонт и техническое обслуживание по j -й машине, трактору;

$W_{смj}$ – производительность машины за час сменного времени, га/ч;

T_3 – зональная годовая загрузка j -й машины (трактора), ч.

Отчисления на амортизацию (A , руб./га) наработки вычисляют с использованием линейного метода:

$$A = \sum_{j=1}^m \frac{B_{нj} a_{нj}}{W_{смj} T_3}, \quad (Д.20)$$

где $a_{нj}$ – коэффициент отчислений на амортизацию по j -й машине (трактору) (по нормативно-справочной документации).

Фактическое значение коэффициента отчислений на амортизацию, $a_{н}$, вычисляют по формуле

$$a_n = \frac{1}{T_c}, \quad (\text{Д.21})$$

где T_c – срок службы техники, лет.

Годовая экономия себестоимости механизированных работ по технике (\mathcal{E}_c , руб.) вычисляются по формуле

$$\mathcal{E}_c = (I_{пб} - I_{пн}) B_3, \quad (\text{Д.22})$$

где B_3 – годовой объем работ новой техники, га.

Годовой приведенный экономический эффект от эксплуатации новой техники (\mathcal{E}_r , руб.) вычисляются по формуле

$$\mathcal{E}_r = (П_б - П_н) B_3, \quad (\text{Д.23})$$

где $П_б$, $П_н$ – приведенные затраты по базовой и новой технике, руб./га.

Приведенные затраты ($П$, руб./га) вычисляются по формуле

$$П = I_п + K_{уд} \cdot E_n, \quad (\text{Д.24})$$

где $K_{уд}$ – удельные капиталовложения, руб./га;

E_n – коэффициент эффективности капиталовложений ($E_n = 0,2$).

Удельные капиталовложения ($K_{уд}$, руб./га) вычисляются по формуле

$$K_{уд} = \sum_i \frac{B_{ni} E_n}{W_{см} T_{zi}}, \quad (\text{Д.25})$$

где B_i – балансовая цена i -й машины (трактора) руб.

Годовую экономию затрат труда при эксплуатации новой техники ($\mathcal{Z}_т$, чел.-ч) вычисляются по формуле

$$\mathcal{Z}_т = (\mathcal{Z}_{тб} - \mathcal{Z}_{тн}) B_3, \quad (\text{Д.26})$$

где $\mathcal{Z}_{тб}$, $\mathcal{Z}_{тн}$ – трудоемкость выполнения механизированных работ по базовой и новой машине соответственно, чел.-ч/га, где

$$\mathcal{Z}_т = Л / W_{см}. \quad (\text{Д.27})$$

Коэффициент эффективности снижения себестоимости механизированных работ по новой технике (P , %) вычисляют по формуле

$$P = \frac{\mathcal{E}_c}{I_{нб} B_3} \cdot 100. \quad (Д.28)$$

Степень изменения затрат при эксплуатации новой техники (C , %) вычисляют по формуле

$$C = \frac{3_{тб} - 3_{тн}}{3_{тб}} \cdot 100. \quad (Д.29)$$

Капитализированную стоимость новой специализированной техники (Π_n , руб.) вычисляют по формуле

$$\Pi_n = \frac{\mathcal{E}_r}{a_n + E_n} + B_n. \quad (Д.30)$$

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Крук Игорь Степанович,
Назаров Федор Игоревич,
Чигарев Юрий Власович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ РАЗДЕЛКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ К ОБОРОТНЫМ ПЛУГАМ

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

Подписано в печать 29.10.2021. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 10,36. Тираж 100 экз. Заказ 521.

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.