

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСОВ ПЛУГА  
С ВИБРАЦИОННЫМИ ПЛАСТИНЧАТЫМИ ОТВАЛАМИ.  
РЕКОМЕНДАЦИИ**

Минск  
БГАТУ  
2023

**Авторы:**

*В. П. Чеботарев, Д. А. Яновский, Д. Н. Бондаренко, А. А. Зенов, И. С. Крук, Ф. И. Назаров, Г. А. Радишевский, Н. П. Гурнович, С. Р. Белый (БГАТУ), С. К. Карпович, Ю. Л. Салапура, А. С. Матвейчук (МСХП РБ), Н. Д. Лепешкин (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»)*

**Проектирование корпусов плуга с вибрационными пластинчатыми отвалами. Рекомендации / В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2023. – 104 с. – ISBN 978-985-25-0239-9.**

Представлен обзор конструкций и способов снижения тягового сопротивления плугов. Изложена методика расчета параметров корпуса плуга с вибрационным пластинчатым отвалом. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструктивных и технологических параметров вибрационных пластин отвала и др.

Предназначено для научных работников, специалистов АПК, преподавателей, аспирантов, магистрантов, слушателей факультетов повышения квалификации и студентов вузов сельскохозяйственного профиля.

Табл. 8. Ил. 67. Библиогр.: 82 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Министерства сельского хозяйства и продовольствия  
Республики Беларусь (протокол № 4-23 от 27 декабря 2023 г.)

**Рецензенты:**

кафедра «Тракторы» Белорусского национального технического университета (доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой *В. П. Бойков*);  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики материалов и деталей машин  
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» *А. Н. Орда*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ВИБРАЦИОННОГО ОТВАЛА.....	7
1.1. Роль вспашки в энергосбережении и экономии топлива в сельскохозяйственном производстве Республики Беларусь .....	7
1.2. Направления совершенствования плугов мировых производителей .....	10
1.3. Анализ мировых тенденций совершенствования лемешно-отвальных поверхностей корпусов плуга .....	15
1.4. Исследование способов снижения тягового сопротивления плуга.....	17
1.5. Роль колебательных и вибрационных явлений в почвообработке .....	24
1.6. Активно вибрирующие почвообрабатывающие рабочие органы .....	27
1.7. Пассивно вибрирующие почвообрабатывающие рабочие органы .....	32
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА ПЛУГА С ВИБРИРУЮЩИМ ПЛАСТИНЧАТЫМ ОТВАЛОМ .....	37
2.1. Влияние пластинчатых отвалов на качество обработки почвы .....	37
2.2. Влияние площади контакта отвала на тяговое сопротивление при вспашке.....	39
2.3. Обоснование основных параметров пластинчатого отвала .....	40
2.4. Определение уравнений изменения углов изгиба и прогибов пластины по длине.....	57
2.5. Определение величины тягового сопротивления корпуса плуга со сплошным и пластинчатым отвалом .....	60
2.6. Определение удельной равномерно распределенной нагрузки на пластину отвала .....	64
2.7. Определение величины отклонения пластины отвальной поверхности корпуса плуга .....	65

2.8. Определение частоты колебаний пластин отвальной поверхности .....	68
2.9. Обоснование параметров комплекта пластин вибрационного пластинчатого отвала.....	69
2.10. Теоретическое обоснование параметров компенсирующего механизма с пружиной сжатия.....	75
<b>3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ОТВАЛОВ КОРПУСОВ ПЛУГА .....</b>	<b>82</b>
3.1. Проектирование макетного образца вибрационного пластинчатого отвала .....	82
3.2. Экспериментальные исследования вибрационных характеристик пластин корпуса плуга .....	88
3.3. Сравнительный анализ тягового сопротивления различных типов корпусов плуга .....	90
3.4. Предложения для проектирования вибрационных пластинчатых отвалов корпусов плуга .....	92
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>93</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В технологии возделывания сельскохозяйственных культур наиболее энергоемким и трудоемким процессом является обработка почвы. Некачественная и несвоевременная обработка почвы может быть одной из причин целого ряда негативных последствий: снижения плодородия, повышения плотности верхних слоев, усиления эрозионных процессов. Вспашка с оборотом пласта, несмотря на высокие энергетические затраты, продолжает оставаться преобладающим приемом основной обработки почвы. Эффективная основная обработка почвы позволяет создавать условия для накопления влаги и сохранения ее для продуктивного использования культурными растениями, бороться с вегетирующей сорной растительностью, регулировать сложение пахотного слоя почвы, обеспечивающего благоприятный тепловой, водный и воздушный режимы.

Качественная и своевременная основная обработка позволяет не только сохранить накопленную почвой влагу, заложить основу будущего урожая, но и снизить затраты на проведение последующих почвообрабатывающих операций, система которых определяется типом и структурой почвы.

Обработка почвы оказывает значительное влияние на условия развития растений и формирование урожая. Сельскохозяйственные культуры нуждаются в выровненной поверхности поля, мелкокомковой структуре и соответствующей их биологии плотности почвы. Это требует от конструкторов сельскохозяйственной техники постоянного совершенствования техники для обработки почвы. Основная обработка почвы лемешными плугами является важным технологическим приемом в системе обработки почвы. От качества выполнения этого технологического процесса во многом зависят физико-биологические процессы, протекающие в пахотном горизонте, качество размещения семян в почве и другие факторы, которые в конечном итоге определяют урожайность возделываемых культур. В соответствии с принятой Государственной программой «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы повышение эффективности производства будет обеспечиваться, в первую очередь, за счет внедрения современных энергоэффективных технологий и энергосберегающего оборудования.

Поэтому исследование и разработка технологий и средств механизации, позволяющих качественно и с наименьшими энергетическими и материальными затратами обеспечить вспашку почвы является важной народно-хозяйственной задачей. Сформулированные и полученные в работе результаты в совокупности с научными положениями вносят определенный вклад в развитие технологий и технического обеспечения механической обработки почвы.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам: доктору технических наук, профессору Бойкову Владимиру Петровичу и доктору технических наук, профессору Орде Александру Николаевичу за существенные замечания и благие пожелания.

# **1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ВИБРАЦИОННОГО ОТВАЛА**

## **1.1. Роль вспашки в энергосбережении и экономии топлива в сельскохозяйственном производстве Республики Беларусь**

В настоящий момент в Республике Беларусь, как и во всех развитых странах мира, энергетические проблемы остро стоят во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в агропромышленном комплексе. В соответствии с принятой Государственной программой «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы повышение эффективности производства будет обеспечиваться, в первую очередь, за счет внедрения современных энергоэффективных технологий и энергосберегающего оборудования. Доля потребления топливно-энергетических ресурсов в секторе сельского, лесного и рыбного хозяйства, согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, с 2015 по 2020 годы увеличилась с 6,0 % до 6,4 % (рис. 1.1). Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов с 2015 по 2022 увеличилось с 1496 до 1624 тыс. тонн усл. топлива, или на 8,6 %. Общее потребление дизельного топлива только сельскохозяйственными организациями республики с 2015 по 2021 год увеличилось на 23,8 тыс. тонн (табл. 1.1) [1, 2]. Учитывая постоянный рост цен на топливо (рис. 1.2), снижение энергозатрат и расхода топлива даже на несколько процентов гарантирует существенный экономический эффект [3].

Получение высоких и стабильных урожаев в значительной степени (до 25 %) зависит от качества обработки почвы. На ее проведение расходуется от 15 % до 20 % всей потребляемой в растениеводстве энергии [4]. Вспашка является «самой сложной, продолжительной, дорогостоящей и трудозатратной работой», занимающей примерно 30 %–40 % от всех энергозатрат на полевые работы [5]. Учитывая постоянный рост цен на топливо, реализация энергосберегающих приемов в растениеводстве обеспечивает существенный экономический эффект.

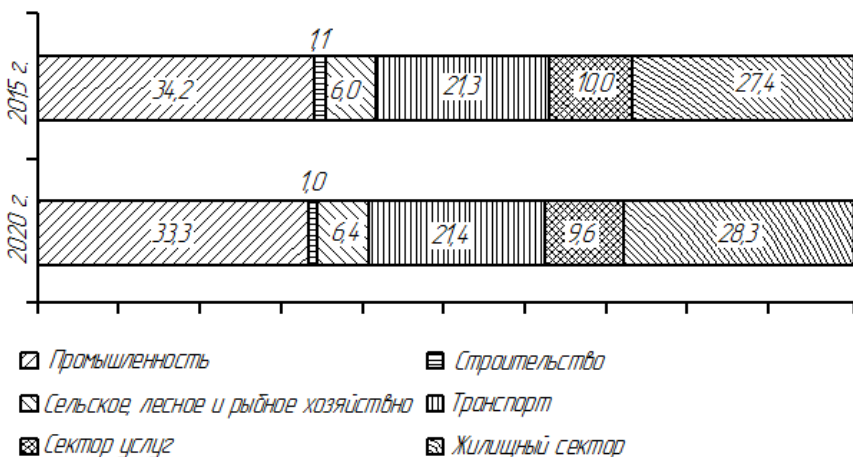


Рис. 1.1. Структура потребления топливно-энергетических ресурсов по секторам потребления в 2015 и 2020 гг. (в процентах к итогу) [1, 2]

Таблица 1.1

Потребление дизельного топлива сельскохозяйственными организациями республики за 2015–2021 гг.

Область	Потреблено дизельного топлива, тыс. тонн						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Брестская	111,3	135,5	140,5	130,7	139,7	145,3	146,5
Витебская	95,7	85,9	87,4	89,0	83,8	85,8	82,6
Гомельская	107,4	110,6	115,9	109,0	107,1	106,7	107,1
Гродненская	114,5	110,7	115,1	108,9	109,8	110,7	111,3
Минская	174,2	165,0	172,5	155,3	158,0	170,0	172,0
Могилевская	80,0	75,7	78,7	77,5	81,4	85,1	87,4
Итого	683,1	683,4	710,1	670,4	679,8	703,6	706,9

Обычный лемешно-отвальный корпус плуга производит резание почвенного пласта в горизонтальной и вертикальной плоскостях, подъем и перемещение, крошение, отвод в сторону и оборот, то есть он выполняет несколько технологических операций, отличающихся по характеру своего воздействия на почву. Сопротивление почв при вспашке плугом оценивается удельным сопротивлением.



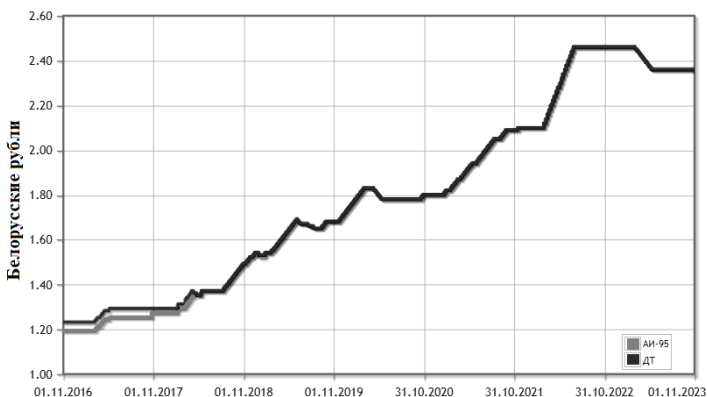


Рис. 1.2. График изменения цен на топливо за период 2016–2023 гг.

Его определяют делением тягового сопротивления плуга на площадь поперечного сечения обрабатываемого плугом пласта почвы. По удельному сопротивлению почвы разделяют на легкие 0,0294 МПа; средние 0,0294 – 0,049 МПа; среднетяжелые 0,049 – 0,0686 МПа; тяжелые 0,0686 – 0,118 МПа и очень тяжелые – свыше 0,118 МПа. В общем сопротивлении плуга доля сопротивления колес составляет 8 %– 10 %, полевых досок корпусов – 10 %–15 %, отвала 25 %–30 %, лемеха 40 %–50 % (рис. 1.3).

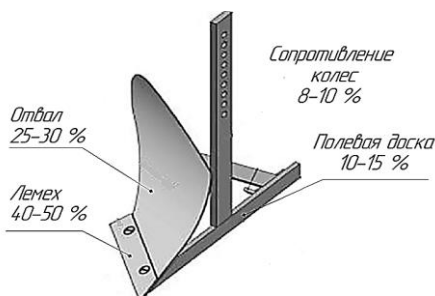


Рис. 1.3. Составляющие сопротивления плуга, по В.М. Халанскому [7]

Энергия, непосредственно затраченная на выполнение процесса вспашки, распределяется так: на деформацию почвы 16 %, на поднятие и ускорение почвенного пласта 12 %, на преодоление сил трения 60 %, на резание почвы 12 % [7] (рис. 1.4).

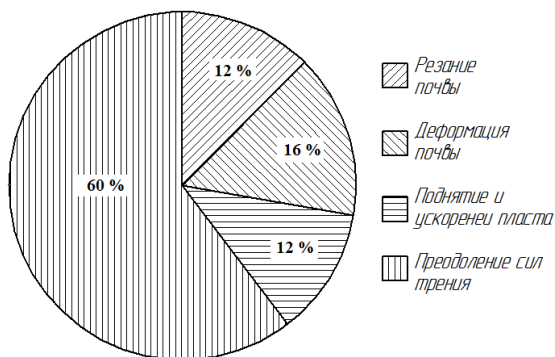


Рис. 1.4. Энергия, непосредственно затраченная на выполнение отдельных операций процесса вспашки

Анализ распределения сопротивлений показывает, что наибольшее количество энергии затрачивается на преодоление сил трения лемешно-отвальной поверхности о почву, поэтому решению этой проблемы уделяется очень большое внимание.

## 1.2. Направления совершенствования плугов мировых производителей

Основная обработка почвы оказывает значительное влияние на условия развития растений и формирование урожая. Сельскохозяйственные культуры нуждаются в выровненной поверхности поля, мелкокомковой структуре и соответствующей их биологии плотности почвы. Это требует от конструкторов сельскохозяйственной техники постоянно совершенствовать технику для обработки почвы.

В странах Западной Европы, где в системе основной обработки почвы вспашка занимает ведущее место, предприятия сельскохозяйственного машиностроения уделяют значительное внимание совершенствованию конструкций плугов. При этом основные работы направлены на поиск путей снижения тягового сопротивления, повышение качества работы и эксплуатационной надежности плугов.

На рынке сельскохозяйственной техники широко представлены навесные, полуприцепные и прицепные обычные и оборотные

от 2-х до 16-корпусных плугов. Как показывает анализ рынка, использование обычных плугов уменьшается, уступая место оборотным плугам и плугам с изменяемой шириной захвата. Стоимость оборотных плугов на 40 % больше, однако эти расходы, по заключению экспертов, компенсируются лучшим качеством обработки почвы, особенно на полях небольших размеров, повышением производительности пахотных агрегатов и уменьшением на 8 %–10 % расхода топлива [8]. Кроме того, уменьшаются расходы на техническое обслуживание плугов.

Современные конструкции оборотных плугов позволяют двигаться энергетическому средству по борозде и по полю. Такими плугами являются «Челленджер 10 NSH» (*Kuhn* (Франция)) или плуги «Евро-Титан» и «Варио-Титан» (*Lemken* (Германия)). Многокорпусные (10-16-корпусные) плуги производителей *Gregoire Besson*, *Naud*, *Kverneland*, *Overum*, *KUHN*, *RABE* и других имеют шарнирно соединенные рамы (рис. 1.5), что улучшает копирование рельефа поля и обеспечивает равномерность глубины вспашки всеми корпусами.



Рис. 1.5. Общий вид плуга SPF9 фирмы *Gregoire Besson* (Франция) с шарнирно-соединенной рамой

Широкий диапазон изменения удельного сопротивления грунтов в зависимости от их механического состояния, твердости, влажности, наличия склонов и подъемов в направлении движения агрегата, а также разная глубина обработки почвы обуславливают колебания тягового сопротивления плуга в достаточно широких пределах. При несоответствии тяговой мощности трактора его переводят

на пониженную передачу (или он будет работать с недогрузкой). В том случае, когда переход на более низкую передачу не обеспечивает оптимального режима работы агрегата, снимают один, два, а иногда и три корпуса плуга. Во время переезда для вспашки на поле с легкими грунтами, где не обеспечивается оптимальная загрузка трактора, на раму плуга устанавливают дополнительные, ранее снятые, корпуса. Все это требует соответствующего изменения конструкции рамы плуга (модульные плуги) и дополнительных затрат труда и времени.

Более эффективным является ступенчатое или бесступенчатое регулирование ширины захвата плуга для определенных условий работы. Плуги с изменяемой шириной захвата находят все большее применение в странах Западной Европы, так как это позволяет эффективно использовать мощность трактора в различных почвенно-климатических условиях и контурах поля, повысить производительность машинно-тракторного агрегата и уменьшить расход топлива. Такие плуги предлагают зарубежные производители: *Gregoire Besson, Kuhn, Lemken* и т. д. Например, плуг «Варио-Титан» фирмы *Lemken* дает возможность бесступенчато изменять ширину захвата корпуса от 30 см до 55 см. Для плугов зарубежных производителей характерно большое (1000 мм) расстояние между корпусами и от нижнего обреза лезвия лемеха до рамы (780–800 мм).

Отдельные конструкции плугов оснащены электронными устройствами для автоматического управления работой плуга. Они обеспечивают автоматическую регулировку ширины захвата и глубины вспашки в зависимости от тягового усилия или буксования колес трактора, позволяют из кабины трактора контролировать качество обработки почвы. Бортовой компьютер выводит на экран монитора текущую информацию: скорость движения агрегата, производительность, степень загрузки двигателя, расход топлива, размер обработанной площади, пройденный путь.

Значительное внимание уделяется усовершенствованию элементной базы плугов. Большинство предприятий сельскохозяйственного машиностроения предлагают широкую номенклатуру рабочих органов плуга, различающихся по геометрии рабочей поверхности отвалов. Отвалы плугов изготавливают из трехслойной специальной стали – *Konit*. Эта сталь обладает особыми свойствами. Основной металл, из которого производятся отвалы, в печах

насыщается углеродом и подвергается азотированию. Благодаря такой термохимической обработке поверхности отвалов обладают высокой твердостью, устойчивы к истиранию, не откалываются при ударах. Электролизная полировка гарантирует высокое качество обработки поверхности, не допускает ее перегрева, сводит к минимуму съем металла.

Плуги предприятий *Lemken, Kuhn, Rabewerk* комплектуются корпусами, вырезающими пласт не прямоугольного, а ромбовидного сечения, оставляя широкую открытую борозду. Следовательно, колеса трактора двигаются в борозде по твердому грунту. Применение таких корпусов способствует уменьшению затрат энергии на обработку грунта на 20 % [8]. Такая форма пласта обеспечивается подрезкой почвы двумя лемехами – основным (от дна борозды) и боковым (от стенки борозды).

В последнее время одной из тенденций при производстве плугов является использование корпусов с пластинчатыми отвалами (не сплошной лемешно-отвальной поверхностью) (рис. 1.6). Пластинчатые отвалы начали использовать в Европе в конце XX века как один из способов исключения залипания корпусов влажной почвой. Так как в результате налипания влажной и уплотненной почвы на лемеха и отвалы в процессе работы изменяются их геометрические формы, что приводит к резкому увеличению тягового сопротивления почвообрабатывающего агрегата. Пластинчатые отвалы, исключая залипание, быстро нашли распространение и в нашем, более сухом климате, так как значительно уменьшают энергозатраты при вспашке и улучшают крошение почвы. Основным достоинством пластинчатых отвалов является уменьшение площади контакта отвала с почвой, что снижает тяговое сопротивление, расход топлива и энергоемкость процесса. Так как при движении по пластинчатому отвалу почвенный пласт подвержен растягивающему усилию со стороны веерно расположенных пластин и при этом контактные напряжения, разрушающие слои почвы, увеличиваются, происходит разрушение его связей, он частично крошится, что положительно сказывается на снижении энергозатрат на проведение последующих почвообрабатывающих операций. Вследствие этого повышается качество крошения почвы, а пластинчатые отвалы могут использоваться при обработке тяжелых почв.



Рис. 1.6. Общий вид корпуса плуга CVL фирмы *Overum* с пластинчатыми отвалами

Необходимо подчеркнуть, что европейские плуги, в отличие от американских, оборудуют предплужниками или так называемыми дерносьемами, что обеспечивает запахивание больших доз органических удобрений и растительных остатков.

В ходе изучения протоколов испытания Белорусской машиноиспытательной станции было установлено, что все испытываемые плуги, начиная с 2005 года, имели полувинтовую поверхность со сплошным отвалом [9–14]. В качестве сравнения были проанализированы лемешно-отвальной поверхности плугов ведущих мировых производителей: *Amazome* (Германия), *Kverneland* (Норвегия), *KUHN* (Франция), *Overum* (Дания) (рис. 1.7–1.9) [15–18].

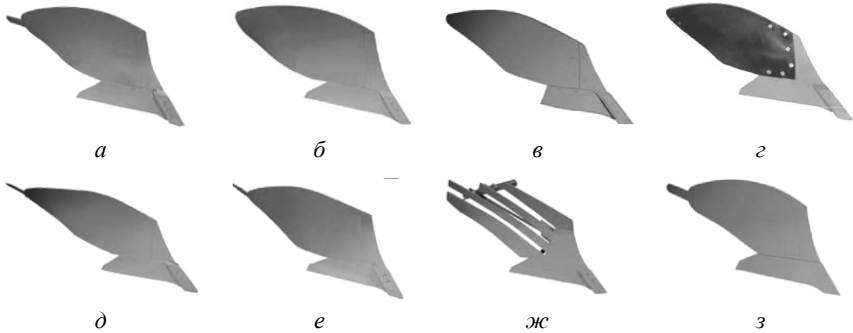


Рис. 1.7. Типы лемешно-отвальных поверхностей корпусов плугов фирмы *Amazome* (Германия):

- а* – *WY 400* (полувинтовой для любых типов почв, глубина обработки 12–30 см);
- б* – *WL 430* (полувинтовой удлиненный для средних и тяжелых почв, глубина обработки 15–30 см);
- в* – *WX 400* (полувинтовой для средних и тяжелых почв, глубина обработки 12–25 см);
- г* – *WX 400 PE* (полувинтовой для тяжелых почв, глубина обработки 12–25 см);
- д* – *WXL 430* (полувинтовой для средних и тяжелых почв, глубина обработки 12–28 см);
- е* – *WXH 400* (винтовой для средних и тяжелых почв, глубина обработки 12–33 см);
- ж* – *WST 430* (полувинтовой пластинчатый для средних и тяжелых почв, глубина обработки 12–33 см);
- з* – *UN 400 / UN 430* (винтовой для легких и средних почв, глубина обработки 15–30 см)

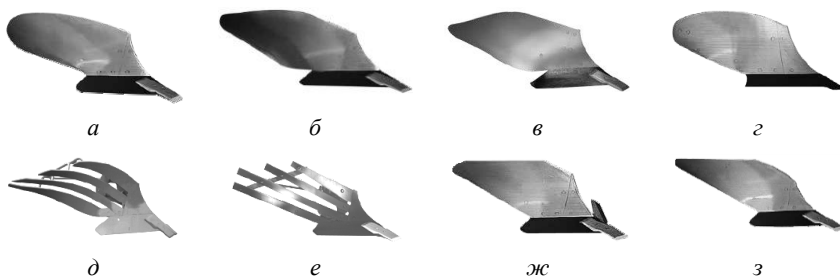


Рис. 1.8. Типы лемешно-отвальных поверхностей корпусов фирмы *KUHN* (Франция):

- a* – *N* (винтовой отвал, глубина обработки 12–30 см);
- б* – *HC* (винтовой «скандинавский» отвал, глубина обработки 15–30 см);
- в* – *L* (удлинённый винтовой отвал, глубина обработки 15–35 см);
- г* – *YL* (винтовой отвал, глубина обработки 12–30 см);
- д* – *VL* (пластинчатый винтовой отвал, глубина обработки 15–25 см);
- е* – *V* (пластинчатый полувинтовой отвал, глубина обработки 20–30 см);
- ж* – *C* (цилиндрический укороченный отвал, глубина обработки 20–34 см);
- з* – *P* (цилиндрический укороченный отвал, для легких почв, глубина обработки 30–35 см)

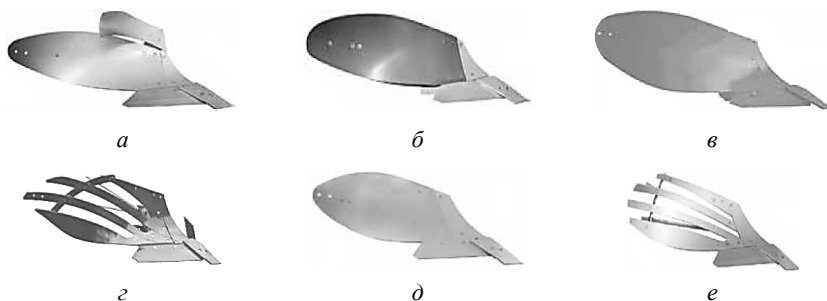


Рис. 1.9. Типы лемешно-отвальных поверхностей корпусов фирмы *Overum* (Дания):

- a* – *XL* (винтовой отвал универсальный, глубина обработки 10–28 см);
- б* – *XPL* (винтовой отвал для тяжелых и переувлажненных почв, глубина обработки 10–28 см);
- в* – *XLD* (винтовой отвал, глубина обработки 12–38 см);
- г* – *XSD* (пластинчатый винтовой отвал, глубина обработки 12–38 см);
- д* – *XU* (полувинтовой универсальный отвал, глубина обработки 35 см);
- е* – *XS* (полувинтовой пластинчатый отвал, глубина обработки 35 см)

### 1.3. Анализ мировых тенденций совершенствования лемешно-отвальных поверхностей корпусов плуга

Представленный анализ корпусов плугов показал, что 63 % выпускаемых за рубежом плугов имеют полувинтовую поверхность

и 37 % винтовую, из них 78 % ассортимента – сплошные отвалы, 21 % – пластинчатые. По последним данным, около 40 % выпускаемых в Германии плугов оснащаются корпусами с пластинчатыми отвалами [19]. Это объясняется тем, что потребитель комплектует плуг в зависимости от условий работы и типа почвы конкретного хозяйства.

Вспашку тяжелых, глинистых, заболочиваемых почв более рационально проводить плугами с пластинчатыми отвалами, так как они снижают тяговое сопротивление плуга и улучшают крошение. Вспашку легких почв наиболее рационально производить плугами со сплошными отвалами, которые обеспечивают полный оборот пласта без сепарации почвы между пластинами, что происходит при использовании не сплошной лемешно-отвальной поверхности.

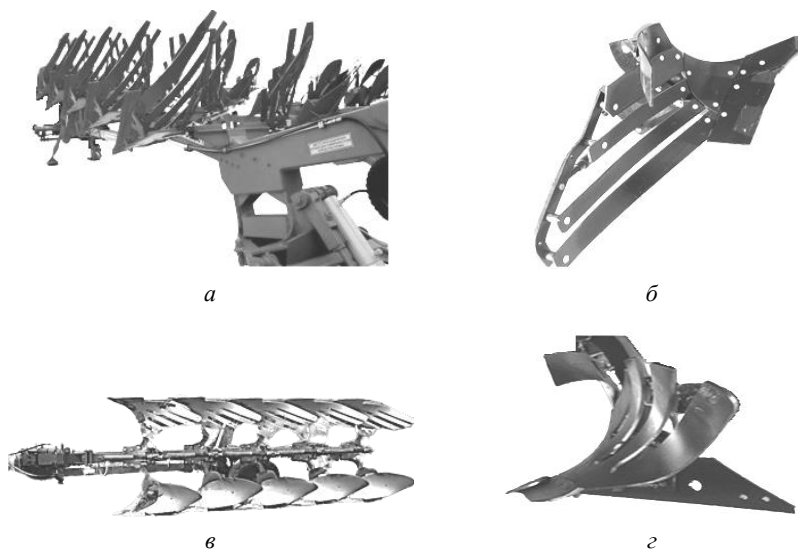


Рис. 1.11. Плуги отечественного производства с пластинчатыми отвалами:

*а* – плуг ОАО «Миноитовский ремонтный завод»;

*б* – корпус плуга ЧУП «Витстройтехмаш»;

*в* – плуг ППНО-7.3 ОАО «Минский завод шестерен»; *г* – корпус плуга ППНО-7.3

В Беларуси в последние годы происходит незначительная поставка плугов с пластинчатыми отвалами импортного производства. Ведущее предприятие страны, занимающееся выпуском плугов, –



ОАО «Минойтовский ремонтный завод», по требованию потребителей оснащает оборотные плуги пластинчатым отвалом фирмы *Kverneland* (Норвегия) (рис. 1.11, *а*) [20]. ЧУП «Витстройтехмаш» (г. Витебск, Беларусь) освоило производство полунавесного оборотного плуга ППНО-7.3, который также может оснащаться пластинчатыми отвалами импортного производства (рис. 1.11, *б*) [21].

В 2020 году на выставке «Белагро 2021» предприятием ОАО «Минский завод шестерен» был представлен 5-корпусный плуг с пластинчатым отвалом собственного производства. Как видно из представленного рис. 1.11, *в*, в отличие от импортных, отвал ОАО «МЗШ» создан не из отдельных пластин, а выполнен с помощью прорезей в сплошном отвале собственного производства [19].

Все вышеуказанные плуги находятся лишь в стадии разработки и на сегодняшний день создано по одному экспериментальному образцу, поэтому какие-либо данные об их энергоёмкости, качестве обработки почвы и т. д. отсутствуют.

#### **1.4. Исследование способов снижения тягового сопротивления плуга**

В связи с тем, что на преодоление силы трения о лемешно-отвальную поверхность затрачивается основное количество энергии при вспашке [5], были изучены пути снижения тягового сопротивления, используемые в плугах ведущих мировых производителей. Установлено что основными путями снижения тягового сопротивления, являются:

- снижение сил трения почвы о поверхность корпуса;
- дополнительное воздействие на рабочие органы;
- оптимизация параметров рабочих органов.

##### **1.4.1. Снижение сил трения почвы о поверхность корпуса**

Покрытием отвальной поверхности плугов антифрикционными материалами, обладающими гидрофобными свойствами и имеющими более низкий коэффициент трения, чем сталь, занимался М. И. Бредун [22]. В качестве антифрикционных покрытий использовались капрон, борированная сталь, фторопласт, которые дали хорошие результаты в борьбе с залипанием.

За рубежом применяют антифрикционные покрытия отвалов плугов или делают их целиком из пластмассы, что снижает трение на 50 % [22]. В настоящее время в качестве антифрикционного полимера широко используется композитный пластик «Текрон», отвалы из которого изготавливают фирмы *Lemken*, *Kverneland*, *Amazone* и многие другие (рис. 1.12).

Сдерживающим фактором в применении таких материалов в плугостроении являются их низкая износостойкость и высокая стоимость.

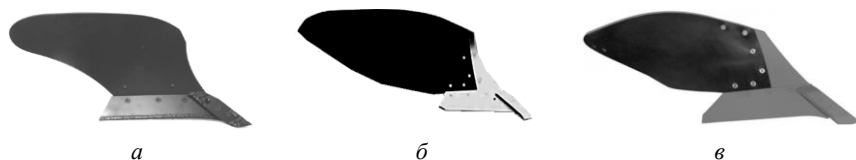


Рис. 1.12. Отвалы из композитного пластика «Текрона»:  
*а* – *Lemken Текроне 3441040*; *б* – *Kverneland No. 34*;  
*в* – *Amazone WX 400 PE*

#### 1.4.2. Дополнительное воздействие на рабочие органы

В качестве дополнительного воздействия на рабочий орган, в первую очередь, следует отнести вибрацию. Еще в начале 30-х годов в России для борьбы с залипанием стали применять вибрацию рабочих органов. Например, при работе плуга корпуса совершают колебания с малой амплитудой, но с большой частотой. Движущийся по поверхности отвала пласт получает множество импульсов-воздействий непосредственно по поверхности контакта почвы с корпусом плуга. Пласт находится как бы во взвешенном состоянии, давление его на корпус снижается, следовательно, уменьшается и сила трения [23].

Вопросу влияния вибрационного воздействия на величину и характер рыхления почвы, а также тяговое сопротивление, посвящено большое количество работ [23–28]. Наибольшие исследования в плане разработки вибрирующих плугов сделаны А. А. Дубровским [28].

Анализ литературных источников, теоретических и экспериментальных исследований по данной тематике показывает, что любое вибрационное воздействие на рабочий орган делится на активное и пассивное. Активно вибрирующие рабочие органы получают колебательную энергию от дополнительного привода, с помощью

которого можно задать частоту и амплитуду колебаний. Известно большое количество таких конструкций активно колеблющихся рабочих органов (рис. 1.13). Большинство из них выполнено только в виде экспериментальных моделей. Причина этого в сложной конструкции привода, который усложняет конструкцию плуга. Так же с увеличением скорости движения мощность, потребляемая виброприводом, оказывается больше получаемого от его снижения мощности, так как эффект от вибрации, согласно исследованиям А. А. Дубровского, наблюдается лишь до скоростей 0,6–1,0 м/с. В плане реального практического использования принудительно вибрирующего органа следует упомянуть итальянскую фирму *Badalini*, которая выпускает глубокорыхлитель *VT/TA Vibrasoil*. Глубокорыхлители ГР-1-60. и ГР-2-60, выпускаемые ООО «Южно-Российский технический центр сельскохозяйственного машиностроения» (Россия), а также ряд фирм, таких как *Sugano* (Япония), *Jinyuan Machinery* (Китай), *Huai Machinery* (Китай), выпускают машины с вибрационными рабочими органами [29–31]. Вибрационное воздействие в этих машинах обеспечивается эксцентриковым ротационным механизмом, который приводит в движение от ВОМ трактора и обеспечивает снижение тягового сопротивления. Несмотря на то, что принудительная вибрация имеет более высокую частоту и амплитуду колебаний, пассивная имеет ряд преимуществ: это простота и дешевизна конструкции, низкая энергоемкость, материалоемкость меньше, чем у машин, рабочие органы которых оснащены активным виброприводом. Простейшим примером пассивно-вибрируемого привода является рабочий орган с пружинным креплением, воспринимающий переменное сопротивление почвы.

Значительный вклад в разработку пассивно вибрирующих рабочих органов внес Л. Ф. Бабицкий, который в своих трудах [32] писал, что преимущество вибрационных рабочих органов почвообрабатывающих машин заключается в том, что, концентрируя энергию во времени, они дают возможность использовать ее более рационально и эффективно, а следовательно, являются более экономически выгодными. Однако разработка и внедрение вибрационной техники в почвообработке и других технологических процессах отстает от многих отраслей промышленности. Это объясняется тем, что сельскохозяйственные технологические процессы в большинстве случаев более сложны и более разнообразны, чем

промышленные, так как в них принимают участие «живые» объекты – почва, растения, микроорганизмы.

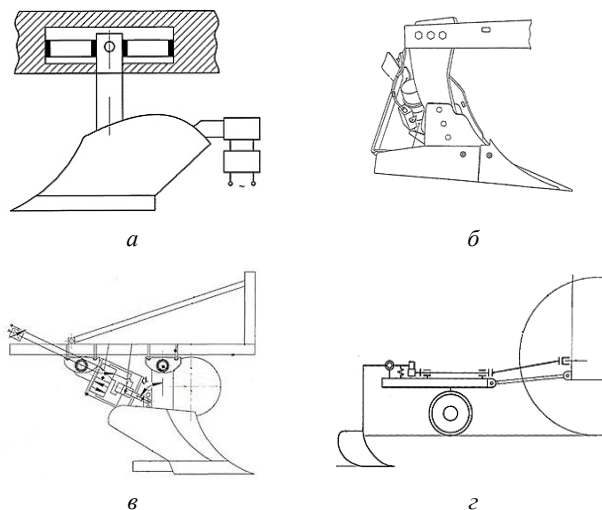


Рис. 1.13. Конструкции плугов с активно колеблющимися рабочими органами (схемы к патентам):  
 а – RU 2304371; б – RU 2635931; в – UA 63591; г – UA 117287

Согласно исследованиям А. С. Кушнарёва [33] и В. П. Базарова [34], посвященным анализу сопротивления грунта при внедрении твердого деформатора в почву, сделан вывод о том, что процесс обработки почвы рабочим органом во время установившегося движения состоит из трех фаз [35, 36]. На протяжении первой фазы происходит заглубление рабочего органа в почву, во второй фазе происходит непрерывное возрастание деформации и внутренних напряжений. При превышении внутренними напряжениями пределов прочности почвы происходит третья фаза, в которой происходит скалывание. Использование пружинной подвески позволяет накапливать потенциальную энергию во время второй фазы, сжимая пружинный элемент и отгибая рабочий орган против направления движения. При переходе в третью фазу накопленная энергия передается в скалываемый блок почвы, вызывая в этот момент колебания рабочего органа. Общее сопротивление при этом снижается вследствие дополнительно выполненной работы после скалывания.

Однако при установившемся движении агрегата имеют место лишь вторая и третья фазы. Так же, как показывают исследования, вторая фаза не сильно влияет на процесс разрушения почвы. Благодаря пружинной подвеске сопротивление почвы возрастает плавно, и колебания рабочего органа в этот момент имеют амплитуду, недостаточную для эффективного влияния на процесс деформации. Зато в третьей фазе, в связи с резким изменением сопротивления, вызванного скалыванием почвы, пружинная подвеска использует накопленную энергию и обеспечивает колебания рабочего органа [37].

Широкое применение имеют многоэлементные пружинные подвески, состоящие из двух и более элементов. В отличие от одноэлементной подвески (однопружинной), имеющей линейную характеристику пружинных сил, применение многоэлементной, по мнению многих исследователей, приводит к возникновению нелинейных систем, поскольку движение рабочего органа с такой подвеской описывается нелинейным дифференциальным уравнением. Внедрение такого пружинного элемента в конструкцию подвески значительно влияет на колебания рабочего органа. Тяговое сопротивление рабочего органа с такой нелинейной подвеской, в сравнении с линейной, снижается на 14 %–26 % [35].

Вследствие вышеизложенного, именно удар имеет место при скалывании слоя почвы. Причем, чем меньше инерционная способность несущей конструкции рабочего органа агрегата, тем резче будет проявляться скачкообразность его движения, а, значит, и резче будет ударное воздействие на почву [36]. Таким образом, можно констатировать, что наиболее перспективный способ преодоления сил трения, действующих на рабочий орган, это создание его несимметричных вибрационных колебаний.

### **1.4.3. Оптимизация параметров рабочих органов**

Совершенствование отвальных орудий долгое время шло по пути совершенствования формы лемешно-отвальной поверхности. Улучшение качественных и энергетических показателей достигалось изменением формы лемешно-отвальной поверхности, уменьшением угла отделения пласта от стенки борозды, изменением конструкции корпуса плуга, а также применением материалов,

уменьшающих силы трения пласта по корпусу плуга. Поэтому повышение требований к энергосбережению и качеству обработки вызвало развитие многообразных конструкций лемешно-отвальных поверхностей, представленных на рис. 1.14.

Культурные корпуса (рис. 1.14, *д*) хорошо оборачивают и крошат почвенный пласт, поэтому их используют для вспашки старопахотных земель. Полувинтовые корпуса (рис. 1.14, *а, з, е*) хорошо оборачивают пласт, но хуже рыхлят его. Такие корпуса устанавливают в основном на кустарниково-болотных плугах, но можно применять их и на плугах общего назначения для вспашки сильно задернелых и целинных почв. Безотвальный корпус (рис. 1.14, *ж*) предназначен для рыхления почвы в ветроэрозионных и засушливых районах. Вырезной корпус (рис. 1.14, *к*) служит для отвальной вспашки подзолистых почв и одновременного углубления пахотного горизонта на 4...5 см.

Корпус с почвоуглубителем (рис. 1.14, *и*) используют для отвальной вспашки подзолистых, каштановых почв и маломощных черноземов с одновременным углублением пахотного слоя на 6...15 см. Ширина захвата почвоуглубительных лап 26 и 30 см. Их используют с корпусами шириной захвата соответственно 30 и 35 см.

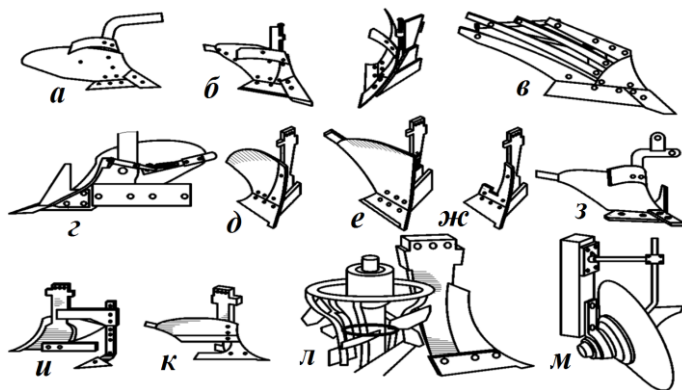


Рис. 1.14. Разновидности лемешно-отвальных поверхностей корпуса плуга:  
*а* – корпус ПК-16.000; *б* – корпус ПЛП-01.000;  
*в* – пластинчатый корпус оборотного плуга;  
*г* – корпус плуга фирмы *Lemken* со сплошным отвалом; *д* – культурный;  
*е* – полувинтовой; *ж* – безотвальный; *з* – с накладным долотом;  
*и* – с почвоуглубителем; *к* – вырезной; *л* – комбинированный; *м* – дисковый

Дисковый корпус (рис. 1.14, м) применяют для вспашки тяжелых твердых почв, засоренных древесными корнями, а также для переувлажненных почв при возделывании риса. Корпус снабжен сферическим диском с остро заточенной режущей кромкой. Стойка закреплена на раме плуга так, что плоскость вращения режущей кромки диска наклонена к дну борозды под углом  $70^\circ$ , а с направлением движения плуга образует угол атаки  $40^\circ \dots 45^\circ$ .

Комбинированный корпус (рис. 1.14, л) предназначен для вспашки тяжелых почв с одновременным интенсивным рыхлением почвенного пласта. Корпус снабжен укороченным отвалом и ротором, расположенным на месте срезанного крыла отвала. По форме ротор представляет собой усеченный конус, обращенный большим основанием вверх.

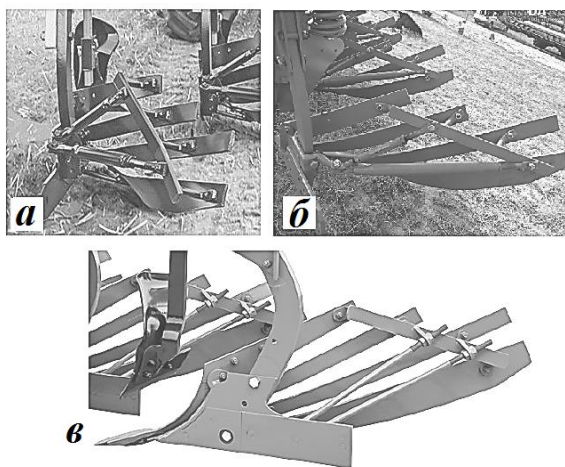


Рис. 1.15. Винтовые регуляторы пластинчатых отвалов:  
 а – корпус фирмы *Dohn Deere* (США); б – корпус фирмы *Lemken* (Германия);  
 в – корпус фирмы *Amazone* (Германия)

Наиболее интересным из представленного анализа является пластинчатый отвал (рис. 1.14, в). Основным достоинством пластинчатых отвалов, в сравнении со сплошными, является уменьшение площади контакта отвала с почвой (до 27%), что уменьшает тяговое сопротивление на 17%–24% и снижает в результате расход топлива и энергоёмкость процесса на 15%–25% [33] (рис. 1.15).

Так же преимущество отвальной поверхности, состоит в том, что отваливаемый пласт лучше крошится, чем при сплошном отвале, так как он подвержен растягивающему усилию со стороны веерно расположенных пластин, а контактные напряжения увеличиваются [39]. Немаловажным является возможность изменять угол оборота пласта и ширину захвата корпуса, благодаря винтовым регуляторам, установленным за каждой из полос (см. рис. 1.15).

### **1.5. Роль колебательных и вибрационных явлений в почвообработке**

Колебания – это процесс, характеризующий некоторое изменение состояния, то есть изменение во времени величин, определяющих это состояние. Процесс колебаний состоит в том, что некая величина, обычно скалярная, связанная с рассматриваемым объектом, во времени поочередно то возрастает, то убывает. Процесс колебаний возникает в различных физических условиях и относится к различным объектам. Среди них в первую очередь нужно отметить материальные тела, совершающие механические движения, т. е. движения, изменяющие положение относительно друг друга (в том числе и колебательные движения). Можно выделить класс механических колебаний. Механические колебания – процесс изменения какой-либо механической величины, определяющей положение материального тела или его точки, при котором эта величина, характеризующая скорость ее изменения, поочередно то возрастает, то убывает во времени.

Вибрация представляет собой процесс механических колебаний. Сам термин «вибрация» относится только к механическим колебаниям и представляет собой относительно малые отклонения отдельных точек тела, что является ее основным признаком. Вторым важнейшим признаком вибрации является частота, то есть число циклов перемещения, совершаемых телом или его отдельными точками в единицу времени. Вибрация совершается с большей частотой, чем колебания. Третьим признаком вибрации, относящимся к физической характеристике вибрирующего объекта и к природе его происхождения, является то, что вибрации подвержены упругие тела: стержни, мембраны, пластины, оболочки и так далее, то есть вибрация – это малые колебания упругих тел.



Имеется достаточно широкий класс машин, в которых вибрация играет полезную роль и служит основой рабочего процесса. Эти машины называются – машины вибрационного принципа действия. Так как колебания и вибрация обладают разрушительной силой или по крайней мере способностью создавать мощные, периодически повторяющиеся силовые воздействия, эта способность используется в технике. Вибрацию применяют для разрушения, дробления и перемалывания материалов, с ее помощью пробивают прочные перекрытия, уплотняют бетон, создают искусственные усталостные поломки материалов и, самое главное, погружают рабочие органы техники в грунт.

Технологические процессы, связанные с механическим действием на материал или изделие, как правило, требуют приложения достаточно больших сил. Эти силы могут быть приложены различными способами: либо статическими, либо динамическими в виде периодически повторяющихся импульсов (ударов). Роль возбудителя периодических импульсов хорошо выполняет вибрация. Колебания любого объекта (системы) всегда возникают под действием тех или иных возбудителей. Возбудителями могут быть различные факторы. Например, кратковременный толчок или отклонение деформируемой системы от положения равновесия, действие периодически прилагаемой внешней силы, возмущение, вызванное внезапным присоединением другой системы, действие неперiodической силы, возмущение, связанное с периодическим изменением параметров системы.

В зависимости от способа возбуждения колебания делят на несколько видов. Свободные колебания – колебания, вызванные начальным отклонением системы и протекающие без дальнейшего активного внешнего воздействия. Вынужденные колебания – колебания, происходящие под действием внешних, преимущественно периодических сил. Связанные колебания – свободные или вынужденные колебания, возникающие в сложных системах и характеризующие взаимодействие их отдельных частей. Связанные колебания могут возникнуть, в частности, если между двумя реальными раздельными системами, одна из которых колеблется, а другая находится в покое, внезапно будет создана кинематическая связь. Вторая система также начнет колебаться, и в результате возникнут совместные колебания обеих систем, соединенных в общую

систему. Автоколебания – самоподдерживающиеся колебания, происходящие как при самовозбуждении, так и при возбуждении извне (толчок), питание которых происходит за счет постоянного источника энергии и сил преимущественно непериодического характера. Параметрически возбуждаемые колебания возникают вследствие периодического изменения параметров системы (массы, коэффициента жесткости и др.). Они могут одновременно возбуждаться внешней периодической нагрузкой.

Механические колебания имеют три основных параметра. Амплитуда колебаний  $A$  тела – это величина его наибольшего отклонения от положения равновесия. Период колебаний  $T$  – это время одного полного колебания. Частота колебаний  $\nu$  – это величина, обратная периоду:  $\nu = 1/T$ . Частота измеряется в герцах (Гц) и показывает, сколько полных колебаний совершается за одну секунду. Представление о значениях амплитуд и частот вибраций, используемых в различных технологических процессах, дает рис. 1.16.

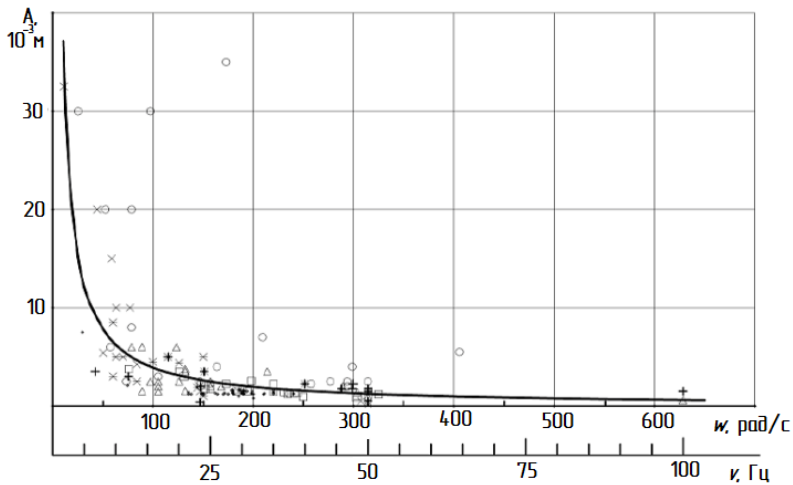


Рис. 1.16. Оптимальные значения амплитуды и частоты колебаний (по Р. Б. Яруллину):

O – растениеводство и мелиорация;  $\Delta$  – животноводство;  
\* – строительство и дорожное дело; + – ремонт техники

Как видно, в большинстве случаев амплитуда  $A$  не превышает 10 мм, угловая частота  $\omega$  около  $300 \text{ с}^{-1}$ .

## 1.6. Активно вибрирующие почвообрабатывающие рабочие органы

Движущийся по рабочему органу пласт почвы от создающихся импульсов находится во взвешенном состоянии относительно лемешно-отвальной поверхности, что уменьшает его трение, тем самым снижая тяговое сопротивление.

Вопросу влияния вибрационного воздействия на величину и характер рыхления почвы, а также на тяговое сопротивление, посвящено большое количество работ [40–48]. Анализ литературных источников, теоретических и экспериментальных исследований по тематике вибрационных орудий для обработки почв показывает, что любое вибрационное воздействие на рабочий орган делится на активное и пассивное. Активно вибрирующие рабочие органы получают колебательную энергию от дополнительного привода, с помощью которого можно задать частоту и амплитуду колебаний. Известно большое количество таких конструкций активно колеблющихся рабочих органов (рис. 1.17).

Рабочие органы, колебания в которых возбуждаются от гидропривода (рис. 1.17, *а, б, д, з, и*) работают посредством подачи масла под давлением через золотник к поршню 2, б, 33, совершающему возвратно-поступательные движения, увлекая за собой отвал (рис. 1.17, *б, д, и*) либо весь рабочий орган (рис. 1.17, *а, з*). В электроприводе (рис. 1.17, *в, г*) колебания возбуждаются либо от магнитоимпульсовой установки 12, либо от электромотора 14, на валу которого кулачок осуществляет периодические удары по обратной стороне отвала. Также существуют конструкции, в которых колебания возбуждаются от ВОМ трактора (рис. 1.17, *е, ж*). По результатам испытаний, проводимых В. Ловейкиным и Л. Дяченко, гидропривод позволил снизить тяговое сопротивление двухкорпусного лемешного плуга ПЛН-2-25 до 54 % [49]. Саратовским СХИ сконструирован плуг с вибрирующими долотами, испытания которого показали снижение тягового сопротивления на 17 % [50]. Также большой вклад в разработку активно колеблющихся рабочих органов был внесен А. А. Дубровским. Испытанный им вибрационный плуг, позволял также значительно снижать тяговое сопротивление [51].

Исследования по изучению эффективности активной вибрации при вспашке проводились в Воронежском государственном аграрном университете. В качестве поверхности трения использовался стальной лист,

который был закреплен на наклонной плоскости с возможностью изменения угла наклона. На поверхность трения устанавливался ящик с почвой без дна. Установка позволяла получать вибрацию на верхнем конце наклонной плоскости с частотой 22...24 Гц и амплитудой 2...4 мм. Среднее значение угла трения почвы по стали оказалось  $\varphi = 0,548$  рад при среднем квадратичном отклонении  $\sigma = 0,003$  рад. Вибрация уменьшала угол трения до  $\varphi = 0,463$  рад при среднем квадратичном отклонении  $\sigma = 0,01$  рад. Коэффициент трения приобретает значения соответственно  $f = 0,61$  без вибрации и  $f = 0,50$  с вибрацией поверхности трения. Данные исследования показали, что вибрация может уменьшить коэффициент трения на 18 %. При вибрации рабочих корпусов плуга с амплитудой около 5 мм и частотой 8...10 Гц получено уменьшение удельного сопротивления плужного корпуса с 6,45 до 5,52 Н/см<sup>2</sup> [52].

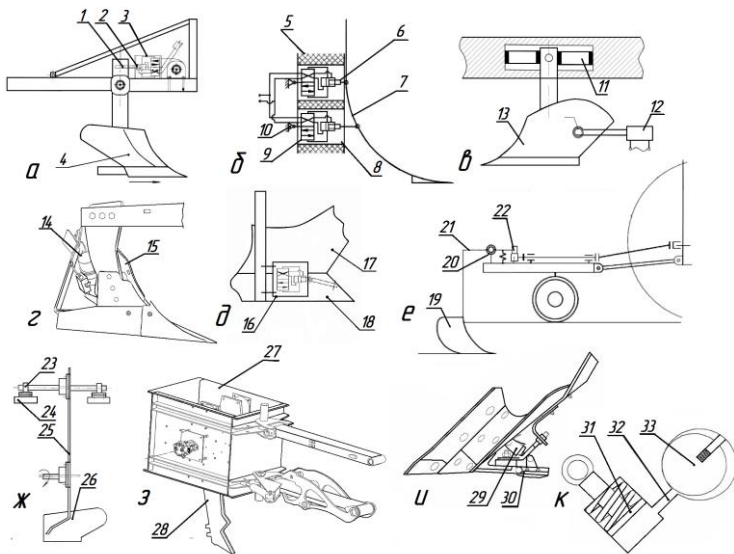


Рис. 1.17. Активно колеблющиеся рабочие органы плуга (схемы к патентам):  
 а – UA 106663; б – UA 18775; в – RU 2369057; г – RU 2635931; д – UA 19528;  
 е – UA 117287; ж – UA 117495; з – US 7546883; и – UA 31573;  
 1, 29, 31 – шток; 2, 6, 33 – поршень; 3, 8, 14, 16, 27 – вибратор;  
 4, 13, 15, 19, 26 – корпус плуга; 5 – резиновый амортизатор; 7, 17 – отвал;  
 9 – золотник; 10, 24, 25 – стойка; 11 – гидроамортизатор;  
 12 – магнитопульсовая установка; 18 – лемех; 20, 23 – подшипник; 21 – тяга;  
 22 – ролик; 28 – рабочий орган; 30 – полевая доска; 32 – напорная магистраль

С. Н. Дроздовым была разработана почвообрабатывающая машина с маятниковым вибратором (рис. 1.18). Теоретические расчеты показывают, что существенного снижения тягового сопротивления почвообрабатывающих машин с вибрационным элементом до 26 % можно достичь на тяжёлых почвах. Однако возникает другая проблема, связанная с большой шириной почвообрабатывающего орудия и другими проблемами в конструкции, вызывающими деформацию орудия от нагрузок, а также трудности синхронизации дисбалансов [53].

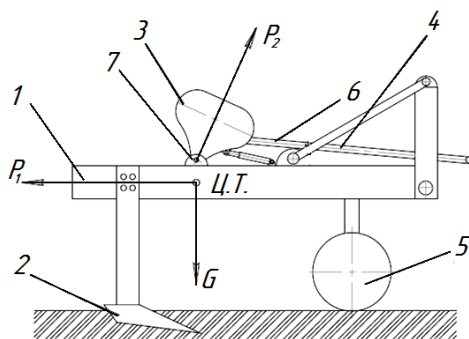


Рис. 1.18. Почвообрабатывающая машина:

- 1 – рама; 2 – рабочий орган; 3 – маятниковый вибратор; 4 – карданная передача;  
5 – опорное колесо; 6 – шарнир; 7 – шарнирная ось

Исследования, связанные с применением вибрации на почвообрабатывающих орудиях, легли в основу работ А. Б. Когана, А. П. Швейкина [50]. Ими было предложено оснастить корпуса плуга вибрирующими долотами для подрезания пласта, то есть исполняющих роль лемехов. Привод вибратора долот осуществлялся от вала отбора мощности. Результаты исследований показали, что экономия тяговой мощности больше на низких скоростях и непрерывно уменьшается при увеличении скорости. Работа такого пахотного агрегата на скоростях выше 6 км/ч вызвала увеличение тягового сопротивления, что привело к увеличению удельной тяговой мощности.

В своих исследованиях И. М. Бурмин [54] для снижения тягового сопротивления плуга использовал вибрирующие почвоуглубители. Наибольшее снижение тягового сопротивления одного почвоуглубителя, около 30 %, наблюдалось при скорости 5 км/ч.

Снижение тягового сопротивления плуга за счет вибрации почвоуглубителей не превышало 10 %.

Коллективом ученых под руководством к.т.н. С. Г. Щукина был испытан экспериментальный вибрационный рыхлитель с колебаниями, возбуждаемыми от вала отбора мощности трактора (рис. 1.19). На скорости 9 км/ч было установлено снижение тягового сопротивления от 25,5 до 24,4 кН (на 14,38 %). Следует подчеркнуть, что авторами не был предоставлен анализ расхода топлива при обработке почвы с приводом и без, так как первый расходует большее количество мощности. Также упомянуто снижение эффекта вибрации при повышении скорости [55].

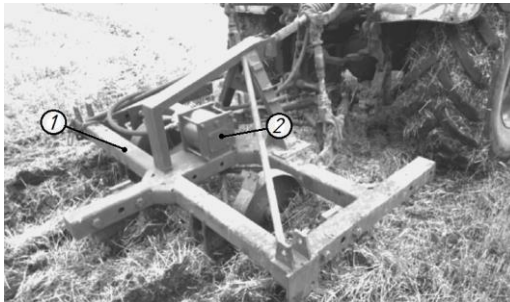


Рис. 1.19. Экспериментальный вибрационный рыхлитель:  
1 – рыхлитель; 2 – вибровозбудитель

Большинство из описанных конструкций плугов с активно колеблющимися рабочими органами нашло применение только в виде экспериментальных моделей. Причина этого в сложной конструкции привода, который усложняет конструкцию всего плуга. Также с увеличением скорости движения мощность, потребляемая виброприводом, оказывается больше получаемого от него снижения мощности, так как эффект от вибрации, согласно исследованиям А. А. Дубровского, наблюдается лишь до скоростей 0,6–1,0 м/с [51].

В подтверждение вышесказанного были проведены теоретические исследования С. А. Твердохлебовым [19]. Автором разработан вибрационный рабочий орган чизельного плуга, на стойке которого установлен соленоид, выполненный в виде катушки с бойком и возвратной пружиной, что позволяло долоту и стрелчатой лапе совершать колебательные движения, при этом ударник периодически

взаимодействовал с корпусом, обеспечивая мелко-амплитудные возмущения (рис. 1.20, а). Как показывает график результатов теоретического исследования, даже с наличием вибратора тяговое сопротивление устойчиво лишь на скорости до 1 м/с, с увеличением скорости работы – тяговое сопротивление также возрастает (рис. 1.20, б).

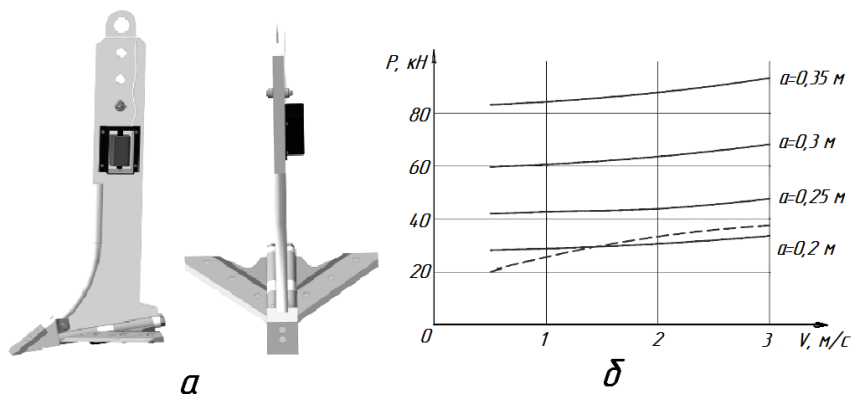


Рис. 1.20. Рабочий орган чизельного плуга с вибратором:  
 а – внешний вид рабочего органа;  
 б – график результатов теоретического исследования

Еще одним аргументом в пользу отказа от активных колебаний являются исследования, проводимые И. Я. Федоренко [57], в ходе которых с помощью методов дифференциального и интегрального исчисления проанализировано действие вибрации на все три составляющие тягового сопротивления плуга: трение, деформацию и инерцию. Общий вывод исследования таков: с помощью вибрации рабочих органов возможно снижение сопротивления почвообрабатывающих машин, однако не следует забывать, что на работу вибровозбудителей активных колебаний также затрачивается энергия. Общие затраты энергии на обработку почвы не могут быть снижены с помощью активной вибрации.

Возьмем, например, первую составляющую уравнения Горячкина  $R_1$  – силу сухого трения. При вибрации имеет место скольжение рабочего органа относительно почвы не только вперед, как при обычной обработке, но и назад, следовательно, путь силы трения

существенно увеличится, а это ведет к увеличению энергозатрат [58]. Путь силы  $R_2$  при вибрациях рабочего органа не изменяется, поэтому энергозатраты остаются прежними. Третья составляющая  $R_3$  зависит от квадрата скорости. Поскольку виброскорость при прямом ходе необходимо увеличивать прямо пропорционально скорости агрегата, то увеличиваются и затраты энергии. Налицо, казалось бы, парадокс: усилия уменьшаются, а затраты энергии возрастают. Однако это объясняется простыми законами механики, и работа почвообрабатывающего орудия, несмотря на снижение тяговой мощности, в конечном итоге становится энергетически невыгодной.

Применение вибрации в современных почвообрабатывающих машинах затруднено в связи с высокими поступательными скоростями (более 6–7 км/ч [59]). Это диктует необходимость поддержания высоких параметров амплитуды и частоты вынужденных колебаний, что технически трудно (а порой и невозможно) осуществить. Вынужденные колебания имеет смысл применять на тихоходных почвообрабатывающих машинах, скорости которых не превышают 2–3 км/ч. Автоколебательные рабочие органы реализуют большие амплитуды колебаний, поэтому их использование предпочтительнее [51].

### **1.7. Пассивно вибрирующие почвообрабатывающие рабочие органы**

Несмотря на то, что принудительная вибрация имеет более высокую частоту и амплитуду колебаний, пассивная имеет ряд преимуществ. Это простота и дешевизна конструкции, низкая энергоемкость и материалоемкость, чем у машин, рабочие органы которых оснащены активным виброприводом. Простейшим примером пассивно-вибрируемого привода является рабочий орган с пружинным креплением, воспринимающий попеременное сопротивление почвы (рис. 1.21).

Широкое применение имеют многоэлементные пружинные подвески, состоящие из двух и более элементов. В отличие от одноэлементной подвески (однопружинной), имеющей линейную характеристику пружинных сил, применение многоэлементной, по мнению многих исследователей, приводит к возникновению нелинейных



систем, поскольку движение рабочего органа с такой подвеской описывается нелинейным дифференциальным уравнением. Внедрение такого пружинного элемента в конструкцию подвески значительно влияет на колебания рабочего органа. Тяговое сопротивление рабочего органа с такой нелинейной подвеской, в сравнении с линейной, снижается на 14 %...26 % [34]. В пассивно колеблющихся рабочих органах, пружинный элемент может находиться как на стойке рабочего органа (рис. 1.21, б, в, д, ж, з), так и непосредственно за лемешно-отвальной поверхностью (рис. 1.21, а, г, е). В обоих случаях переменное давление почвы создает колебания, снижающие тяговое сопротивление. Существуют также конструкции, где колебания передаются на всю машину от опорного колеса, сделанного в виде пруткового катка имеющего форму правильного многоугольника (рис. 1.21, и) и колеса имеющего эксцентриситет относительно рамы машины (рис. 1.21, к) [60–69].

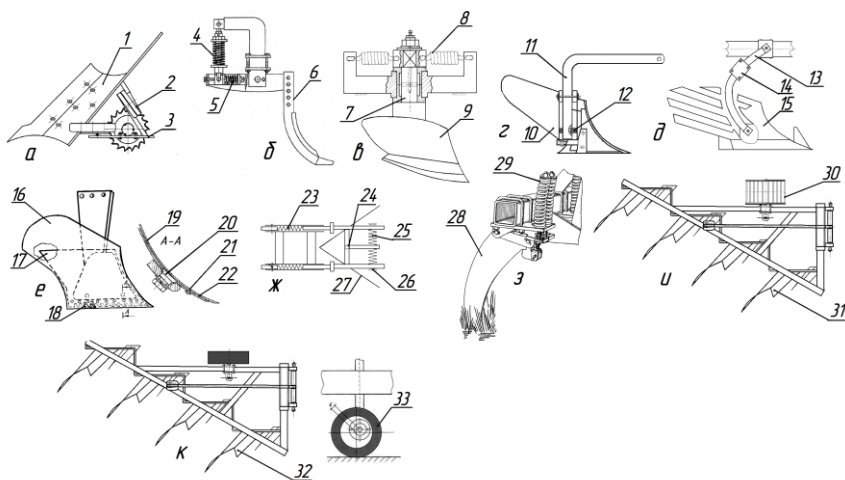


Рис. 1.21. Пассивно колеблющиеся рабочие органы (схемы к патентам):

- а – RU 173221; б – CN 108353540; в – RU 2667768; г – RU 2380874;  
 д – RU 144741; е – RU 2115278; ж – RU 2327324; з – US 3960220;  
 и – RU 2478270; к – UA 108167;  
 1, 6, 9, 10, 15, 16, 27, 28, 31, 32 – рабочий орган;  
 2, 4, 5, 8, 12, 14, 17, 23, 25, 26, 29 – упругий элемент; 3 – полевая доска;  
 7, 11, 13, 24 – стойка; 18 – гребенка; 19 – отвал; 20 – гайка; 21 – заклепка;  
 22 – лемех; 30, 33 – опорные колеса

В устройстве для рыхления мерзлых и прочных грунтов, по [70], впереди основного зубового рыхлителя установлена плита, на которой установлен дисбалансный вибратор. Согласно гипотезе «слабого звена», положительный энергоэффект получается только при использовании почвообрабатывающих рабочих органов на упругой подвеске. Автоколебательный процесс такой стойки расшатывает межагрегатные связи в почве и снижает ее прочность. На основе опытов, проведенных в ВИСХОМ, получено, что наибольшее снижение тягового сопротивления на упругой подвеске достигается при колебаниях стойки в широком диапазоне частот, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Энергоэффект составляет 25 %...30 % по сравнению с жестким креплением рабочего органа [37]. По мнению И. Я. Федоренко [57], «снижения энергетических затрат можно добиться лишь в отношении тягового механизма трактора, а общие затраты (с учетом вибропривода) не могут быть уменьшены посредством приложения вибрации». По его мнению, автоколебания реализуют большие амплитуды, поэтому их использование предпочтительнее. Уменьшение тягового сопротивления наступает при чередующемся импульсном воздействии рабочего органа, с релаксацией напряжений сжатия. В почвенном пласте нарушаются связи между составляющими частицами, в результате чего облегчается их взаимное перемещение, то есть реализуется процесс смятия при вспашке. Наиболее простым по конструктивной реализации и менее затратным по энергетике и материалоемкости является спонтанный колебательный процесс, который совершается за счет переменного сопротивления почвы. Для обеспечения нулевых воздействий за счет чередующихся отклонений рабочего органа от почвы в режиме автоколебаний с небольшими частотами направление вибрации не должно совпадать с направлением движения агрегата. Желательно, чтобы вибрация возникала в боковом или вертикальном направлениях [71].

Группой ученых Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского были проведены исследования работы культиватора для междурядной обработки виноградников с рыхлительными виброударными рабочими органами. Рыхлительные рабочие органы содержали установленный в верхней части стойки виброударный механизм, обеспечивающий колебательно-ударный процесс работы культиваторной лапы в горизонтальной плоскости, за счет

переменного сопротивления почвы, действующего на правое и левое крылья лапы. Двусторонний виброударный механизм стойки содержал установленные симметрично расположенные относительно продольной оси чередующиеся упругие пружины и цилиндрические звенья с полусферическими выступами на торцах.

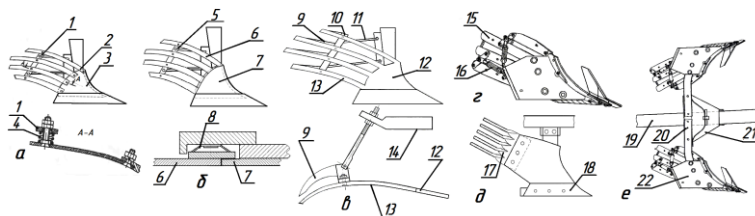


Рис. 1.22. Рабочие органы с пассивно-вибрирующими пластинчатыми отвалами (схемы к патентам):

*a* – ВУ 18090; *б* – RU 2426290; *в* – RU 2008102690; *г* – RU 97234;

*д* – RU 2435342; *e* – RU 2010115813;

1, 5, 10 – задняя опора; 2, 6, 13, 15 – пластины отвала; 3, 7, 12 – грудь отвала;

4, 8, 16 – упругий элемент; 9 – ограничитель отгиба; 11 – распорка;

14, 20 – стойка; 17 – пружинная решетка; 18 – лемех; 19 – рама; 21 – кронштейн;  
22 – корпус пластинчатый

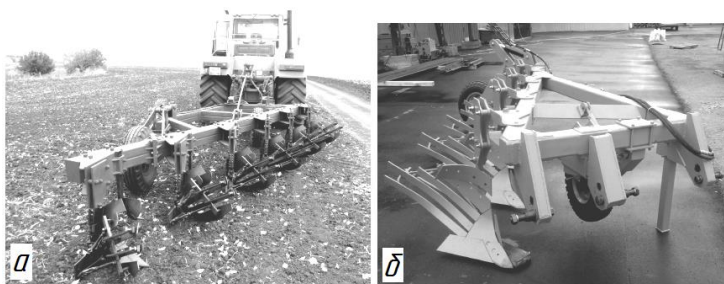


Рис. 1.23. Плуги с вибрационным пластинчатым отвалом:

*a* – шестикорпусный навесной плуг шириной захвата 2,7 м с пластинчатыми вибрирующими корпусами;

*б* – четырехкорпусный полунавесной плуг шириной захвата 1,8 м с пластинчатыми вибрирующими корпусами

Испытания проводились на скоростях 1,0, 1,5 и 2,0 м/с. Влажность почвы (*W*) составляла: в слое 0...0,07 м (*W* = 12,46 %...15,21 %), 0,07...0,14 м (*W* = 14,96 %...16,25 %), 0,14...0,21 м (*W* = 14,84 %...15,68 %). Твердость почвы и деформационный показатель на глубине

$h = 0,21$  м в среднем составляли соответственно,  $p = 49,44$  Н/см<sup>2</sup>,  $v = 1,97 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/Н. Оценка обработки почвы показала, что применение виброударных плоскорезных рыхлительных лап в сравнении с серийными позволяет увеличить степень крошения и уменьшить глубинность почвы на 12 %...15 %, уменьшить тяговое сопротивление на 13,6 %...22 %. Оптимальной скоростью обработки почвы на глубину 0,07...0,21 м в этих условиях, при использовании виброударных плоскорезных рыхлительных лап являлась 2 м/с [71]. Известны конструкции пассивно вибрирующих рабочих органов с пластинчатыми отвалами, представленные на рис. 1.22. Первые две конструкции из представленных (рис. 1.22, а, б) созданы в результате совершенствования третьей (рис. 1.22, в). На рис. 1.22, в изображена конструкция вибрирующего пластинчатого отвала отличительной особенностью которого является наличие полос 13 из пружинной стали 65Г, за каждой из которых установлен ограничитель отгиба 9. При работе корпуса плуга, переменное сопротивление почвы отгибает полосы, ударяя их об ограничитель, что создает вибрацию по всей длине полос и способствует тем самым снижению тягового сопротивления. Данная конструкция была не только запатентована, но и созданы экспериментальные образцы (рис. 1.23).

Проведенные испытания плугов с вибрационными пластинчатыми корпусами показали, что создание амплитуды вибрации 2...5 мм и частоты вибрации – 8...10 Гц снижает тяговое сопротивление до 14,5 %. Касательно усовершенствования конструкции вышеупомянутого отвала было предложено установить вибрационные опоры в виде тарельчатых пружин под передние концы пластин, в зоне стыка с грудью отвала. Целью предложенного изобретения является снижение тягового сопротивления вследствие отсутствия залипания почвы на груди отвала при вспашке переувлажненных почв [72]. Также одним из предложенных изобретений является корпус с упругими элементами 4 (пружинами сжатия) (рис. 1.22, а), что обеспечит снижение силы тяги и улучшение качества обработки почвы [73].

В конструкции (рис. 1.22, з) упругий элемент находится в распорках пластин, а в конструкции (рис. 1.22, д) упругий элемент представляет собой пружинную решетку, установленную вместо крыла отвала.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА ПЛУГА С ВИБРИРУЮЩИМ ПЛАСТИНЧАТЫМ ОТВАЛОМ**

### **2.1. Влияние пластинчатых отвалов на качество обработки почвы**

Чтобы получить выровненную поверхность поля при основной обработке почвы, необходимо применение комбинированных пахотных агрегатов, состоящих из плугов, борон или катков. Можно также применять другие агротехнические приемы после вспашки, такие как культивация, но это сопряжено с дополнительными материальными затратами. Альтернативой в данном случае является применение пластинчатых отвалов, которые имеют целый ряд преимуществ по сравнению со сплошными, среди которых отмечается возможность в полевых условиях регулировать форму рабочей поверхности от полувинтового до культурного типов, изменять углы сдвига пласта в соответствии со скоростью движения агрегата. Кроме того, в условиях повышенной влажности почва на них не залипает, и в связи с этим улучшается кинематика пласта и снижается тяговое сопротивление плуга. Пластинчатые отвалы обеспечивают лучшее крошение пластов и снижают гребнистость укладки отвальной почвы.

Мелкокомковатая агрегатная структура почвы и выровненная поверхность пашни формируются гораздо лучше пластинчатыми отвалами, чем сплошными. На рис. 2.1 изображена схема движения пласта по пластинчатому отвалу. Вследствие пластичности почвенного пласта, при его движении по пластинчатому отвалу происходит увеличение контактных напряжений в зонах отсутствия подпора со стороны отвала. Это вызывает его растяжение и облегчает разрушение при обороте и соударении с поверхностью поля.

Ш. С. Медетовым была защищена кандидатская диссертация «Разработка методики проектирования и обоснование параметров пластинчатого отвала плужного корпуса для липких почв», в которой научно обосновано преимущество применения пластинчатых отвалов (отвалов с не сплошной лемешно-отвальной поверхностью) над сплошными. Разработанный пластинчатый корпус «КУ-40» демонстрировал по сравнению со сплошными корпусами КП-04

и КПУ-40 снижение тягового сопротивления на 10 %...15 %, а в диапазоне рабочих скоростей 1,9–2,55 м/с снижение тягового сопротивления до 14 %. Это объяснялось меньшей площадью отвальной поверхности и правильной ориентацией прорезей пластин, которые совпали с относительной траекторией движения пласта. Крошение почвы увеличилось до 16 %, в зависимости от рабочей скорости [35].

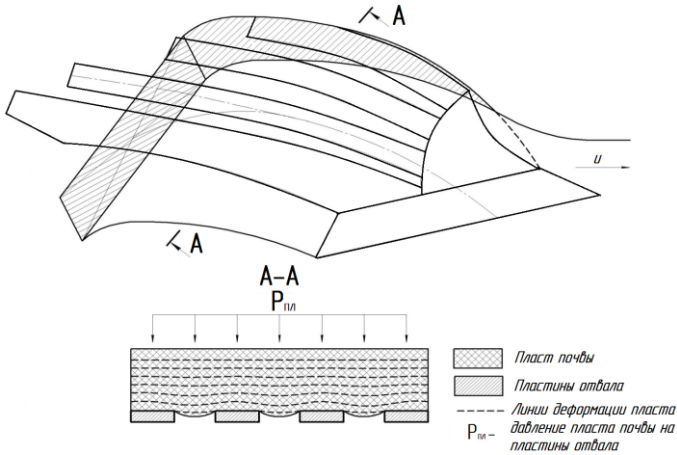


Рис. 2.1. Разрез пласта при движении по пластинам отвала

Вопросами обеспечения требуемого качества обработки почвы с использованием пластинчатых отвалов занимались А. В. Ключков и И. В. Дубень, которые подчеркивали перспективность применения пластинчатых отвалов по сравнению со сплошными. Если сплошной отвал традиционного корпуса выполняет в основном транспортирование пласта и оборот его в борозду, то пластинчатый отвал, благодаря наличию разделенных промежутками пластин способен оказывать на пласт дополнительное воздействие, интенсивность которого зависит от соотношения ширины пластин  $B$  и промежутков между ними  $C$  [36]. Опытным путем, с использованием ЭВМ, было установлена зависимость коэффициентов крошения почвы  $K_{кр}$  и глыбистости  $K_{гд}$  (процентное содержание по массе комков размером менее 0,05 м и более 0,15 м соответственно) от ряда геометрических параметров пластинчатого отвала. В результате установлено,

что при различных значениях радиуса несущего цилиндра пластин  $R$  наилучшему крошению почвы ( $K_{кр} > 77\%$ ) соответствует ширина пластин  $B = 0,052$  м и промежутков между ними  $C = 0,078$  м. Изменить ширину пластин, как и расстояние между ними, в процессе работы не представляется возможным, поэтому необходим дополнительный параметр или дополнительное воздействие. Таким воздействием, является вибрация.

## 2.2. Влияние площади контакта отвала на тяговое сопротивление при вспашке

Исследование и анализ каждого из указанных преимуществ пластинчатых отвалов показало следующее. С помощью компьютерного моделирования были рассчитаны площади отвалов корпусов, плуга ППО-8-40 и *Lemken Juwel-8M* (рис. 2.2). Площадь пластинчатого отвала *Lemken Juwel-8M* меньше на  $0,062$  м<sup>2</sup> или на  $27\%$ . Используя эмпирическую формулу для расчета сопротивления лемешно-отвальной поверхности ( $R_{ЛОП}$ ) [37], произведены расчеты влияния площади контакта на тяговое сопротивление:

$$R_{ЛОП} = h b_n \rho_{пн} g k_y (r_n \lambda + k_y^{-1} v^2 \xi) + q_{сн} S + q N S, \quad (2.1)$$

где  $h$  – глубина вспашки, м;

$b_n$  – ширина захвата корпуса, м;

$\rho_n$  – плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

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

$k_y$  – коэффициент усадки почвы;

$r$  – радиус кривизны отвала, м;

$\lambda$  – коэффициент влияния угловых параметров ЛОП на сопротивление;

$v$  – скорость агрегата, м/с;

$\xi$  – коэффициент влияния угловых параметров ЛОП на сопротивление, вызванное инерцией;

$q_{сн}$  – удельная сила прилипания почвы к ЛОП, Н/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь контакта с почвой, м<sup>2</sup>;

$q$  – коэффициент интенсивности действия касательных сил прилипания, вызываемых нормальным давлением, 1/м<sup>2</sup>;

$N$  – сила нормального давления, Н.

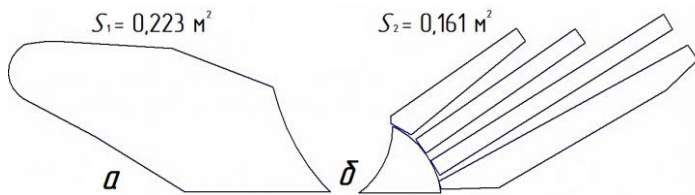


Рис. 2.2. Отвалы плугов и их площадь:  
*a* – ППО-8-40; *б* – Lemken Juwel-8M

Расчеты с использованием формулы (2.1) произведены при  $h = 0,25$  м;  $b_n = 0,35$  м;  $\rho_n = 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $k_y = \lambda = \xi = q = 1$ ;  $r = 0,2$  м;  $v = 2,2$  м/с;  $q_{cn} = 1$  Н/м<sup>2</sup>;  $S = 0,161 \dots 0,223$  м<sup>2</sup>;  $N = 1000$  Н. Результаты расчетов представлены на рис. 2.3.

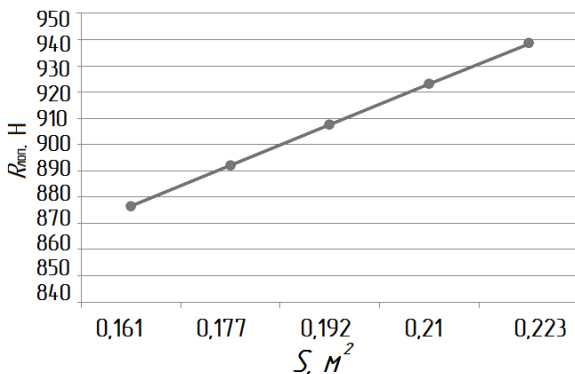


Рис. 2.3. График влияния площади поверхности отвала на тяговое сопротивление лемешно-отвальной поверхности

Анализ представленного графика (см. рис. 2.3) показал, что с увеличением площади отвальной поверхности возрастает тяговое сопротивление, что обусловлено увеличением сил нормального давления и площади налипания почвы к поверхности отвала.

### 2.3. Обоснование основных параметров пластинчатого отвала

Основу лемешно-отвальной поверхности плуга составляет трехгранный клин, у которого элементарные углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  непостоянны,



а изменяются в определенных пределах [5]. С увеличением интенсивности изменения углов  $\alpha$  и  $\gamma$  растет крошащая способность криволинейной поверхности, а интенсивное изменение угла  $\beta$  способствует обороту пласта [33].

Поверхностью лемешно-отвальных корпусов плуга является цилиндрикоид. Для построения такой поверхности необходимо знать характеристики: форму и параметры направляющей кривой, положение плоскости, в которой расположены эти кривые, закон изменения углов наклона образующих к вертикальной плоскости, совпадающей со стенкой борозды [74]. В зависимости от этих характеристик рабочие поверхности корпусов плугов подразделяются на цилиндрические, культурные, винтовые, полувинтовые, для скоростной пахоты и пластинчатые (рис. 2.4) [38]. Тип поверхности определяет ее способность выполнять технологические операции по обработке почвы, например, крошащую и оборачивающую способность плужных корпусов.

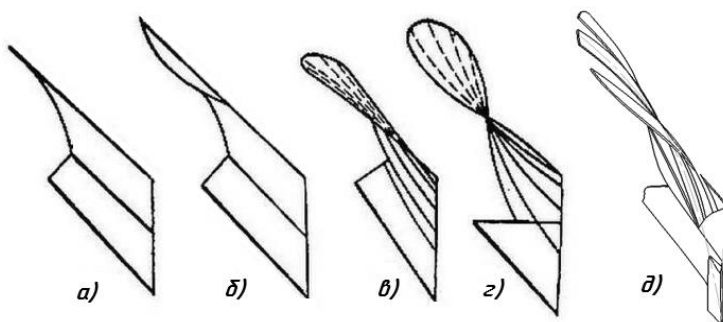


Рис. 2.4. Основные типы лемешно-отвальной поверхности:  
 а – цилиндрическая; б – культурная; в – полувинтовая; з – винтовая;  
 д – пластинчатая

При проектировании новых рабочих поверхностей почвообрабатывающих орудий нередко возникает необходимость изменять их характеристики для достижения желаемого эффекта воздействия на почвенный пласт. Криволинейную поверхность отвала получают путем перемещения образующей  $AB$  по двум направляющим кривым  $BK$  и  $B'K'$ . Для нахождения значений углов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  в любой точке поверхности отвала используют линии пересечения

поверхности отвала соответственно с продольно-вертикальной  $MOBK$ , горизонтальной  $AOB$  и поперечно-вертикальной  $AOM$  плоскостями (рис. 2.5) [74].

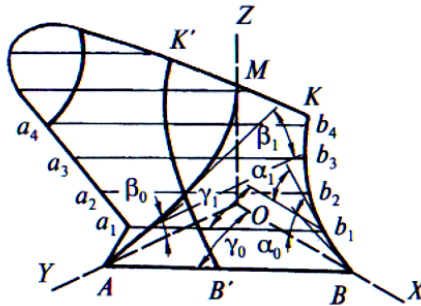


Рис. 2.5. Развитие трехгранного клина в лемешно-отвальную поверхность

Цилиндроидальная поверхность отвала образуется поступательным перемещением прямой, параллельной горизонтальной плоскости, по направляющей кривой, которая может быть расположена в плоскости  $N-N$ , перпендикулярной к лезвию лемеха, при изменении угла  $\gamma$  по тому или иному закону [74]. Законы изменения угла  $\gamma$  для культурной, полувинтовой и скоростной поверхности представлены на рис. 2.6. Если для базовых поверхностей данные закономерности изучены, то для не сплошной лемешно-отвальной поверхности такие данные отсутствуют.

Для изучения закономерностей оборачивания и отбрасывания почвенного пласта корпусом плуга приняты 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 (см. рис. 2.6). Данное движение рассматривается как относительное (система отсчета связана с отвалом). При подрезании слоя почвы величина относительной скорости принимается 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  $v_{пч0} \cos \alpha_{л}$ .

### Закономерности изменения угла $\gamma$

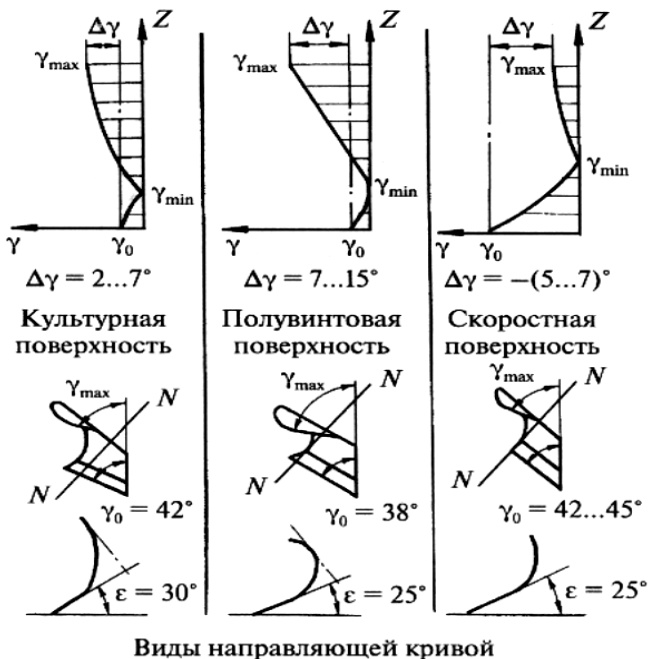


Рис. 2.6. Характеристики основных типов лемешно-отвальных поверхностей

При рассмотрении движения частицы почвы массой  $m_{пч}$  по поверхности отвала (дуга  $AB$ ) в верхней точке  $B$  отвала (рис. 2.7) на частицу будут действовать следующие силы: сила тяжести  $G_{пч}$ , центробежная сила инерции  $F_{пц}$ , сила реакции  $N_{отв}$  поверхности отвала и сила трения  $F_{птр}$ .

Сила тяжести:

$$G_{пч} = m_{пч}g. \quad (2.2)$$

Данную силу можно разложить на две составляющие:  $m_{пч}g \sin\gamma_{отв}$  – направленную по касательной к поверхности отвала  $\tau-\tau$ , и,  $m_{пч}g \cos\gamma_{отв}$  – направленную по нормали  $n-n$  к указанной поверхности.

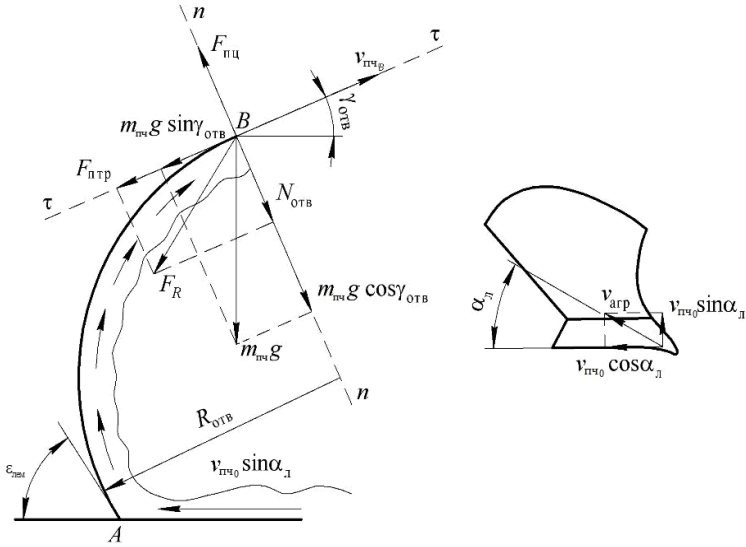


Рис. 2.7. Расчетная схема движения частицы почвы по отвалу корпуса плуга

### Центробежная сила инерции частицы почвы

$$F_{пц} = \frac{m_{пч} v_{пч0}^2 \sin^2 \gamma_{отв}}{R_{отв}}, \quad (2.3)$$

где  $\gamma_{отв}$  – угол наклона касательной, проведенной к поверхности отвала в точке  $B$ , к горизонту, град.

$v_{пч}$  – скорость движения почвенной частицы, м/с.

$R_{отв}$  – радиус кривизны отвала, м.

Форма направляющей кривой, место и размещение в той или иной части рабочей поверхности корпуса и параметры являются значительными для лемешно-отвальной поверхности, что касается подрезания, разрыхления и оборота пласта.

Исходными значениями для построения направляющей кривой являются угол  $\epsilon_0$  – между поверхностью дна борозды и касательной к направляющей кривой, размещенной в перпендикулярной плоскости к лезвию лемеха, и угол  $\gamma_0$  – между лезвием лемеха и стенкой

борозды. Чем больше угол  $\varepsilon_0$ , тем интенсивнее крошится и разрушается пласт. Для отвалов культурного типа  $\varepsilon_0 = 20^\circ \dots 30^\circ$ ; для полувинтовых  $\varepsilon_0 = 20^\circ \dots 25^\circ$ . Угол  $\gamma_0$  определяет интенсивность оборота пласта, а также крошения и разрыхления. Для отвалов культурного типа угол  $\gamma_0 = 40^\circ \dots 45^\circ$  а для полувинтовых  $\gamma_0 = 30^\circ \dots 40^\circ$ .

По форме направляющая кривая может быть частью окружности, параболы или эллипса. Наиболее распространена направляющая кривая, которая в нижней части имеет прямолинейный отрезок  $S$ , а выше имеет параболу. Такая направляющая кривая обеспечивает вначале полное поднятие пласта по лемеху и только потом оборот, что способствует крошению и разрыхлению. Длину прямолинейного отрезка  $S$  направляющей кривой выбирают в зависимости от глубины обработки. Для глубины обработки  $a = 200 \dots 250$  мм,  $S = 50$  мм, а для  $a = 250 \dots 300$  мм,  $S = 60$  мм.

Для построения направляющей кривой в виде параболы необходимо определить радиус окружности, на основании которого ее строить. Радиус должен быть таким, чтобы пласт, поднятый отвалом, полностью помещался на отвале и не пересыпался через него, а также, чтобы пласт, оборачиваемый отвалом, не задирался нижней частью полевого обреза. Следовательно, согласно первому условию будем иметь минимальное значение радиуса  $R_{\min}$ , а по второму – максимальное  $R_{\max}$ . Для определения минимального значения радиуса  $R_{\min}$  создадим сечение лемешно-отвальной поверхности плужного корпуса прямой  $AB$  (рис. 2.8), которая перпендикулярна к лезвию лемеха и проходит через его конец в точке  $A$ . Первое условие будет обеспечено, если кривая  $A_1M_1$  будет длиннее  $AB$  ( $A_1M_1 > AB$ ).

Из рис. 2.8 видно, что

$$AB = \frac{\gamma b}{\cos \alpha_0}.$$

$A_1M_1$  – длина кривой (части окружности)

$$A_1M_1 = R \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 \right).$$

При условии равенства  $AB = A_1M_1$  имеем

$$\frac{b}{\cos \gamma_0} = R \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 \right).$$

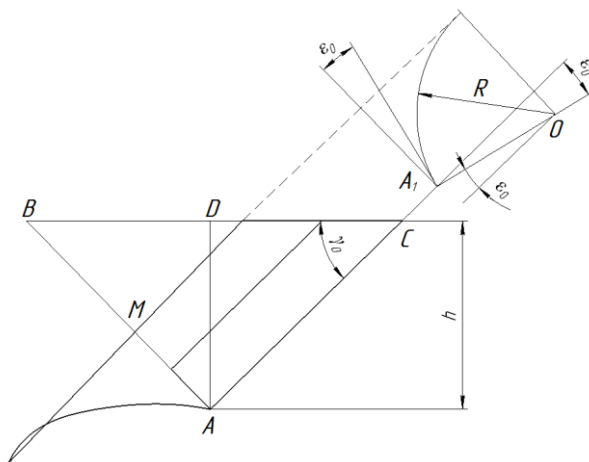


Рис. 2.8. Схема к определению минимального радиуса направляющей кривой

Отсюда

$$R = \frac{b}{\left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 \right) \cos \gamma_0}.$$

$$R_{min} = \frac{b}{\left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 \right) \cos \gamma_0}.$$

$$R_{min} = \frac{215}{\left( \frac{3,14}{2} - 26^\circ \right) \cos 36^\circ} = 172 \text{ мм.}$$

Для определения максимального значения радиуса  $R_{max}$ , учитывая, что отвал не затрагивает перевернутый пласт, академик В. П. Горячкин установил зависимость:

$$R_{max} = \frac{a\sqrt{k^2 - 1}}{k^2 \left( \cos \gamma_0 - \frac{\cos \gamma_0}{\sqrt{k^2 - \sin^2 \gamma_0}} \right)},$$

где  $k = \frac{b}{a}$ .

$$k = \frac{375}{215} = 1,74.$$

$$R_{max} = \frac{215\sqrt{1,74^2 - 1}}{1,74^2 \left( \cos 36^\circ - \frac{\cos 36^\circ}{\sqrt{1,74^2 - \sin^2 36^\circ}} \right)} = 211 \text{ мм.}$$

Для построения параболы расчетное значение радиуса  $R_{расч}$  исходной окружности должен быть больше  $R_{min}$  и меньше  $R_{max}$

$$R_{min} < R_{расч} < R_{max}.$$

Следует помнить, что, чем меньше  $R_{расч}$ , тем лучше пласт будет крошиться и разрушаться. Радиус кривизны должен обеспечивать условие полного размещения почвенного пласта на поверхности отвала, чтобы не допускать пересыпания почвы через верхний обрез и чтобы отвальный пласт не задирался нижним обрезом. Сила реакции  $N_{отв}$  отвала направлена по нормали. Сила трения  $F_{трп}$ , направленная по касательной к поверхности отвала, определяется по формуле

$$F_{трп} = f_{трп2} N_{отв}. \quad (2.4)$$

Значения внешнего коэффициента трения приведены в табл. 2.1. 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. 2.9).

Проекции указанных сил на нормаль  $n-n$  и касательную к поверхности отвала  $\tau-\tau$  позволяют получить уравнения равновесия системы в следующем виде:

$$\frac{m_{\text{пч}} v_{\text{пч}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - m_{\text{пч}} g \cos \gamma_{\text{отв}} - N_{\text{отв}} = 0. \quad (2.5)$$

$$m_{\text{пч}} a_{\text{пч}} = F_{\text{трп}} + m_{\text{пч}} g \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (2.6)$$

Из равенства (2.6) при  $N_{\text{отв}} = 0$  можно определить критическую для рассматриваемого поперечного сечения скорость движения агрегата, при которой частица будет достигать верхней кромки отвала

$$v_{\text{пчкр}} = \sqrt{\frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}}}. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1

Значения коэффициентов внутреннего ( $f_{\text{трп1}}$ ) и внешнего ( $f_{\text{трп2}}$ ) трения в зависимости от типа почвы [50]

Тип почвы	Содержание физической глины (частицы 0,01 мм), %	$f_{\text{трп1}}$	$f_{\text{трп2}}$	$\Phi_2$
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  $f_{\text{трп2}}$  для всех типов почв, за исключением связных песчаных, соответствуют низкой, большие – высокой влажности почвы; большее значение  $f_{\text{трп2}}$  у песчаных связных почв соответствует низкой влажности почвы.



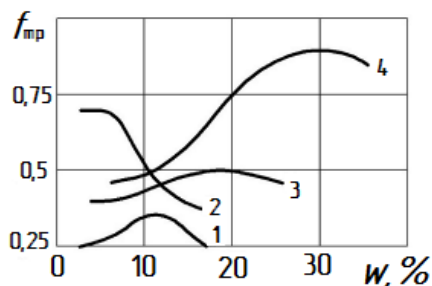


Рис. 2.9. Графики изменения коэффициента трения от влажности и механического состава почвы [4]:  
 1 – песчаная; 2 – супесчаная; 3 – средние суглинки;  
 4 – тяжелые суглинки и глина

Если скорость движения агрегата меньше критической скорости для данного сечения  $v_{пч\ кр} > v_{агр}$ , то частица падает с отвала, а перед отвалом почва может сгруживаться. При условии  $v_{пч\ кр} < v_{агр}$  обеспечивается отбрасывание слоя пласта без сгруживания.

Закономерность изменения угла  $\gamma$  образующей к стенке борозды по высоте может иметь линейный характер, графически выраженный прямой линией (рис. 2.10, а). В некоторых случаях академик В. П. Горячкин предлагал ее в виде параболы (рис. 2.10, б). Профессор М. В. Щучкин на основании исследований существующих поверхностей для культурных отвалов рекомендовал сложнейшую закономерность (рис. 2.10, в), где угол  $\gamma$  сначала уменьшается от  $\gamma_0$  до  $\gamma_{\min}$  по одной кривой (параболе или прямой), а потом увеличивается от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$  по другой кривой. Разница между максимальным значением угла  $\gamma_{\max}$  и углом  $\gamma_0$  ( $\Delta\gamma = \gamma_{\max} - \gamma_0$ ) может характеризовать общее возрастание угла по всей рабочей поверхности. Цилиндроидальные поверхности, которые имеют  $\Delta\gamma = 2^\circ \dots 7^\circ$ , применяются в культурных плужных корпусах. Если эта разница  $\Delta\gamma = 7^\circ \dots 15^\circ$ , то такую поверхность применяют в полувинтовых плужных корпусах. Минимальное значение угла  $\gamma$  имеют культурные и полувинтовые лемешно-отвальные поверхности на высоте  $Z_1 = 50 \dots 100$  мм от дна борозды. Уменьшение угла  $\gamma$  облегчает поднятие пласта по груди отвала и облегчает соскальзывание пласта в сторону борозды. Для культурных лемешно-отвальных поверхностей это уменьшение ( $\gamma_0 - \gamma_{\min}$ ) составляет  $1^\circ \dots 2^\circ$ , а для полувинтовых – от  $3^\circ$  до  $4^\circ$ .

Рассмотрим закон изменения угла  $\gamma$  для пластинчатой лемешно-отвальтной поверхности, на первый взгляд, угол  $\gamma$  изменяется от  $\gamma_0$  до  $\gamma_{\max}$  по прямой линии  $AB$  (рис. 2.11), а от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$  – по кривой  $BC$ , уравнение которой имеет вид

$$6,2x^2 - 100y - x^2y = 0, \quad (2.8)$$

где  $x$  – вертикальное расстояние образующей от образующей с углом  $\gamma_{\min}$ ;

$y$  – линейное значение в первом условном масштабе углов  $\gamma$  изменяемой образующей.

При условии, что центр осей  $x$  и  $y$  лежит в точке  $B$ , ось  $x$  направлена горизонтально, а ось  $y$  – вертикально.

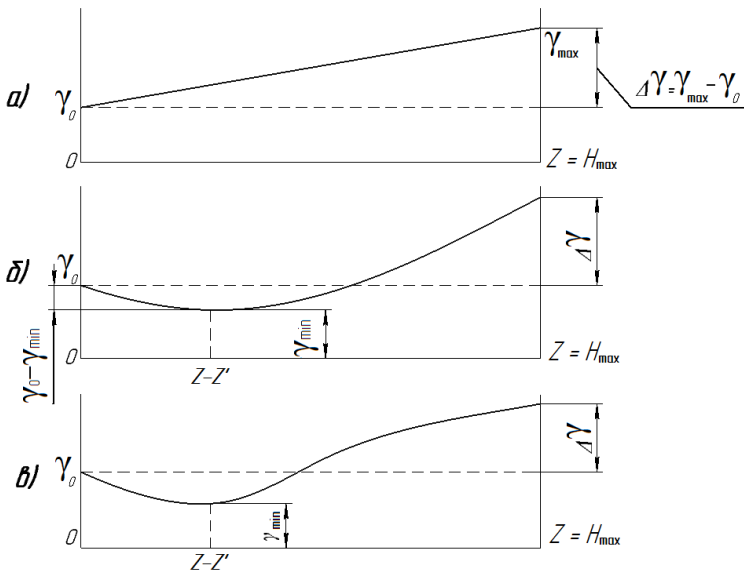


Рис. 2.10. Закономерности изменения угла  $\gamma$  по высоте:  
 а – линейная; б – параболическая; в – зависимость, предложенная  
 М. В. Щучкиным

При условии, что центр осей  $x$  и  $y$  лежит в точке  $B$ , ось  $x$  направлена горизонтально, а ось  $y$  – вертикально.

Согласно этому уравнение относительно  $y$  имеет вид:

$$y = \frac{6,2x^2}{x^2 + 100}. \quad (2.9)$$

Задав значение  $x$ , то есть высоту  $Z$  нахождения образующей, находим  $y$ . Вычислив масштаб, то есть скольким градусам соответствует линейное значение  $y$ , легко определить значение угла  $\gamma$  для какой-либо образующей.

Масштаб определяют из соотношения:

$$\lambda = \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{y_{\max}} = \frac{\Delta \gamma}{y_{\max}}. \quad (2.10)$$

Максимальное значение  $y_{\max}$  определяют, используя зависимость  $y$  к максимальному значению  $x_{\max}$ , которая находится из соотношения:

$$x_{\max} = Z_{\max} - Z_1, \quad (2.11)$$

где  $Z_{\max}$  – высота максимального значения угла  $\gamma$  ( $\gamma_{\max}$ );

$Z_1$  – высота минимального значения угла  $\gamma$  ( $\gamma_{\min}$ ).

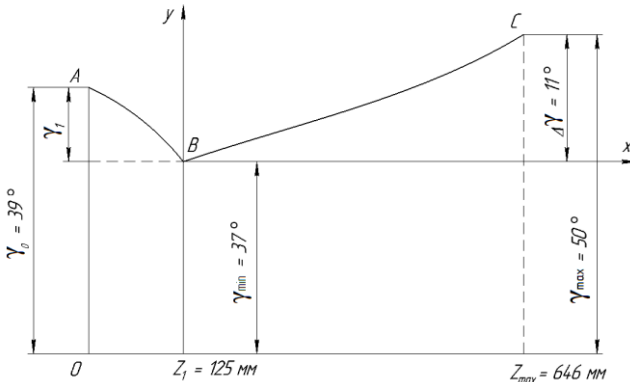


Рис. 2.11. Закономерность изменения угла  $\gamma$  для пластинчатой рабочей поверхности плужного корпуса

Зная масштаб  $\lambda$  и вычислив значение  $y$  для определенной высоты  $Z$ , определяем значение угла  $\gamma$  для этого положения образующей по формуле

$$\gamma = \gamma_{\min} + \lambda \gamma_{\min} = \gamma_{\min} + \lambda \frac{6,2x^2}{x^2 + 100}. \quad (2.12)$$

Определим угол  $\gamma$  для пластинчатого отвала.

Исходные данные:  $\gamma_0 = 39^\circ$ ,  $\gamma_{\min} = 37^\circ$  на высоте  $Z_1 = 12,5$  см,  $\gamma_{\max} = 50^\circ$ , высота  $Z_{\max} = 64,6$  см. Промежуточные значения угла  $\gamma$  от  $\gamma_0$  до  $\gamma_{\min}$ , в случае, если угол  $\gamma$  изменяется по линейной зависимости, находим следующим образом. Делим интервал  $AB$  (рис. 2.11) на три одинаковые по высоте интервала.

По каждому интервалу уменьшение угла  $\gamma$

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_0 - \gamma_{\min}}{3}. \quad (2.13)$$

$$\Delta\gamma = \frac{39 - 37}{3} = 40'.$$

то есть на высоте  $Z = 0$  угол  $\gamma_0 = 39^\circ$  (для лемеха), на высоте 4,17 см –  $\gamma_1 = \gamma_0 - 40' = 38^\circ 20'$ , на высоте 8,33 см –  $\gamma_2 = \gamma_1 - 40' = 37^\circ 40'$  и на высоте 12,5 см –  $\gamma_3 = \gamma_2 - 40' = 37^\circ = \gamma_{\min}$ .

На отрезке изменения угла  $\gamma$  от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$ , по кривой  $BC$  (см. рис. 2.11) для вычисления углов  $\gamma$  берем интервал 5 см и выполняем расчет в следующем порядке. Сначала, используя зависимость (2.12), определяем  $y_{\max}$

$$y_{\max} = \frac{6,2x_{\max}^2}{x_{\max}^2 + 100}.$$

Значения  $x_{\max}$  с разницей между  $Z_{\max}$  и  $Z_1$  равно

$$x_{\max} = Z_{\max} - Z_1 = 64,6 - 12,5 = 52,1 \text{ см.}$$

Тогда

$$y_{\max} = \frac{6,2 \cdot 52,1^2}{52,1^2 + 100} = 5,98 \text{ см.}$$

После чего определяем масштаб

$$\lambda = \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{y_{\max}} = \frac{50 - 37}{5,98} = 2,34 \text{ град/см.}$$

Имея выходные значения данных  $\gamma_{\min}$  и  $\gamma_{\max}$  и масштаб, определяем значение угла  $\gamma$  для образующей, которая проходит выше от нее на 5 см, которая имеет минимальное значения  $\gamma_{\min}$  по формуле

$$\gamma_4 = \gamma_{\min} + \lambda \frac{6,2x^2}{x^2 + 100} = 37^\circ + 2,34 \frac{6,2 \cdot 5^2}{5^2 + 100} = 38^\circ 14'.$$

Затем вычисляем значение угла  $\gamma$  для образующей, которая проходит на 10 см выше образующей проходящей над углом  $\gamma_{\min}$  по формуле

$$\gamma_4 = 37^\circ + 2,34 \frac{6,2 \cdot 10^2}{10^2 + 100} = 44^\circ 15'.$$

Таким же образом происходит вычисление угла  $\gamma$  для остальных образующих. На основании полученных зависимостей расчетным путем определены параметры пластинчатого корпуса плуга, представленные в табл. 2.2. Для сравнения в табл. 2.2 представлены параметры основных типов корпусов, применяемых на серийно выпускаемых плугах.

С целью проверки полученных расчетных основных параметров пластинчатого отвала на примере корпуса плуга *Lemken EurOpal 6 4 + 1 N100* фирмы *Lemken* (Германия) проведено его профилирование на профилемере следующим образом:

- определены координаты точек пластинчатой отвальной поверхности;

- построена горизонтальная проекция отвальной поверхности, определены минимальный и максимальный углы наклона образующих поверхности и лезвия к стенке борозды;

- установлен тип поверхности, найдено положение плоскости направляющей кривой.

Для снятия характеристик отвальной поверхности пластинчатого корпуса плуга использовался метод обратный проектированию – профилирование поверхностей с помощью профилометра (рис. 2.12).

Таблица 2.2

Основные параметры пластинчатого отвала в сравнении с другими применяемыми отвалами корпусов плуга

Тип рабочей поверхности корпуса	Глубина обраб. $h$ , см	Ширина захв. корпуса $b_{\text{к}}$ , см	$\gamma_{\text{лем}} = \gamma_0$ , град	$\gamma_{\text{min}}$ град	$\gamma_{\text{max}}$ град	$\epsilon_{\text{лем}}$ , град	Радиус кривизны направл. кривой, мм
Культурная	18...25	25...40	42	40	47...48	25...30	166...382
Полувинтовая	18...25	30...45	35-38	35...40	42...50	22...27	174...216
Скоростная	18...25	30...40	42-45	38...40	37...40	25...27	166...260
Пластинчатая	18...25	30...45	36-39	35...37	50...52	25...27	172...225

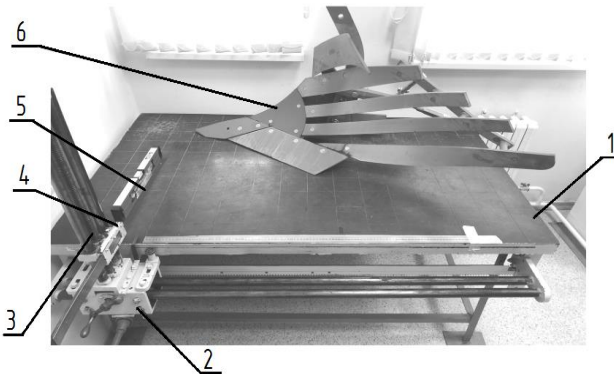


Рис. 2.12. Измерение параметров пластинчатого отвала *Lemken EurOpal 6 4+1 N100* фирмы *Lemken* на профилометре:

1 – горизонтальная плита; 2 – суппорт; 3 – вертикальная стойка; 4 – ползун; 5 – горизонтальная линейка; 6 – корпус плуга

Миллиметровые шкалы на передней кромке плиты 1, линейке 5 и стойке 3 позволили определить положение точек рабочих поверхностей в треугольной пространственной системе координат. Часть отвала, расположенная ниже образующей, проводимой под углом  $\gamma_{\min}$  разбивалась по высоте на интервалы по 30 мм и через них по образующим определялись необходимые углы. Надлежащая постановка лемеха ко дну борозды ( $\varepsilon_0$ ) и к стенке борозды ( $\gamma_0$ ), а также расположение груди отвала ( $\gamma_{\min}$ ) и его крыла ( $\gamma_{\max}$ ) относительно стенки борозды определяют собой форму отвала, а также радиус направляющей кривой  $R$ . Основные результаты профилирования представлены на рис. 2.13. Угол постановки лемеха ко дну борозды  $\varepsilon = 27^\circ$  и к стенке борозды  $\gamma_0 = 39^\circ$ , а также угол расположения груди отвала  $\gamma_{\min} = 37^\circ$  и его крыла  $\gamma_{\max} = 50^\circ$ , радиус направляющей кривой  $R = 218$  мм. Эти параметры близки к полученным расчетным путем.

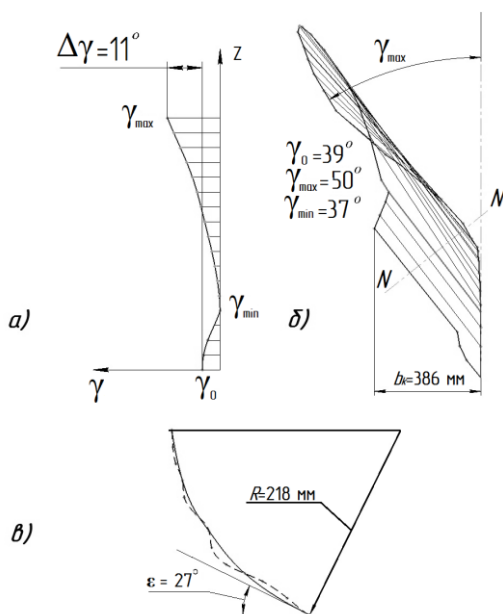


Рис. 2.13. Результаты профилирования лемешно-отвальной поверхности:

- а – закономерности изменения угла  $\gamma$ ;
- б – горизонтальная проекция и направляющая кривая рабочей поверхности корпуса;
- в – радиус направляющей кривой  $R$  отвальной поверхности пластинчатого корпуса плуга *Lemken EurOpal 6 4+1 N100*

Таким образом, были подтверждены ранее рассчитанные основные параметры пластинчатой лемешно-отвальной поверхности: угол постановки лемеха ко дну борозды  $\varepsilon = 25^\circ \dots 27^\circ$ ; угол постановки лемеха к стенке борозды  $\gamma_0 = 36^\circ \dots 39^\circ$ ; угол постановки груди отвала к стенке борозды  $\gamma_{\min} = 35^\circ \dots 37^\circ$ ; угол постановки крыла отвала к стенке борозды  $\gamma_{\max} = 50^\circ \dots 52^\circ$ ; радиус направляющей кривой отвальной поверхности  $R = 172 \dots 225$  мм.

На основе полученных основных параметров лемешно-отвальной поверхности пластинчатого корпуса была выполнена его компоновка (рис. 2.14), определены параметры пластин. Разработанные на основе компоновочной схемы параметры пластин имели следующие размеры: первая пластина сверху – длина сторон  $l_1 = 530$  мм,  $l_2 = 510$  мм, ширина сторон  $b_1 = 95$  мм,  $b_2 = 55$  мм; вторая пластина – длина сторон  $l_1 = l_2 = 670$  мм, ширина сторон  $b_1 = b_2 = 60$  мм; третья пластина – длина сторон  $l_1 = l_2 = 950$  мм, ширина сторон  $b_1 = b_2 = 60$  мм; четвертая пластина – длина сторон  $l_1 = 980$  мм,  $l_2 = 670$  мм, ширина сторон  $b_1 = 120$  мм,  $b_2 = 100$  мм.

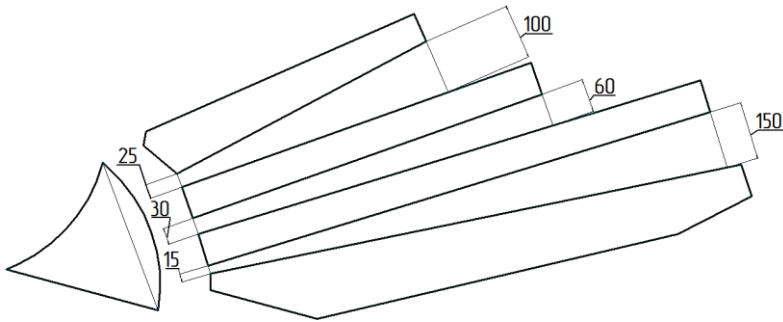


Рис. 2.14. Компоновочная схема пластинчатого корпуса плуга

Таким образом, окончательно основные параметры пластинчатой лемешно-отвальной поверхности были приняты в следующих интервалах: угол постановки лемеха ко дну борозды  $\varepsilon = 25^\circ \dots 27^\circ$ ; угол постановки лемеха ко стенке борозды  $\gamma_0 = 36^\circ \dots 39^\circ$ ; угол постановки груди отвала к стенке борозды  $\gamma_{\min} = 35^\circ \dots 37^\circ$ ; угол постановки крыла отвала к стенке борозды  $\gamma_{\max} = 50^\circ \dots 52^\circ$ ; радиус направляющей кривой отвальной поверхности  $R = 172 \dots 225$  мм.



## 2.4. Определение уравнений изменения углов изгиба и прогибов пластины по длине

Основное дифференциальное уравнение изгиба [76] равно

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M_z}{EI_z}, \quad (2.14)$$

где  $M_z$  – изгибающий момент от действия равномерно распределенного пласта почвы, Н·м;

$E$  – модуль упругости, Па;

$I_z$  – осевой момент инерции сечения пласта, м<sup>3</sup>.

Изгибающий момент от действия равномерно распределенного пласта почвы на пластину отвала будет равен (рис. 2.15).

$$M_z = -q \frac{x^2}{2}, \quad (2.15)$$

где  $q$  – равномерно распределенная нагрузка на пластину, Н/м.

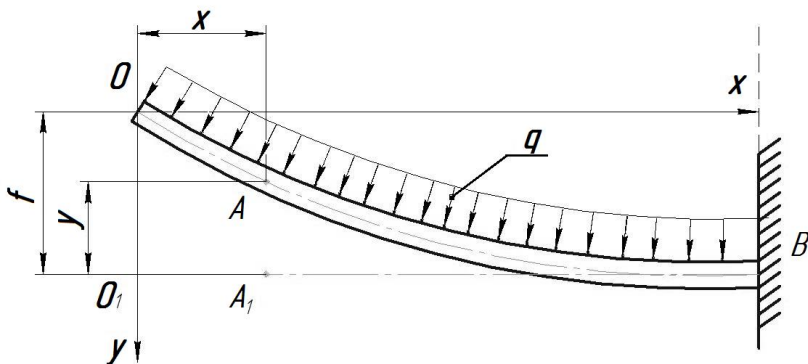


Рис. 2.15. Схема к расчету деформации пластины от воздействия распределенной нагрузки почвы

Осевой момент инерции сечения пластины определится согласно следующему выражению:

$$I_z = \frac{hb^3}{12}, \quad (2.16)$$

где  $h$  – толщина пластины, м;  
 $b$  – ширина пластины, м.

После подстановки полученного значения изгибающего момента (2.15) в выражение (2.14) определяется дифференциальное уравнение изгиба пластины

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{qx^2}{2EI_z}. \quad (2.17)$$

Первый интеграл от выражения (2.17) позволяет получить уравнение для определения угла поворота пластины при изгибе

$$\varphi(x) = \frac{qx^3}{6EI_z} + C_1, \quad (2.18)$$

где  $C_1$  – постоянная первого интегрирования.

Второй интеграл от уравнения (2.17) позволяет получить зависимость для определения величины прогиба пластины при изгибе

$$y(x) = \frac{qx^4}{24EI_z} + C_1 x + C_2, \quad (2.19)$$

где  $C_2$  – постоянная второго интегрирования.

Для определения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  необходимо использовать краевые условия

а) при  $x = l$ ;  $\varphi(l) = 0$ , тогда

$$\frac{ql^3}{6EI_z} + C_1 = 0, \quad (2.20)$$

откуда

$$C_1 = -\frac{ql^3}{6EI_z}, \quad (2.21)$$

где  $l$  – длина пластины, м

б) при  $x = l$ ;  $y(l) = 0$ , тогда

$$\begin{aligned} \frac{ql^4}{24EI_z} - \frac{ql^3}{6EI_z}l + C_2 &= 0. \\ \frac{ql^4}{24EI_z} - \frac{4ql^4}{24EI_z} + C_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$-\frac{3ql^4}{24EI_z} + C_2 = 0.$$

$$C_2 = \frac{3ql^4}{24EI_z}. \quad (2.23)$$

Окончательно законы изменения углов изгиба и прогибов по длине пластины будут равны

$$\varphi(x) = \frac{qx^3}{6EI_z} - \frac{ql^3}{6EI_z} = \frac{q}{6EI_z}(x^3 - l^3). \quad (2.24)$$

$$y(x) = \frac{qx^4}{24EI_z} - \frac{4ql^3x}{24EI_z} + \frac{3ql^4}{24EI_z}.$$

$$y(x) = \frac{q}{24EI_z}(x^4 - 4l^3x + 3l^4). \quad (2.25)$$

Полученное уравнение будет использоваться для расчета максимального изгиба пластин проектируемого корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом.

## 2.5. Определение величины тягового сопротивления корпуса плуга со сплошным и пластинчатым отвалом

Для определения тягового сопротивления корпуса с целью определения удельной равномерно распределенной нагрузки на пластину отвала использовался экспериментальный корпус плуга с пластинчатым отвалом (рис. 2.16). Исследования проводились в почвенном канале, оборудованном мобильным измерительным усилителем *Spider 8* для проведения испытаний по определению тягового сопротивления рабочих органов почвообрабатывающих машин. Оборудование представляет собой цифровой мобильный измерительный усилитель для измерения таких величин, как деформация, перемещение, сила, давление, пройденный путь, ускорение, температура. Все элементы, связанные с измерениями и обработкой сигналов, организацией питания датчиков, усилением, аналого-цифровым преобразованием, передачей данных во внешнюю вычислительную среду объединены в одном корпусе [77].

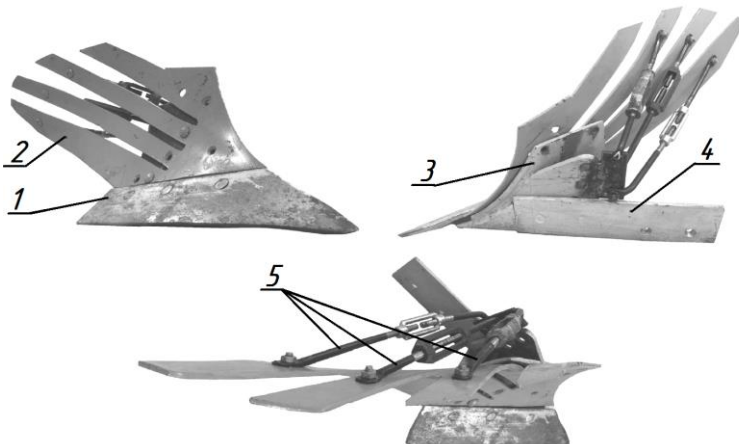


Рис. 2.16. Экспериментальный корпус плуга с пластинчатым отвалом:  
1 – лемех; 2 – пластинчатый отвал; 3 – башмак; 4 – полевая доска;  
5 – талрепы для изменения угла оборота пласта

Настройка параметров и работа усилителя происходила при помощи компьютера с помощью программы *catman Professional 4.5*. Рабочий орган закреплялся на тележке почвенного канала, с возможностью изменения глубины обработки [78].

Почвенный канал представлял собой пространство, заполненное почвой 11, с возможностью изменения ее влажности (с помощью полива) и плотности (прикатыванием) (рис. 2.17).

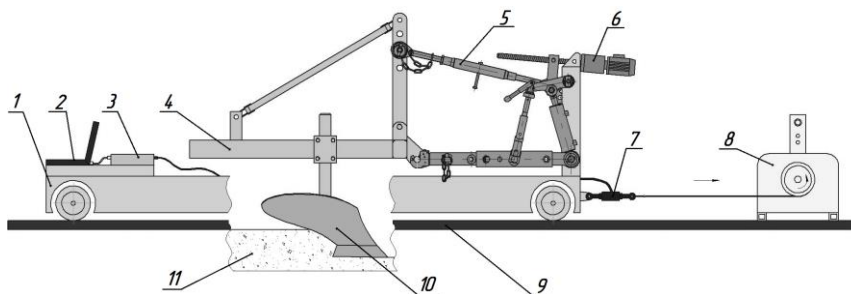
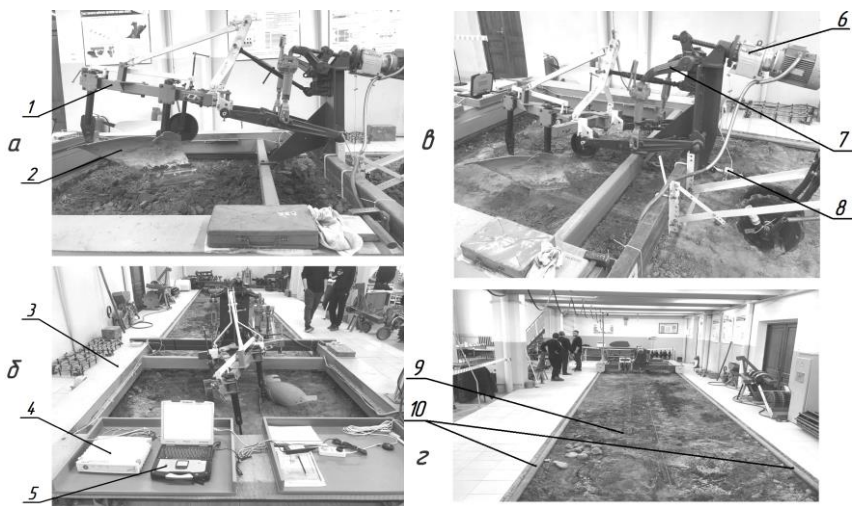


Рис. 2.17. Схема лабораторной установки:

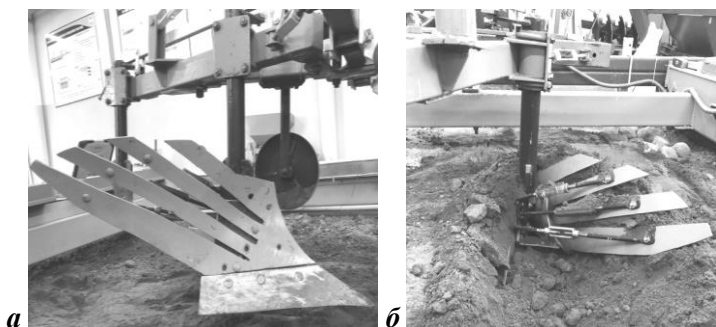
- 1 – транспортная тележка; 2 – компьютер;
- 3 – мобильный измерительный усилитель; 4 – пуг навесной; 5 – навеска;
- 6 – электродвигатель с винтовым механизмом;
- 7 – тензометрический датчик силы; 8 – тельфер; 9 – рельсы; 10 – корпус пуга;
- 11 – почва

Длина почвенного канала составляла 15 м, глубина около 0,5 м. Вдоль продольных сторон почвенного канала установлены рельсы 9, по которым передвигается транспортная тележка 1. На тележке смонтирована навеска 5, аналогичная навеске трактора, на которую установлен корпус навесного пуга 10. Благодаря электродвигателю с винтовым механизмом 6 существует возможность заглублять и выглублять рабочий орган. Передвижение тележки по рельсам почвенного канала осуществляется благодаря тельферу 8. Между тросом тельфера и транспортной тележкой установлен тензометрический датчик силы 7, информацию с которого считывает мобильный измерительный усилитель 3. Обработка информации с датчика происходит на компьютере 2 с помощью программы *catman Professional 4.5*.



*Рис. 2.18.* Проведение эксперимента:

- a* – вид экспериментальной установки сбоку;  
*б* – вид экспериментальной установки спереди;  
*в* – общий вид экспериментальной установки; *г* – почвенный канал;  
 1 – плуг навесной; 2 – корпус плуга; 3 – транспортная тележка;  
 4 – мобильный измерительный усилитель; 5 – компьютер;  
 6 – электродвигатель с винтовым механизмом; 7 – навеска;  
 8 – тензометрический датчик силы; 9 – почвенный канал; 10 – рельсы



*Рис. 2.19.* Испытание корпуса плуга с пластинчатым отвалом:

- a* – вид корпуса сбоку; *б* – вид корпуса сзади

На рис. 2.18 и 2.19 изображена экспериментальная установка в почвенном канале.

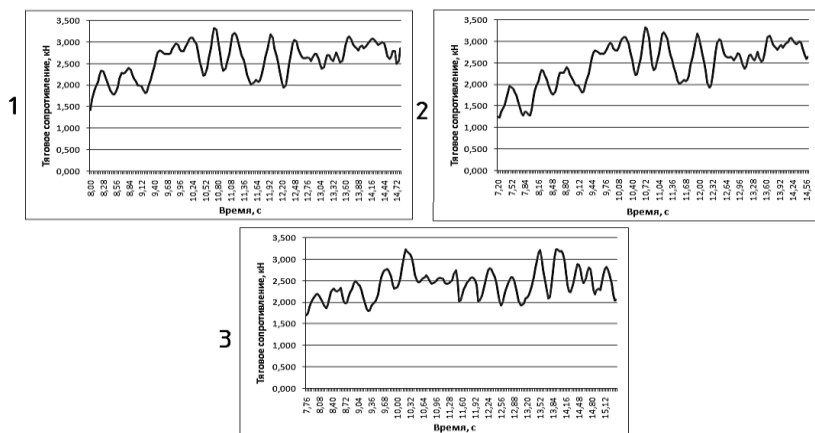


Рис. 2.20. Графики изменения тягового сопротивления корпуса плуга со сплошным отвалом по времени

Было проведено 3 блока измерений тягового сопротивления тележки  $R_T$ , корпуса плуга со сплошным отвалом  $R_{спл}$ , корпуса плуга с пластинчатым отвалом  $R_{пл}$  (рис. 2.20, 2.21). Исследования проводились на скорости  $v = 0,6$  м/с при глубине вспашки  $h = 0,23$  м. Результаты измерений подставлены в пункте 2.6.

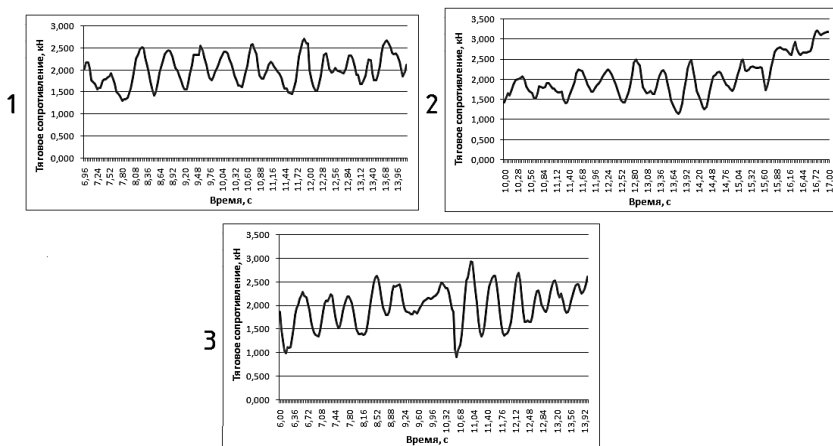


Рис. 2.21. Графики изменения тягового сопротивления корпуса плуга со пластинчатым отвалом по времени

## 2.6. Определение удельной равномерно распределенной нагрузки на пластину отвала

Сопrotивление тележки без рабочего органа

$$R_{т.маx} = 0,949 \text{ кН}; R_{т.мин} = 0,274 \text{ кН}.$$

Сопrotивление тележки с рабочим органом в виде сплошного отвала

$$R_{спл.маx} = 3,328 \text{ кН}; R_{спл.мин} = 1,241 \text{ кН}.$$

Сопrotивление тележки с рабочим органом в виде пластинчатого отвала

$$R_{пл.маx} = 3,218 \text{ кН}; R_{пл.мин} = 0,91 \text{ кН}.$$

Сопrotивление сплошного отвала за вычетом сопротивления тележки

$$R_{спл.маx} = 2,379 \text{ кН}; R_{спл.мин} = 0,967 \text{ кН}.$$

Сопrotивление пластинчатого отвала за вычетом сопротивления тележки

$$R_{пл.маx} = 2,269 \text{ кН}; R_{пл.мин} = 0,636 \text{ кН}.$$

Длина пластин, пластинчатого отвала составляет (рис. 2.22)

$$l_1 = 0,331 \text{ м}; l_2 = 0,436 \text{ м}; l_3 = 0,618 \text{ м}; l_4 = 0,636 \text{ м}.$$

Удельное сопротивление пластин, пластинчатого отвала определяется по следующей зависимости

$$q = \frac{R}{l}, \quad (2.26)$$

Соответственно для каждой из пластин удельное сопротивление будет равно

$$q_{l2.маx} = 6,85 \text{ кН/м}; q_{l2.мин} = 1,92 \text{ кН/м}.$$

$$q_{l2.маx} = 4,9 \text{ кН/м}; q_{l2.мин} = 1,46 \text{ кН/м}.$$

$$q_{l3.маx} = 3,67 \text{ кН/м}; q_{l3.мин} = 1,03 \text{ кН/м}.$$

$$q_{l4.маx} = 3,57 \text{ кН/м}; q_{l4.мин} = 1,0 \text{ кН/м}.$$



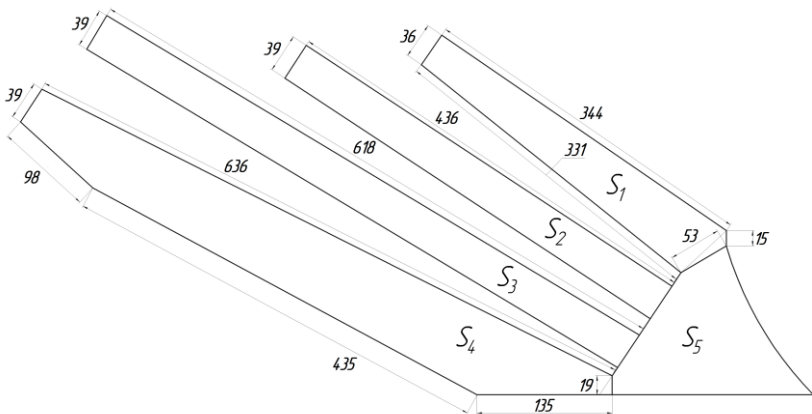


Рис. 2.22. Параметры пластинчатого отвала

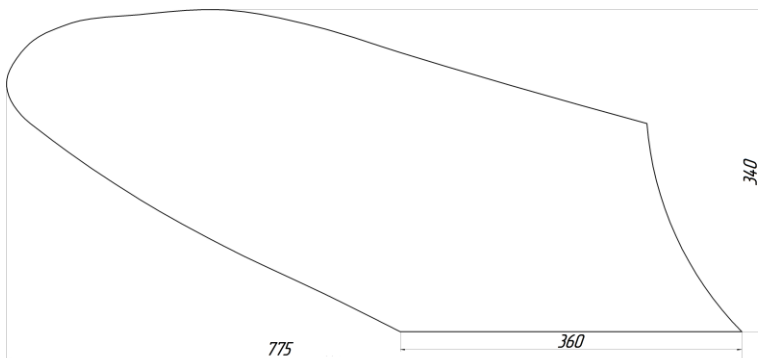


Рис. 2.23. Параметры сплошного отвала

## 2.7. Определение величины отклонения пластины отвальной поверхности корпуса плуга

Для расчета величины отклонения пластины отвальной поверхности воспользуемся формулой (2.25), приравняв переменную  $x$  к предельным значениям 0 и  $l$ . Таким образом, выражение примет вид:

$$\text{При } (x) = 0 \quad y(x) = \frac{3ql^4}{24EI_z} = \frac{ql^4}{8EI_z}. \quad (2.27)$$

$$\text{При } (x) = l \quad y(x) = \frac{q}{24EI_z} (l^4 - 4l^4 + 3l^4) = 0. \quad (2.28)$$

Анализ полученных выражений показал, что наибольшее отклонение пластины происходит на максимальном расстоянии от точки ее крепления. Используя формулу (2.27), можно проанализировать влияние толщины  $h$  и ширины  $b$  пластины на величину ее отклонения  $y(x)$  от первоначального положения в процессе работы. Произведя расчет на примере пластины № 3, задаем следующие параметры:

- удельная равномерно распределенная нагрузка –  $q_{13.\max} = 3,67 \text{ кН/м} = 36,7 \text{ Н/см}$  (исходя из расчетов пункта 2.6);
- модуль упругости для стали 65Г–  $E = 215\,000 \text{ МПа} = 21\,500\,000 \text{ Н/см}^2$  [79];
- длина пластины –  $l = 61,8 \text{ см}$  (рис. 2.22);
- осевой момент инерции –  $I_z$  (рассчитывается по формуле (2.16));
- толщина пластины  $h = 0,3 \dots 0,9 \text{ см}$  (шаг  $0,1 \text{ см}$ );
- ширина пластины  $b = 3,5 \dots 4,3 \text{ см}$  (шаг  $0,2 \text{ мм}$ ).

Для расчета величины отклонения  $y(x)$  пластины от первоначального положения во время работы, с учетом влияния толщины  $h$  и ширины  $b$  пластины, была создана матрица, которая была обработана в среде *MS Excel*. Матрица и результаты вычислений представлены в табл. 2.3. С помощью программы *Statistica* по полученным данным были построены поверхности отклика, представленные на рис. 2.24.

Таблица 2.3

Матрица и результаты вычислений

$h$ , см	$b$ , см	$y(x)$ , см	$h$ , см	$b$ , см	$y(x)$ , см
1	2	3	4	5	6
0,3	3,5	2,9045	0,7	3,5	1,2448
0,3	3,7	2,4585	0,7	3,7	1,0536
0,3	3,9	2,0993	0,7	3,9	0,8997
0,3	4,1	1,8068	0,7	4,1	0,7744
0,3	4,3	1,5663	0,7	4,3	0,6713
0,4	3,5	2,1783	0,8	3,5	1,0892
0,4	3,7	1,8439	0,8	3,7	0,9219
0,4	3,9	1,5745	0,8	3,9	0,7872

1	2	3	4	5	6
0,4	4,1	1,3551	0,8	4,1	0,6776
0,4	4,3	1,1747	0,8	4,3	0,5873
0,5	3,5	1,7427	0,9	3,5	0,9682
0,5	3,7	1,4751	0,9	3,7	0,8195
0,5	3,9	1,2596	0,9	3,9	0,6998
0,5	4,1	1,0841	0,9	4,1	0,6023
0,5	4,3	0,9398	0,9	4,3	0,5221
0,6	3,5	1,4522			
0,6	3,7	1,2292			
0,6	3,9	1,0497			
0,6	4,1	0,9034			
0,6	4,3	0,7831			

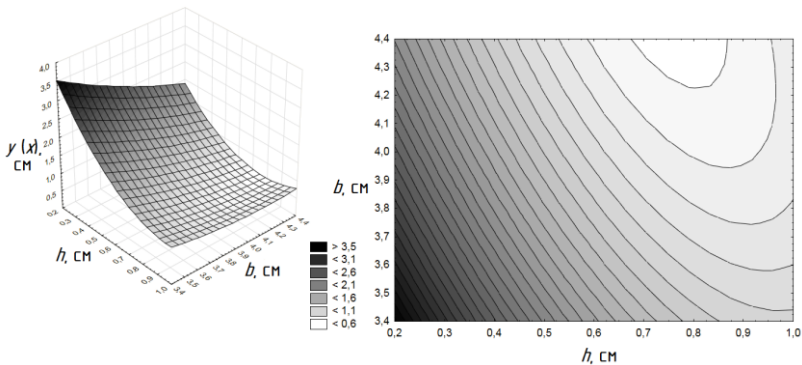


Рис. 2.24. Поверхность отклика и ее двумерное сечение зависимости величины отклонения пластины  $y(x)$  от ее толщины  $h$  и ширины  $b$

Обработка полученных данных позволила получить следующее регрессионное уравнение

$$y(x) = 19,00 - 13,93h - 5,78b + 4,08h^2 + 1,74hb + 0,49b^2. \quad (2.29)$$

Анализ полученного уравнения регрессии показывает, что наибольшее влияние на отклонение пластины  $y(x)$  имеет толщина  $h$ ,

поэтому при проектировании параметров для пластин вибрирующего отвала, необходимо оперировать именно данным параметром.

## 2.8. Определение частоты колебаний пластин отвальной поверхности

С целью определения частоты колебаний  $\nu$  пластин отвальной поверхности, были изучены графики исследования тягового сопротивления пластинчатого отвала  $R_{пл}$  от времени  $t$  (рис. 2.25).

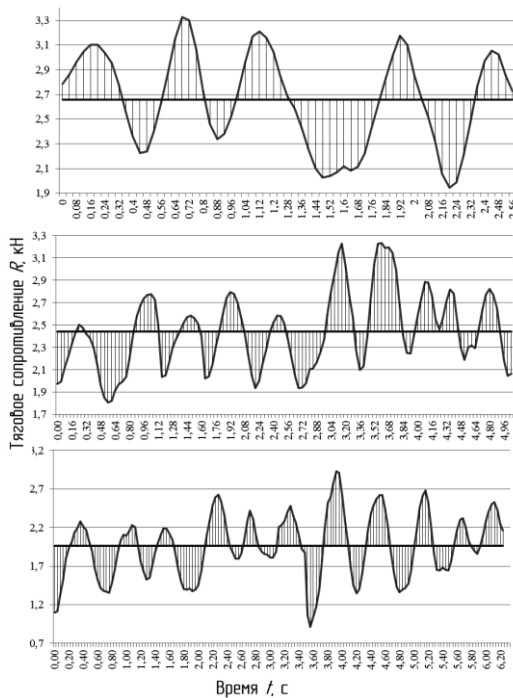


Рис. 2.25. Графики изменения тягового сопротивления по времени в результате испытаний корпуса плуга с пластинчатым отвалом

Частота  $\nu$  представляет собой число полных колебаний, совершающихся за единицу времени [80].

$$\nu = \frac{n}{t}, \quad (2.30)$$

Единицей измерения частоты в Международной системе единиц (СИ) служат герцы или обратные секунды:  $\nu = \text{с}^{-1} = \text{Гц}$ . Данные расчета частоты колебаний представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты расчета частоты колебаний пластин отвала

Номер испытания	Время $t$ , с	Количество колебаний $n$ , шт	Частота колебаний $\nu$ , Гц
1	2,56	9	3,516
2	5,04	20	3,968
3	6,24	22	3,526
Среднее			3,670

Средняя частота колебаний пластин составляет  $\nu = 3,670$  Гц. Рассчитанная частота позволила подобрать параметры элемента конструкции копуса плуга, который обеспечит восприятие возникающих пассивных вибраций при движении пласта почвы по пластинчатому отвалу.

## 2.9. Обоснование параметров комплекта пластин вибрационного пластинчатого отвала

Для нахождения необходимого интервала, в пределах которого будет происходить варьирование отклонения пластины, была проанализирована литература с разработками вибрационной сельскохозяйственной техники для обработки почвы. В Воронежском ГАУ было разработано две конструкции вибрирующего плуга от попеременного сопротивления почвы [39, 64, 68]. В первой вибрация создавалась благодаря стойке из гибких пружинных пластин (ресор) которые отклоняли рабочий орган в боковом направлении. Снижение тягового сопротивления корпуса происходило при достижении амплитуды вибрации 5...8 мм и частоты вибрации 8...10 Гц. Во второй конструкции применялся пластинчатый отвал из пружинной стали, за каждой из пластин которого стоял ограничитель. Снижение тягового сопротивления наблюдалось при достижении амплитуды вибрации до 5 мм, частоты вибрации 8...10 Гц.

По данным А.Б. Когана и А.П. Швейкина, положительный эффект от вибрации проявляется при частоте колебаний 5 Гц и возрастает вплоть до 14 Гц. Возрастание амплитуды колебаний также повышает эффективность вибрации, но до определенного предела. Наибольшее снижение тягового сопротивления достигается при амплитудах 3...5 мм. При увеличении амплитуды свыше 3,5...5 мм (в зависимости от типа почвы) наступает уменьшение эффективности вибрации. При амплитудах порядка 10...11 мм вибрация эффекта не дает, что объясняется повышенным расходом энергии на излишнюю деформацию почвенного пласта [50].

Таким образом, принимаем интервалы для амплитуды вибрации  $y_{\text{опт}} = 3...5$  мм. В данных пределах была произведена оптимизация параметров каждой из пластин отвала.

### 2.9.1. Расчет первой пластины сверху

Геометрические параметры первой пластины сверху изображены на рис. 2.26.

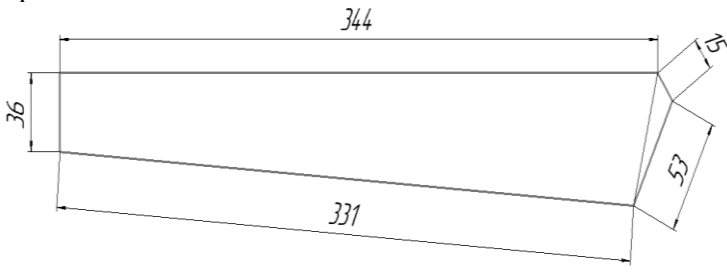


Рис. 2.26. Геометрические параметры первой пластины

Используя формулу (2.28), рассчитывалась необходимая толщина  $h_1$  первой пластины для ее отклонения  $y(x)_1$  от первоначального положения, в процессе работы в пределах граничных условий. Приняты следующие исходные данные:

- удельная равномерно распределенная нагрузка –  $q_{l1.\text{max}} = 6,85 \text{ кН/м} = 68,5 \text{ Н/см}$  (исходя из расчетов пункта 2.6);
- модуль упругости для стали 65Г  $E = 215\,000 \text{ МПа} = 21\,500\,000 \text{ Н/см}^2$  [79];
- длина пластины –  $l_1 = 33,1 \text{ см}$  (рис. 2.26);

- осевой момент инерции –  $I_z$  (рассчитывается по формуле 2.16);
- ширина пластины  $b_1 = 3,6$  см (рис. 2.26).

Результаты расчетов величины отклонения  $y_1$  пластины 1 в зависимости от ее толщины  $h_1$  представлены на рис. 2.27.

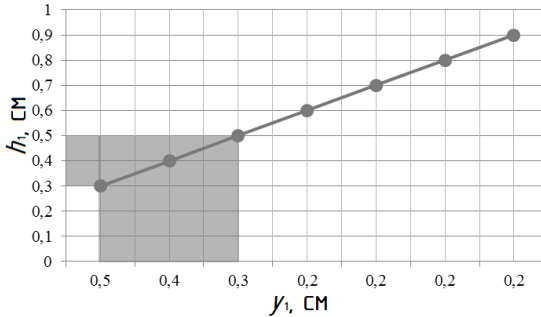


Рис. 2.27. График отклонения  $y_1$  пластины 1 в зависимости от толщины  $h_1$

Согласно рис. 2.27, отклонение пластины в установленных пределах  $y_{\text{отт}} = 3 \dots 5$  мм возможно при толщине пластины  $3 \dots 5$  мм.

## 2.9.2. Расчет второй пластины

Геометрические параметры второй пластины изображены на рис. 2.28.

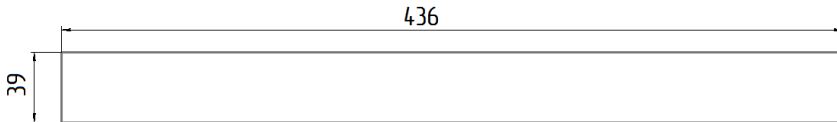


Рис. 2.28. Геометрические параметры второй пластины

С использованием формулы (2.28) рассчитана необходимая толщина  $h_2$  второй пластины для ее отклонения  $u(x)_2$  от первоначального положения в процессе работы в пределах граничных условий. Приняты следующие исходные данные:

- удельная равномерно распределенная нагрузка –  $q_{12.\text{max}} = 4,9$  кН/м = 49,0 Н/см (исходя из расчетов пункта 2.6);
- модуль упругости для стали 65Г-  $E = 215\,000$  МПа = 21 500 000 Н/см<sup>2</sup> [79];

- длина пластины –  $l_2 = 43,6$  см (рис. 2.28);
- осевой момент инерции –  $I_2$  (рассчитывается по формуле 2.16);
- ширина пластины  $b_2 = 3,9$  см (рис. 2.28).

Результаты расчетов величины отклонения  $y_2$  пластины 2 в зависимости от ее толщины  $h_2$  представлены на рис. 2.29.

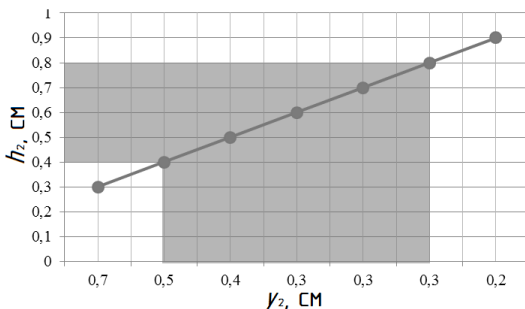


Рис. 2.29. График отклонения  $y_2$  пластины 2 в зависимости от толщины  $h_2$

Согласно рис. 2.29, отклонение пластины в установленных пределах  $y_{\text{опт}} = 3 \dots 5$  мм происходит при толщине пластины  $4 \dots 8$  мм.

### 2.9.3. Расчет третьей пластины

Геометрические параметры третьей пластины изображены на рис. 2.30.

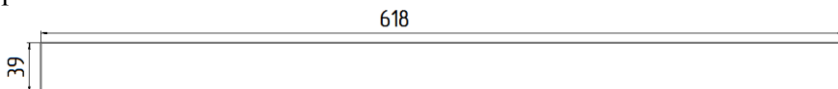


Рис. 2.30. Геометрические параметры третьей пластины

С использованием формулы (2.28), рассчитывалась необходимая толщина  $h_3$  третьей пластины для ее отклонения  $y(x)_3$  от первоначального положения в процессе работы, в пределах граничных условий. Приняты следующие исходные данные:

- удельная равномерно распределенная нагрузка –  $q_{13, \text{max}} = 3,67$  кН/м =  $36,7$  Н/см (исходя из расчетов пункта 2.6);
- модуль упругости для стали 65Г Е =  $215\,000$  мПа =  $21\,500\,000$  Н/см<sup>2</sup> [79];



- длина пластины –  $l_3 = 61,8$  см (рис. 2.30);
- осевой момент инерции –  $I_z$  (рассчитывается по формуле 2.16);
- ширина пластины  $b_3 = 3,9$  см (рис. 2.30).

Результаты расчетов величины отклонения  $y_3$  пластины 3 в зависимости от ее толщины  $h_3$  представлены на рис. 2.31.

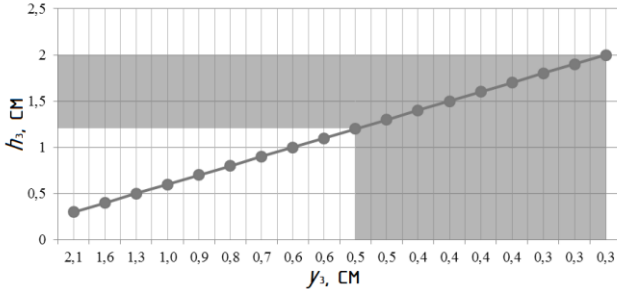


Рис. 2.31. График отклонения  $y_3$  пластины 3 в зависимости от толщины  $h_3$

Согласно рис. 2.31, отклонение пластины в установленных пределах  $y_{\text{отт}} = 3 \dots 5$  мм происходит при толщине пластины  $12,5 \dots 20$  мм.

### 2.9.4. Расчет четвертой пластины

Геометрические параметры четвертой пластины изображены на рис. 2.32.

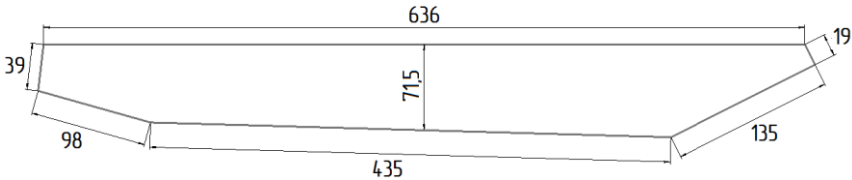


Рис. 2.32. Геометрические параметры четвертой пластины

Согласно формуле (2.28), рассчитана необходимая толщина  $h_4$  четвертой пластины для ее отклонения  $y(x)_4$  от первоначального положения в процессе работы, в пределах граничных условий. Приняты следующие исходные данные:

- удельная равномерно распределенная нагрузка –  $q_{14.\text{max}} = 3,67$  кН/м =  $36,7$  Н/см (исходя из расчетов пункта 2.6);

- модуль упругости для стали 65Г  $E = 215\,000\text{ МПа} = 21\,500\,000\text{ Н/см}^2$  [79];

- длина пластины –  $l_4 = 63,6\text{ см}$  (рис. 2.32);

- осевой момент инерции –  $I_z$  (рассчитывается по формуле 2.16);

- ширина пластины  $b_4 = 3,9\text{ см}$  (см. рис. 2.32).

Результаты расчетов величины отклонения  $y_4$  пластины 4 в зависимости от ее толщины  $h_4$  представлены на рис. 2.33.

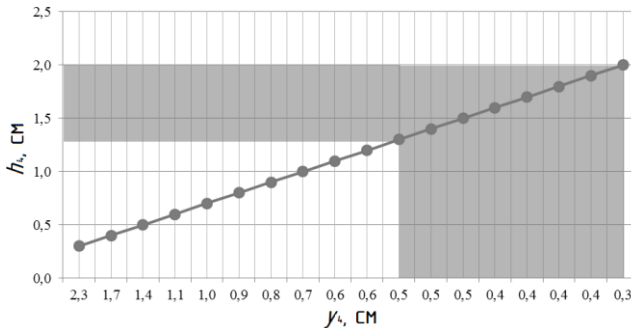


Рис. 2.33. График отклонения  $y_4$  пластины 4 в зависимости от толщины  $h_4$

Согласно рис. 2.33, отклонение пластины в установленных пределах  $y_{\text{опт}} = 3 \dots 5\text{ мм}$  происходит при толщине пластины до  $14 \dots 20\text{ мм}$ .

### 2.9.5. Результаты расчетов геометрических параметров пластин

Исходя из расчетов, для отклонения на  $y_{\text{опт}} = 3 \dots 5\text{ мм}$  каждой из пластин отвала необходима различная толщина. Для верхних пластин (пластины 1, 2) она составляет  $3 \dots 8\text{ мм}$ , что обусловлено их малой длиной ( $l_1 = 344\text{ мм}$ ,  $l_2 = 436\text{ мм}$ ), тогда как для последующих пластин (пластины 3, 4) необходимая толщина составляет  $12,5 \dots 20\text{ мм}$ , в силу их большей длины ( $l_3 = 618\text{ мм}$ ,  $l_4 = 636\text{ мм}$ ).

Для достижения отклонения пластин на одинаковое расстояние с целью исключения дисбаланса их работы и упрощения изготовления, так как пластинчатый отвал изготавливается разделением сплошного на отдельные полосы, принимаем толщину для первой

и второй пластин:  $h_1 = h_2 = 5$  мм, для третьей и четвертой пластин:  $h_3 = h_4 = 8$  мм. Ограничение отклонения нижних пластин, в силу их большой длины, будет обеспечиваться компенсирующим механизмом с пружинами сжатия.

## 2.10. Теоретическое обоснование параметров компенсирующего механизма с пружиной сжатия

Переменный угол наклона пластины отвала обеспечивается за счет пружинного элемента 4, установленного между пластиной 2 и упором 3 (рис. 2.34). Для обоснования параметров пружинного элемента 4 рассмотрим силовое взаимодействие пласта почвы с одной из пластин отвала. Так как движение плуга в установившемся режиме осуществляется с постоянной скоростью, рассмотрим равновесие пластины под действием активных сил.

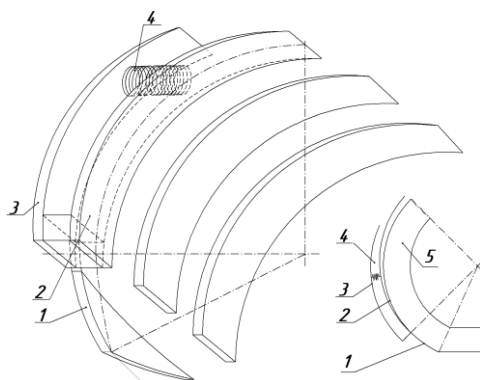


Рис. 2.34. Пластинчатый отвал:  
1 – грудь отвала; 2 – пластина отвала; 3 – упор;  
4 – пружинный элемент; 5 – пласт почвы

Силами, действующими на отвал, будут реакция подпора пласта  $Q$ , вес пласта  $G$  и нормальная реакция поверхности пластин отвала  $N$  (рис. 2.35). Для нахождения нормальной реакции пласта рассмотрим сумму моментов относительно точки  $A$  (начала пластины отвала).

$$\sum M_A = 0.$$

$$N(X_c - l_0) - G(X_c - l_0)\sin\alpha - Q\left(\frac{a}{2} - l_0 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right) = 0, \quad (2.31)$$

где  $X_c$  – центр тяжести пластины отвала, м;

$$l_0 = \frac{\pi R \varphi_0}{180} - \text{длина груди отвала, м.}$$

Сила нормальной реакции поверхности пластины отвала определится из выражения (2.31)

$$N = \frac{G(X_c - l_0)\sin\alpha + Q\left(\frac{a}{2} - l_0 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right)}{X_c - l_0}. \quad (2.32)$$

Для определения усилия пружины рассмотрим взаимодействие пластины отвала с пружиной. Величину сжатия пружины определим из уравнения равновесия – суммы моментов относительно точки  $A$  (рис. 2.36).

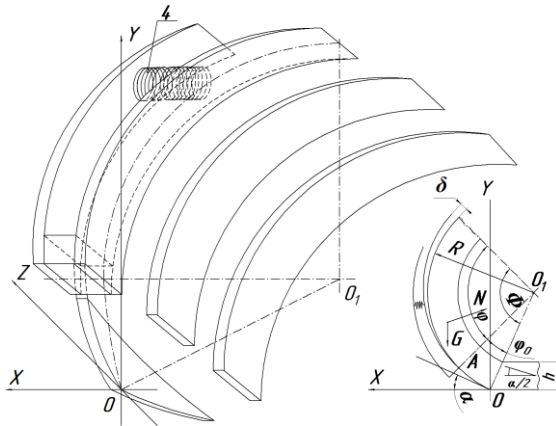


Рис. 2.35. Схема силового взаимодействия пласта почвы с пластиной отвала:  $N$  – нормальная реакция поверхности пластины отвала;  $G$  – сила тяжести;  $h$  – высота пласта;  $Q$  – реакция подпора;  $R$  – радиус кривизны пластины отвала;  $\Phi$  – угол охвата пласта пластиной и грудью отвала;  $\varphi$  – угол охвата пласта пластиной отвала;  $\varphi_0$  – угол охвата пласта грудью отвала;  $\delta$  – изменение угла наклона пластины отвала;  $\alpha$  – угол установки отвала относительно стенки борозды;  $\alpha/2$  – угол между реакцией подпора и горизонталью

$$F_{\text{пр}} l_1 - N'(X_c - l_0) = 0, \quad (2.33)$$

где  $l_1 = \frac{\pi R \varphi_1}{180}$  – длина дуги от начала пластины до пружинного элемента, м.

Выразим из выражения (2.33) величину усилия сжатия пружины

$$F_{\text{пр}} = \frac{N'(X_c - l_0)}{l_1}. \quad (2.34)$$

Подставив значения нормальной реакции  $N$ , получим

$$F_{\text{пр}} = \frac{G(X_c - l_0) \sin \alpha + Q \left( \frac{h}{2} - l_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)}{l_1}. \quad (2.35)$$

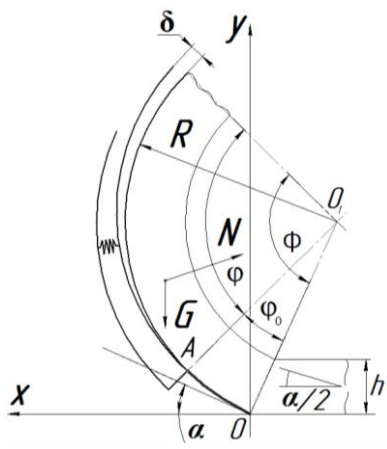


Рис. 2.36. Схема силового взаимодействия пластины отвала с пружиной:  $N$  – нормальная реакция пружины;  $\varphi_1$  – угол охвата пласта между началом пластины и пружинным элементом

Согласно [81] реакция подпора пласта

$$Q = 2 \varepsilon h b v^2 \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) \operatorname{tg} \left( \beta + \frac{\alpha}{2} \right), \quad (2.36)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности;  
 $h$  – глубина вспашки, м;  
 $b$  – ширина пластины, м;  
 $v$  – скорость движения корпуса плуга, м/с;  
 $\beta$  – угол трения почвы о металл, град.

Окончательное уравнение для расчета усилия пружины будет равно

$$F_{\text{пр}} = \frac{G(X_c - l_0) \sin \alpha + 2\varepsilon abv^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\alpha}{2} - l_0 \text{tg} \frac{\alpha}{2}\right)}{l_1}. \quad (2.37)$$

Используя формулу (2.37), проанализируем влияние скорости движения при вспашке  $v$  и точку установки пружинного элемента  $l_1$  на усилие сжатия пружины  $F_{\text{пр}}$ . Произведем расчет на примере пластины № 3.

Сила тяжести  $G$  состоит из веса  $G_{\text{пл}}$  пластины и  $G_{\text{п}}$  почвы, находящейся на пластине отвала во время движения

$$G = G_{\text{пл}} + G_{\text{п}}, \quad (2.38)$$

Величина веса  $G_{\text{п}}$  почвы зависит от глубины а пахоты и определяется по формуле

$$G_{\text{п}} = k_{\text{п}} a, \quad (2.39)$$

где  $k_{\text{п}}$  – коэффициент пропорциональности между глубиной пахоты и весом находящегося на пластине отвала пласта почвы (для третьей пластины с шириной 0,039 м, длиной находящегося на пластине отвала пласта почвы 0,618 м и удельным весом почвы 1200 кг/м<sup>3</sup> значение  $k_{\text{п}} = 0,029$  кН/м).

Отсюда

$$G_{\text{п}} = 0,029 \cdot 0,27 = 0,008 \text{ кН}.$$

Исходя из геометрических параметров третьей пластины ( $0,039 \times 0,618 \times 0,008$  мм) и плотности стали 65Г, ее вес равен  $G_{III} = 0,009$  кН. Тогда, по формуле (2.38) сила тяжести  $G$  равна

$$G = 0,008 + 0,009 = 0,017 \text{ кН.}$$

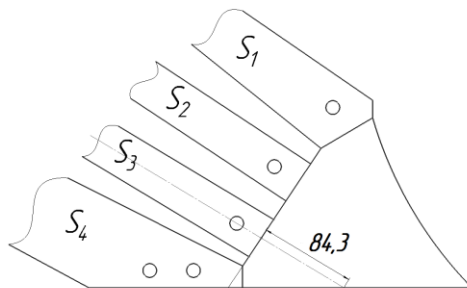


Рис. 2.37. Длина дуги груди отвала относительно третьей пластины

Исходя из расположения третьей пластины отвала относительно его груди  $l_0 = 0,084$  м (рис. 2.37).

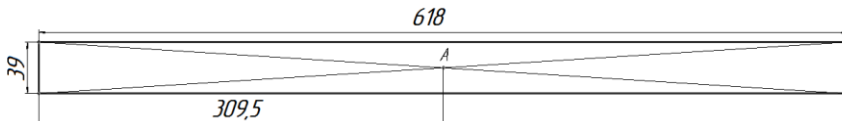


Рис. 2.38. Центр тяжести пластины № 3

Для расчета принимаются следующие исходные данные:

- пластина № 3 имеет форму прямоугольника, соответственно центр тяжести будет находиться в точке  $A$  (рис. 2.38). Принимаем  $X_c = 0,310$  м;

- исходя из [82], принимаем угол установки отвала относительно стенки борозды  $\varepsilon_0 = 50^\circ$ ;

- коэффициент пропорциональности принимаем  $\varepsilon = 0,1$  [46];

- глубину вспашки принимаем  $h = 0,27$  м;

- ширина пластины №3 равна  $b = 0,039$  м (см. рис. 2.38);

- угол трения почвы о металл принимаем  $\beta = 22^\circ$  [5];

- скорость движения корпуса плуга принимаем  $v = 0,5 \dots 2,5$  (шаг 0,5 м/с);

- длину дуги от начала пластины до пружинного элемента принимаем  $l_1 = 0,35 \dots 0,5$  м (шаг 0,05 м).

Создана матрица, которая обработана в среде *MS Excel*. Матрица и результаты вычислений представлены в табл. 2.5.

С помощью программы *Statistica* по полученным данным были построены поверхности отклика, представленные на рис. 2.39.

Обработка экспериментальных данных позволила получить следующее регрессионное уравнение для третьей пластины

$$F_{\text{пр}} = 20,399 + 0,637 v - 47,515 l_1 + 0,209 v^2 - 1,415 v l_1 + 36,926 l_1^2. \quad (2.40)$$

Анализ полученного уравнения регрессии (2.40) показывает, что на усилие сжатия пружины во время работы наибольшее влияние оказывает длина дуги от начала пластины до пружинного элемента, поэтому при разработке параметров пружинных элементов пластин вибрирующего отвала необходимо оперировать именно данным параметром. Аналогичный расчет был произведен для пластины № 4.

Таблица 2.5

Матрица и результаты вычислений для пластины № 3

$v$ , м/с	$l_1$ , м	$F_{\text{пр}}$ , Н	$v$ , м/с	$l_1$ , м	$F_{\text{пр}}$ , Н
2,5	0,35	10,01	1,0	0,35	8,63
2,5	0,40	8,75	1,0	0,40	7,55
2,5	0,45	7,78	1,0	0,45	6,71
2,5	0,50	7,00	1,0	0,50	6,04
2,5	0,55	6,37	1,0	0,55	5,49
2,0	0,35	9,42	0,5	0,35	8,44
2,0	0,4	8,24	0,5	0,40	7,38
2,0	0,45	7,32	0,5	0,45	6,56
2,0	0,50	6,59	0,5	0,5	5,91
2,0	0,55	5,99	0,5	0,55	5,37
1,5	0,35	8,96			
1,5	0,40	7,84			
1,5	0,45	6,97			
1,5	0,50	6,27			
1,5	0,55	5,70			



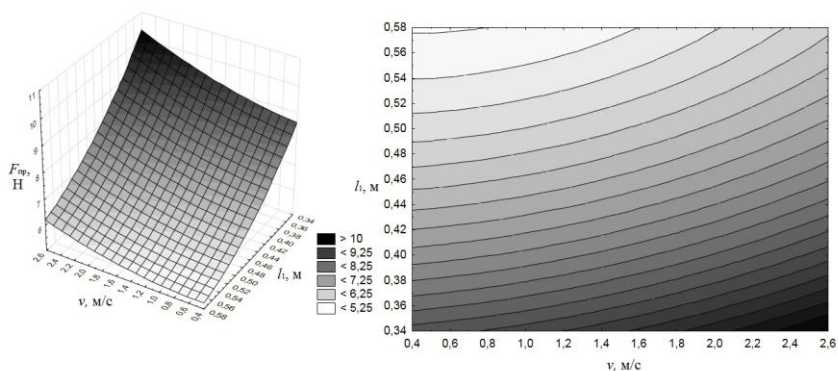


Рис. 2.39. Поверхность отклика и ее двухмерное сечение зависимости усилия пружины  $F_{\text{пр}}$  от скорости движения корпуса плуга  $v$  и длины дуги от начала пластины до пружинного элемента  $l_1$

Исходя из обработки результатов вычислений, принимаем длину дуги для установки пружинного элемента третьей пластины  $l_{1,3} = 0,35$  м при усилии сжатия пружины  $F_{\text{пр}3} = 10$  Н, длина дуги для установки пружинного элемента четвертой пластины  $l_{1,4} = 0,44$  м при усилии сжатия пружины  $F_{\text{пр}4} = 24$  Н.

### **3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ОТВАЛОВ КОРПУСОВ ПЛУГА**

Реализация программы экспериментальных исследований потребовала разработки следующих вопросов: изготовления макетного образца корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом; использование тарировочных приспособлений и тензометрического оборудования; разработки методики планирования и проведения экспериментов, обработки данных.

Экспериментальные исследования проводились на кафедре сельскохозяйственных машин УО «БГАТУ» в лаборатории почвообработки и посева (в почвенном канале), с созданием искусственных условий, приближенных к реальным.

#### **3.1. Проектирование макетного образца вибрационного пластинчатого отвала**

На основе полученных основных параметров корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом была выполнена его компоновка и конструкторская документация, включающая: общий вид корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом (рис. 3.1), схема вибрирующего пластинчатого отвала (рис. 3.2), пластина № 1 (рис. 3.3), пластина № 2 (рис. 3.4), пластина № 3 (рис. 3.5), пластина № 4 (рис. 3.6).

На основе полученных параметров корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом была выполнена его компоновка и конструкторская документация, в соответствии с которой изготовлен макетный образец корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом.

Корпус состоит из лемеха 1, груди отвала 2, пластин отвала 3, упора 4, пружинных элементов 5, башмака 6, полевой доски 7 (рис. 3.7–3.9). При работе, подрезанный лемехом 1 и грудью 2 отвала, пласт почвы поступает на пластины отвала 4, изготовленные из пружинной стали.

При движении пласта по пластинам отвала, благодаря изменяющемуся давлению почвы, пластины многократно отгибаются и возвращаются в первоначальное положение, тем самым создавая вибрацию с определенной частотой и амплитудой.

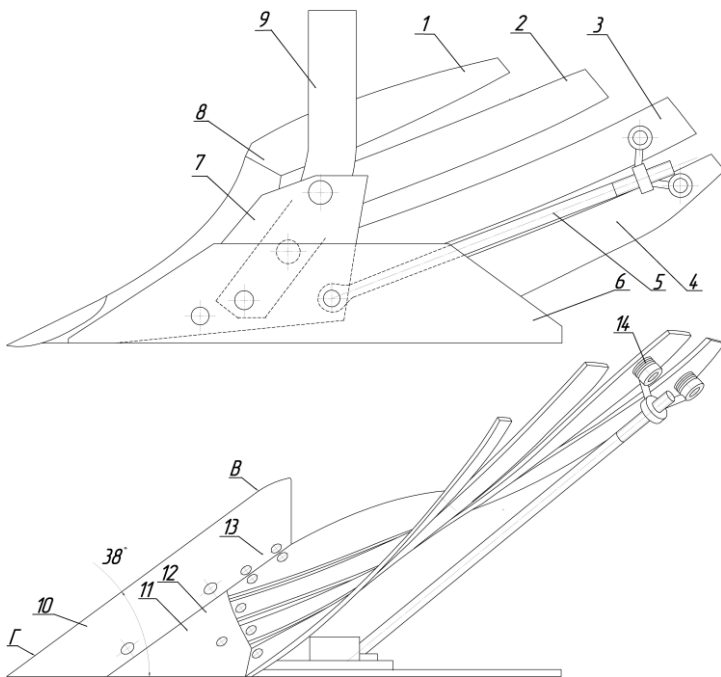


Рис. 3.1. Корпус плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом:  
 1 – пластина № 1; 2 – пластина № 2; 3 – пластина № 3; 4 – пластина № 4;  
 5 – распорка; 6 – полевая доска; 7 – башмак; 8, 12, 13 – соединительные пластины;  
 9 – стойка; 10 – лемех; 11 – грудь отвала; 14 – пружинные элементы

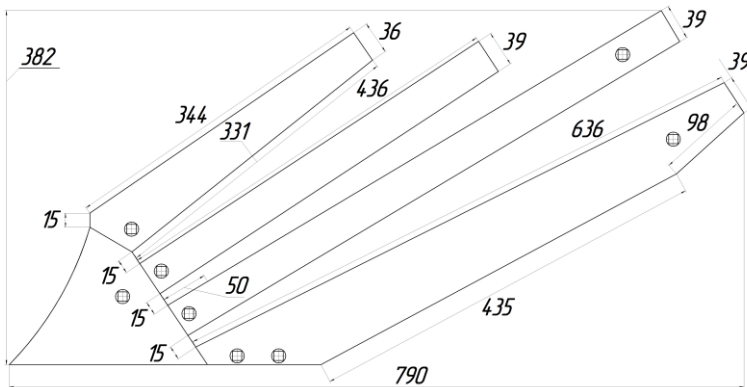


Рис. 3.2. Схема вибрирующего пластинчатого отвала

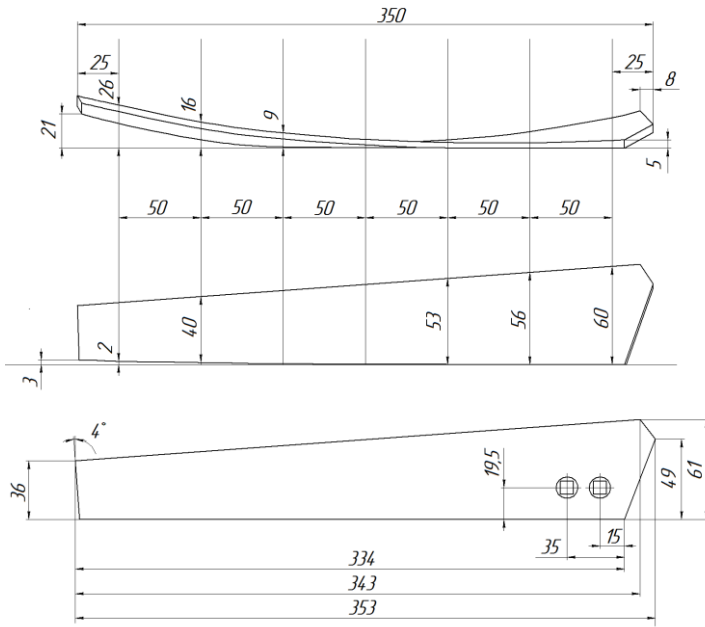


Рис. 3.3. Пластина № 1

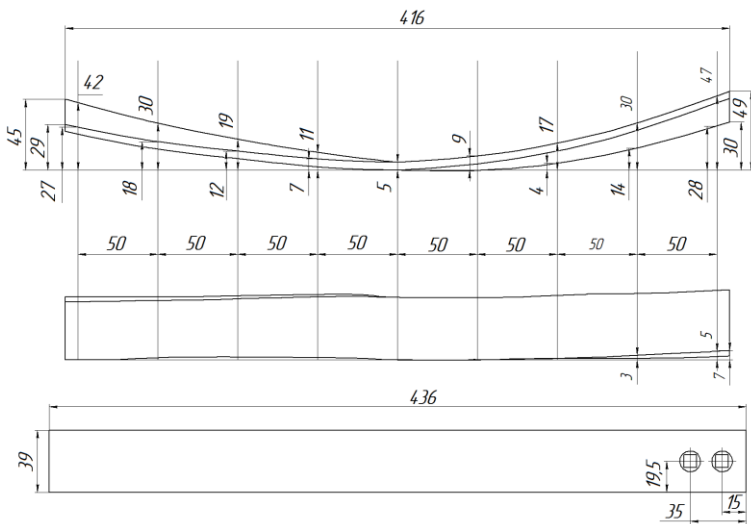


Рис. 3.4. Пластина № 2

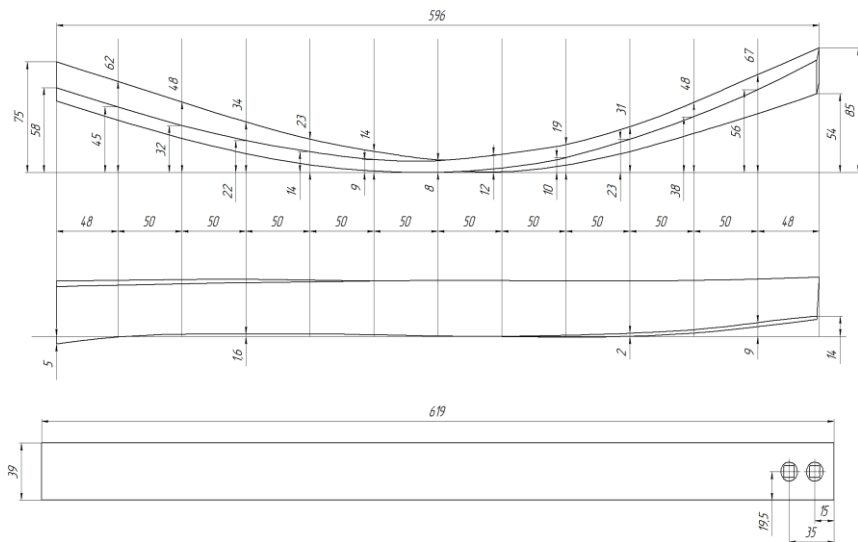


Рис. 3.5. Пластина № 3

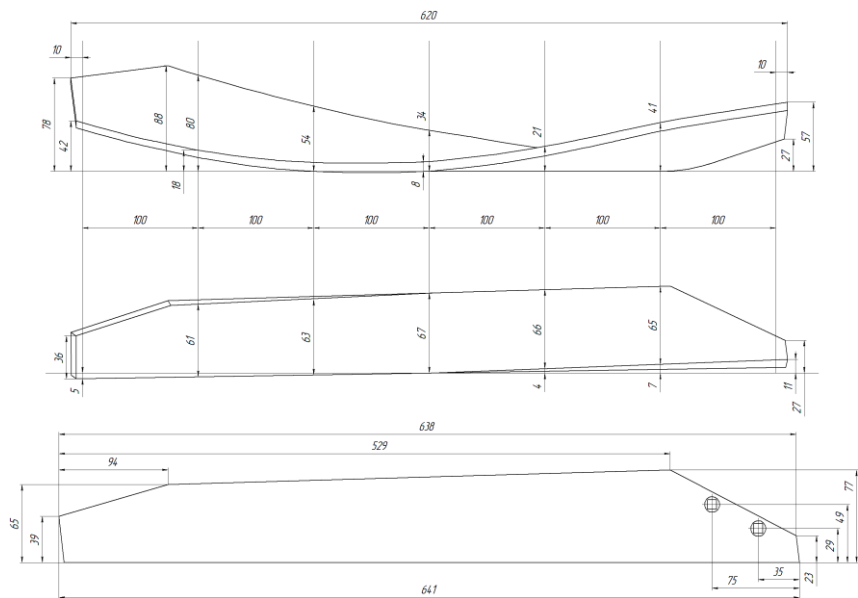
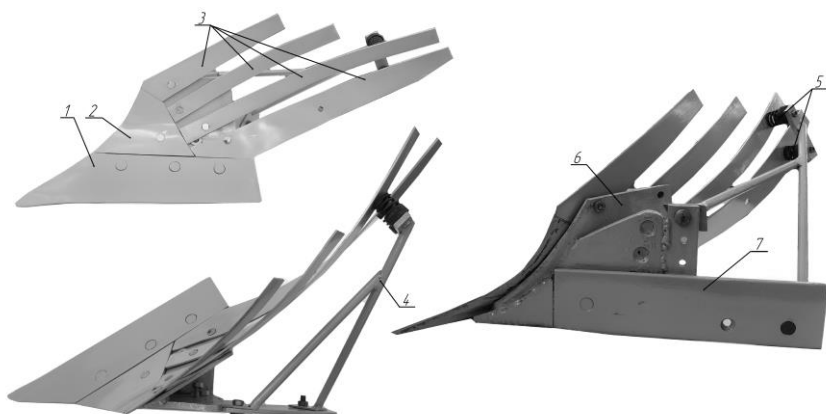
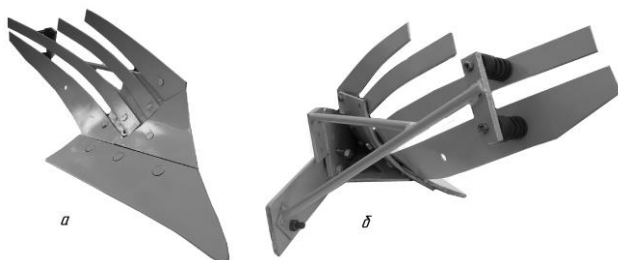


Рис. 3.6. Пластина № 4



*Рис. 3.7.* Конструкция макетного образца корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом:  
 1 – лемех; 2 – грудь отвала; 3 – пластины отвала; 4 – упор; 5 – пружинные элементы; 6 – башмак; 7 – полевая доска



*Рис. 3.8.* Макетный образец корпуса плуга с вибрирующим пластинчатым отвалом:  
 а – вид спереди; б – вид сзади

Вибрационный пластинчатый отвал изготовлен из конструкционной рессорно-пружинной стали 65Г, используемой для изготовления деталей с повышенной износостойкостью (рис. 3.9) [79]. Ограничение отклонения нижних пластин, в силу их большой длины, обеспечивалось компенсирующим механизмом с пружинами сжатия.

В процессе сравнительных экспериментальных исследований определялось тяговое сопротивление корпусов плуга со сплошным,

пластинчатым и вибрационным пластинчатым отвалом (табл. 3.1).  
 Ширина захвата каждого корпуса  $b = 30$  см.

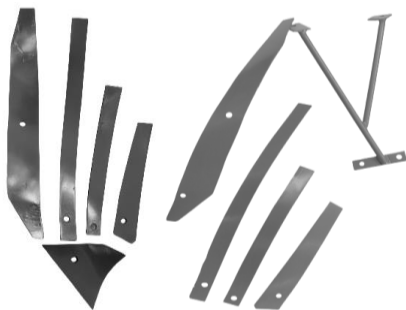


Рис. 3.9. Вибрационный пластинчатый отвал корпуса плуга

Таблица 3.1

Типы исследуемых корпусов плуга

Тип корпуса	Изображение корпуса
Корпус плуга со сплошным отвалом	A photograph of a harrow body with a solid, flat cutting edge. It is a single, wide metal plate that tapers towards the top.
Корпус плуга с пластинчатым отвалом	A photograph of a harrow body with a row of several smaller plates attached to its cutting edge. The body is wider than the solid one.
Корпус плуга с вибрационным пластинчатым отвалом	A photograph of a harrow body with a row of plates and a vibration mechanism. It features a complex arrangement of plates and a central pivot point, suggesting it can vibrate during operation.

### 3.2. Экспериментальные исследования вибрационных характеристик пластин корпуса плуга

Вибрационными характеристиками пластин отвала корпуса плуга являются виброскорость  $V$  и виброускорение  $A$ , измерение которых происходило во время сравнительных испытаний тягового сопротивления корпусов плуга. Факторами, влияющими на виброскорость  $V$  и виброускорение  $A$  пластин отвала, приняты: глубина обработки  $h$ , скорость движения плуга  $v$ . Для сокращения количества опытов применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов. Результаты измерения виброскорости  $V$  и виброускорения  $A$  с факторами в натуральном виде представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений вибрационных характеристик пластин отвала корпуса плуга в зависимости

$h$ , м	$v$ , м/с	$V$ , мм/с	$A$ , мм/с <sup>2</sup>
0,3	0,8	0,7448	0,0942
0,3	0,6	0,1922	0,0370
0,3	0,4	0,0608	0,0330
0,23	0,8	0,6077	0,0516
0,23	0,6	0,1421	0,0340
0,23	0,4	0,0462	0,0310
0,15	0,8	0,4849	0,0383
0,15	0,6	0,1021	0,0300
0,15	0,4	0,0340	0,0250

В итоге регрессионные уравнения второго порядка для параметров оптимизации корпуса с вибрационным пластинчатым отвалом принимают следующий вид:

виброскорость

$$y_V = 0,1425 + 0,0628 x_1 + 0,2827 x_2 + 0,0583 x_1 x_2 + 0,0045 x_1^2 + 0,1843 x_2^2. \quad (3.1)$$

виброускорение

$$y_A = 0,031 + 0,0118 x_1 + 0,0159 x_2 + 0,012 x_1 \cdot x_2 + 0,004 x_1^2 + 0,0118 x_2^2. \quad (3.2)$$



Для использования уравнений (3.1), (3.2) в инженерных расчетах они представлены в раскодированном виде, заменой кодового значения факторов  $x_1$  и  $x_2$  на натуральные переменные:

виброскорость

$$V = 1,3653 - 2,1829 h - 4,9926 v + 3,8749 h v + 1,5452 h^2 + 4,6067 v^2. \quad (3.3)$$

виброускорение

$$A = 0,2043 - 0,7021 h - 0,4541 v + 0,7848 h v + 0,8639 h^2 + 0,2963 v^2. \quad (3.4)$$

Поверхности отклика и их двумерные сечения, построенные по уравнениям регрессии, представлены на рис. 3.10.

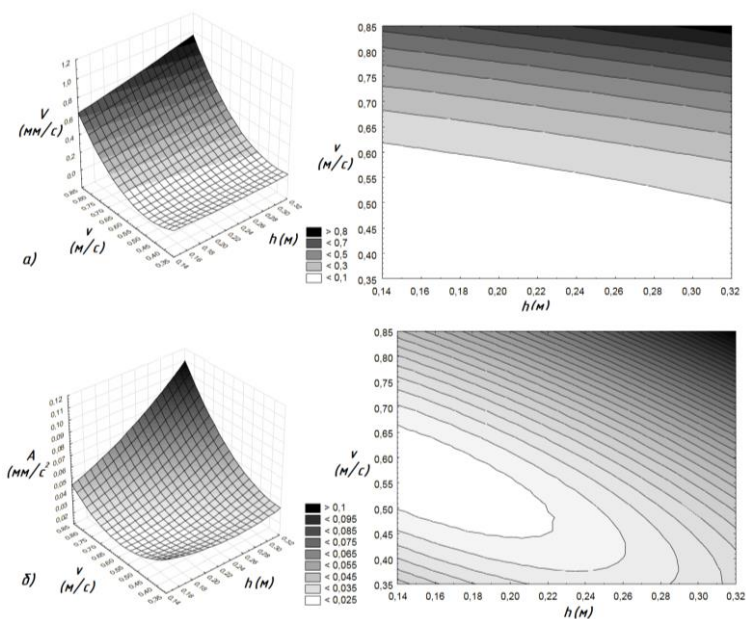


Рис. 3.10. Поверхности отклика и их двумерные сечения

$$A = f(v, h), V = f(v, h):$$

- а – поверхность отклика и двумерное сечение виброскорости;
- б – поверхность отклика и двумерное сечение виброускорения

### 3.3. Сравнительный анализ тягового сопротивления различных типов корпусов плуга

Факторами, влияющими на тяговое сопротивление  $F$ , приняты глубина обработки  $h$ , скорость движения плуга  $v$ . Для сокращения количества опытов применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов.

В итоге регрессионные уравнения второго порядка для параметра оптимизации каждого корпуса принимают следующий вид:

для корпуса плуга со сплошным отвалом:

$$y = 3,419 + 0,5574 x_1 + 0,1690 x_2 + 0,0673 x_1 \cdot x_2 - 0,2182 x_1^2 + 0,0653 x_2^2; \quad (3.5)$$

для корпуса плуга с пластинчатым отвалом:

$$y = 2,8625 + 0,7055 x_1 + 0,3377 x_2 - 0,0848 x_1 x_2 + 0,0409 x_1^2 + 0,0426 x_2^2; \quad (3.6)$$

для корпуса плуга с вибрационным пластинчатым отвалом:

$$y = 2,6981 + 0,5177 x_1 + 0,1838 x_2 + 0,0264 x_1 x_2 + 0,1190 x_1^2 + 0,0407 x_2^2. \quad (3.7)$$

Для использования уравнений (3.5)–(3.7) в инженерных расчетах запишем их в раскодированном виде, заменив кодовое значение факторов  $x_1$  и  $x_2$  на натуральные переменные:

для корпуса плуга со сплошным отвалом:

$$y = 0,7665 + 19,2798 h - 2,134 v + 4,4956 h v - 32,3228 h^2 + 1,6333 v^2. \quad (3.8)$$

для корпуса плуга с пластинчатым отвалом:

$$y = 0,0751 + 5,8184 h + 1,7255 v - 5,8023 h v + 15,7103 h^2 + 1,0653 v^2. \quad (3.9)$$

для корпуса плуга с вибрационным пластинчатым отвалом:

$$y = 2,4617 - 6,5335 h - 0,7167 v + 1,8333 h v + 27,4127 h^2 + 1,0167 v^2. \quad (3.10)$$

Поверхности отклика и их двумерные сечения, построенные по уравнениям регрессии, представлены на рис. 3.11 и 3.12.

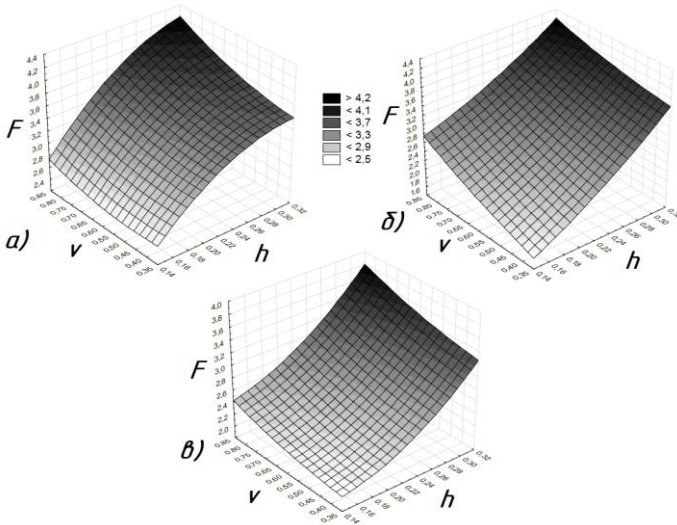


Рис. 3.11. Поверхности отклика  $F = f(v, h)$ :  
 а – корпус плуга со сплошным отвалом;  
 б – корпус плуга с пластинчатым отвалом,  
 в – корпус плуга с вибрационным пластинчатым отвалом

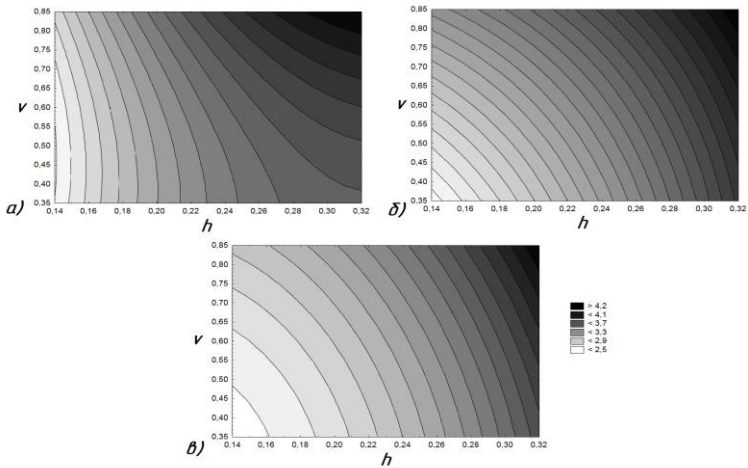


Рис. 3.12. Двумерные сечения поверхностей отклика  $F = f(v, h)$ :  
 а – корпус плуга со сплошным отвалом;  
 б – корпус плуга с пластинчатым отвалом;  
 в – корпус плуга с вибрационным пластинчатым отвалом

### 3.4. Предложения для проектирования вибрационных пластинчатых отвалов корпусов плуга

Анализ полученных данных показал:

- при скорости вспашки 0,4 м/с с увеличением глубины от 0,15 до 0,30 м тяговое сопротивление возрастает: у сплошного отвала с 2,589 до 3,628 кН, у пластинчатого с 1,742 до 3,396 кН, у вибрационного пластинчатого с 2,085 до 3,098 кН. Тяговое сопротивление вибрационного пластинчатого отвала снижается по сравнению со сплошным от 17,1 до 24,2 %;

- при скорости вспашки 0,8 м/с с увеличением глубины от 0,15 до 0,3 м тяговое сопротивление возрастает: у сплошного отвала с 2,787 до 4,094 кН, у пластинчатого с 2,659 до 3,974 кН, у вибрационного пластинчатого – с 2,366 до 3,484 кН. Тяговое сопротивление вибрационного пластинчатого отвала снижается по сравнению: с пластинчатым от 12,4 до 14,1 %, со сплошным от 17,5 до 17,8 %;

- при глубине вспашки 0,15 м с увеличением скорости вспашки от 0,4 до 0,8 м/с тяговое сопротивление возрастает: у сплошного отвала с 2,589 до 2,787 кН, у пластинчатого с 1,742 до 2,659 кН, у вибрационного пластинчатого с 2,085 до 2,366 кН. Тяговое сопротивление вибрационного пластинчатого отвала снижается по сравнению: со сплошным от 17,8 до 24,2 %, с пластинчатым в среднем на 11 %;

- при глубине вспашки 0,3 м с увеличением скорости вспашки от 0,4 до 0,8 м/с тяговое сопротивление возрастает: у сплошного отвала с 3,628 до 4,094 кН, у пластинчатого с 3,396 до 3,974 кН, у вибрационного пластинчатого с 3,098 до 3,484 кН. Тяговое сопротивление вибрационного пластинчатого отвала снижается по сравнению: с сплошным от 17,1 % до 17,5 %, с пластинчатым от 9,6 до 14,1 %;

- при глубине вспашки 0,3 м и увеличением скорости вспашки от 0,4 до 0,8 м/с возрастает виброскорость пластин отвала с 0,0608 до 0,7448 мм/с и виброускорение с 0,033 до 0,0942 мм/с<sup>2</sup>.

Анализ полученных данных подтверждает снижение тягового сопротивления при использовании вибрационного пластинчатого отвала по сравнению со сплошным на 19,2 % и пластинчатым на 9 %, а соответственно в среднем на 14,1 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов по видам топлива и энергии [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: [https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-excel/Oficial\\_statistika/Godovwe/Konechenoe\\_potrebl\\_TER\\_po\\_vidam\\_topлива19.xlsx](https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-excel/Oficial_statistika/Godovwe/Konechenoe_potrebl_TER_po_vidam_topлива19.xlsx) – Дата доступа: 10.11.2023.

2. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов в секторе сельского, лесного и рыбного хозяйства [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: [https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-excel/Oficial\\_statistika/Godovwe/Konechenoe\\_potrebl\\_TER\\_v\\_sektor\\_selskoe-19.xlsx](https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-excel/Oficial_statistika/Godovwe/Konechenoe_potrebl_TER_v_sektor_selskoe-19.xlsx) – Дата доступа: 10.11.2023.

3. График изменения цен на топливо [Электронный ресурс] // ПО «Белоруснефть». – Режим доступа: [https://azs.belorusneft.by/sitebeloil/ru/center/azs/center/fueland\\_Service/price/](https://azs.belorusneft.by/sitebeloil/ru/center/azs/center/fueland_Service/price/) – Дата доступа: 10.11.2023.

4. Соловейчик, А. Г. К рациональному агрегатированию тракторов МТЗ-80 и МТЗ-82 в Нечерноземной зоне // А. Г. Соловейчик, Г. Д. Сущевская/ Повышение рабочих скоростей МТА. – М. : Колос, 1976. – С. 180–188.

5. Горячкин, В. П. Рациональная формула силы тяги плугов конных и тракторных. //собр. соч. : в 3 т. / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 2. – 720 с.

6. Сельскохозяйственные машины : учебник / Э. В. Заяц. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 451 с.

7. Халанский, В. М. Экскурсия за плугом. – М.: Колос, 1974. – 207, с.

8. Kramer, K. Tendenzen der Pflügenentwicklung // Preaktische Landtechnik. 1981. – v.34. – № 7. – P. 204–207.

9. Протокол № 026 Б 3/2-2020ИЦ (от 24 июля 2020 г.) квалификационных испытаний плуга оборотного навесного ППОВ-12-40/50К. / Бел.МИС, пос. Привольный, 2020.

10. Протокол № 078 Д 9/2-2019ИЦ (от 28 октября 2019 г.) испытаний импортного образца плуга полунавесного оборотного СПЕМ.9/140 NS-2М / БелМИС, пос. Привольный, 2019.

11. Протокол № 034 Д 2/2-2018ИЦ (от 21 февраля 2018 г.) периодических испытаний плуга полунавесного оборотного ПО-(4+1)-40К / БелМИС, пос. Привольный, 2018.

12. Протокол № 093 Б 1/2-2016ИЦ (от 27 декабря 2016 г.) приемочных испытаний опытного плуга 12 корпусного оборотного ПО-(8+4)-40 / БелМИС, пос. Привольный, 2016.

13. Протокол № 031Д 2/2-2015ИЦ (от 13 июля 2015 г.) периодических испытаний плуга восьмикорпусного навесного усиленного ПН-8-35У / БелМИС, пос. Привольный, 2015.

14. Протокол № 031 Д 1/2-2007 (от 7 марта 2007 г.) приемочных испытаний опытного образца плуга четырехкорпусного навесного оборотного ПНО-4-40К / БелМИС, пос. Привольный, 2007.

15. Каталог продукции «Amazone» [Электрон. ресурс] // Amazonen-Werke-Режим доступа: <https://amazone.net/ru/> продукция-и-цифровые решения/сельскохозяйств. техника/обработка почвы/плуги – Дата доступа: 10.11.2023.

16. Каталог продукции «Kverneland» [Электронный ресурс] // Kverneland Group – Режим доступа: <https://ru.kverneland.com/Kverneland-brand-Russia/Plugi>. – Дата доступа: 10.11.2023.

17. Каталог продукции «Kuhn» [Электронный ресурс] // KUHN Group - Режим доступа: <https://www.kuhn.ru/rastenievodstvo/pochvoobrabotka/plugi/oborotnye-navesnye-plugi> – Дата доступа: 10.11.2023.

18. Каталог продукции Overum [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kongskilde.com/sv/ru-RU/Agriculture/Discontinued/Soil/Ploughing>. – Дата доступа: 10.11.2023.

19. Клочков, А. В. Новшества в конкуренциях агрегатов на «Беллагро 2021» / А. В. Клочков, О. В. Гордиенко //Наше сельское хозяйство. – № 13. – 2021. – С. 30–35.

20. Каталог продукции. ОАО «Минойтовский ремзавод» [Электронный ресурс] // ОАО «Минойтовский ремзавод». – Режим доступа: <http://mrz.by/catalog/products-catalog/plugi-oborotnye.html> – Дата доступа: 10.11.2023.

21. Каталог продукции. ЧУП «Витстройтехмаш» [Электронный ресурс] // Официальный сайт ЧУП «Витстройтехмаш». – Режим доступа: <http://agrviro.com/> Дата доступа: 10.11.2023.

22. Бредун, М. И. Изыскание методов борьбы с залипанием рабочих органов почвообрабатывающих машин : автореф. ... дис. канд. техн. наук / М. И. Бредун. – Киев, 1964. – 26 с.

23. Крылов, М. М. Применение вибраций для уменьшения тяговых усилий плугов при мелиорации подпахотного слоя : доклады // ВАСХНИЛ / М. М. Крылов. – 1998. – Вып. 1–2. – С. 32.

24. Цветников, В. И. Исследование влияния вынужденной вибрации плуга на расход мощности при вспашке : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Цветников. – Л., 1953. – 210 с.

25. Рябцев, Г. О. Дослідження роботи плуга з пружною підвіскою корпусів / Г. О. Рябцев // Вісник сільськогосподарської науки. – 1975. – № 5. – С. 16–20.

26. Клюев, А. И. Энергетика корпуса плуга при упругом креплении его к раме / А. И. Клюев, А. И. Нидзиев // Сборник научных трудов ВСХИ. – Волгоград, 1979. – Т. 69. – С. 32–38.

27. Зоненберг, Р. М. Исследование влияния вибрации на тяговое сопротивление рабочих органов, взаимодействующих с почвой: дисс. ... канд. техн. наук / Р. М. Зоненберг. – Киев, 1965. – 245 с.

28. Дубровский, А. А. Вибрационная техника в сельском хозяйстве / А. А. Дубровский. – М. : Машиностроение, 1968. – 204 с.

29. Каталог продукции «Badalini» [Электронный ресурс] // Machine Agricole BADALINI. – Режим доступа: <https://www.badalini.it/machine-agricole/#ripuntatori> – Дата доступа: 10.11.2023.

30. Каталог продукции «Юагромаш» [Электронный ресурс] // ООО Южно-Российский Технический Центр сельскохозяйственного машиностроения (Россия, Краснодарский край) – Режим доступа: [https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery\\_63306290823\\_1093750](https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_63306290823_1093750) – Дата доступа: 10.11.2023.

31. Каталог продукции «Sugano» [Электронный ресурс] // Sugano Farm Machinery MFG.CO.,LTD. Overseas Division (Japan) – Режим доступа: <https://www.sugano-net.co.jp/en/products/plowsoiler.html> – Дата доступа: 10.11.2023.

32. Бабицкий, Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин / Л. Ф. Бабицкий. – Киев : Урожай, 1998. – 164 с.

33. Кушнарев, А. С. Методологические предпосылки выбора способа обработки почвы / А. С. Кушнарев, В. В. Погорелый // Техника в АПК. – 2008. – № 1. – С. 17–21.

34. Базаров, В. П. Обоснование параметров нелинейных упругих подвесок рабочих органов культиваторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В. П. Базаров. – М. : 1985. – 18 с.

35. Медетов, Ш. С. Разработка методики проектирования и обоснование параметров пластинчатого отвала плужного корпуса для липких почв: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ш. С. Медетов; Науч.-произв. об-ние по с.-х. машиностроению. – М., 1990. – 24 с.

36. Клочков, А. В. Обоснование параметров пластинчатого отвала / А. В. Клочков, И. В. Дубень // Агропанорама. – 2002. – № 3. – С. 25–28.

37. Муродов, Н. М. Тяговое сопротивление корпусов двухъярусного плуга / Н. М. Муродов // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 34–36.

38. Клочков, А. В. Устройство сельскохозяйственных машин: учеб. пособие / А. В. Клочков, П. М. Новицкий. – Минск : РИПО, 2016. – 431 с.

39. Полосовой отвал плуга : пат. 2426290 Российская Федерация : МПК А01В 15/08 / В. В. Василенко, С. В. Василенко, Д. В. Стуров, Г. А. Халфин, А. И. Сергиенко ; заявитель ФГОУ ВПО ВГАУ им. К. Д. Глинки. – № 2010112577/21 ; заявл. 31.03.2010 ; опубл. 20.08.2011 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2011. – № 23. – С. 5.

40. Вибрационный плуг : полезная модель 106663 Украина : МПК А01В11/00, А01В13/00 / Л. А. Дяченко, В. С. Ловейкин ; заявитель Л. А. Дяченко. - № а201314867 ; заявл. 18.12.2013 ; опубл. 25.03.2015 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2015. – № 6. – С. 2.

41. Вибрационный плужный корпус : полезная модель 18775 Украина : МПК А01В63/11/ В. С. Ловейкин, В. Ф. Ярошенко : заявитель Национальный аграрный университет. - № u200606092 ; заявл. 01.06.2006; опубл. 15.11.2006 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2006. – № 11. – С. 2.

42. Почвообрабатывающее орудие : пат. 2369057 Российская Федерация : МПК А01В11/00/ Е. И. Трубилин, А. И. Трубилин, С. М. Сидоренко ; заявитель ФГОУ ВПО «Кубанский государственный



аграрный университет». – № 2008117744/12 ; заявл. 04.05.2008 ; опубл. 10.10.2009 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2009. - № 28. – С. 5.

43. Усовершенствованный плуг : пат. 2635931 Российская Федерация : МПК А01В 11/00/ Д. Пьерализи ; заявитель АЙРИС СОЧИ-ЕТА'А РЕСПОНСАБИЛИТА' ЛАМИТАТА. - № 2015115488; заявл. 26.09.2013; опубл. 17.11.2017 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2017. – № 32. – С. 19.

44. Вибрационный корпус плуга : полезная модель 19528 Украина : МПК А01В63/111/ В. С. Ловейкин, Л. А. Биченко; заявитель Національний аграрний університет. – № u200607384; заявл. 03.07.2006; опубл. 15.12.2006 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2006. – № 12. – С. 2.

45. Плуг с вибрацией рабочих органов : пат. 117287 Украина : МПК А01В11/00, А01В3/24/ О. М. Шийко, М. О. Дорофеев, М. Я. Довжик; заявители О. М. Шийко, М. О. Дорофеев, М. Я. Довжик. – № a201610433; заявл. 13.10.2016; опубл. 10.11.2017 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2017. – № 21. – С. 4.

46. Вибрационный плуг: пат. 117495 Украина : МПК А01В11/00, А01В35/32/ О. К. Серета; заявитель О. К. Серета. – № a201602556; заявл. 16.03.2016; опубл. 12.12.2016 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2016. - № 23. – С. 4.

47. Vibratory plow: пат. 7546883 Соединенные Штаты Америки : МПК А01В35/00/ David Doering, Thomas Campbell; заявитель Astec Industries Inc. - № 11/433854; заявл. 15.05.2006; опубл. 16.06.2009 // Официальный бюллетень / U.S. PATENT DOCUMENTS. – 2009.– № 172/40. – С. 14.

48. . Плуг с вибрационной подвеской: полезная модель 31573 Украина : МПК А01В17/00/ .С. Ловейкин, О. С. Криворучко; заявитель Національний аграрний університет. – № u200714675; заявл. 25.12.2007; опубл. 10.04.2008 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2008. – № 7. – С. 2.

49. Ловейкин, В. С. Методика экспериментального исследования параметров виброплуга с гидравлическими вибраторами / В. С. Ловейкин, Л. А. Дяченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2012. – № 57. – С. 161–165.
50. Коган, А. Б. Исследование плуга с вибрирующими долотами / А. Б. Коган, А. П. Швейкин // Состояние и перспективы развития почвообрабатывающих машин, фрез и культиваторов : материалы НТС ВИСХОМ. – М., 1968. – Вып. 25. – С. 157–161.
51. Дубровский, А. А. Основные принципы применения вибраций для повышения эффективности почвообрабатывающих орудий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.410 / А. А. Дубровский. – Ленинград, 1963. – 55 с.
52. Влияние вибрации на угол трения почвы по рабочему органу / В. В. Василенко, Д. Н. Афоничев, С. В. Василенко, Д. В. Стуров // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3(11). – С. 123–126.
53. Дроздов, С. Н. Использование вибрации в почвообрабатывающих машинах / С. Н. Дроздов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4 (32). – С. 94–96.
54. Беляев, Н. М. Технологии разуплотнения почвы / Н. М. Беляев, Д. С. Буклагин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 11 – С. 6–8.
55. Андреева, Е. В. Исследование процесса обработки почвы вибрационным рыхлителем. Шукин С. Г., Нагайка М. А., Головатюк В. А. // Сиб. вестн. с.-х. науки.-2015.-N 3.-С. 83-89.-Рез. англ.-библиогр.: с .88–89. Шифр П2728 / Е. В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2016. – № 3. – С. 740.
56. Твердохлебов, С. Обоснование рациональности использования вибрационного орудия для обработки почвы / С. Твердохлебов, О. Аветисян, С. Дуков // Современный научный вестник. – 2016. – Т. 10. – № 1. – С. 132–142.
57. Федоренко, И. Я. Теория взаимодействия вибрационных рабочих органов с почвой / И. Я. Федоренко // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 3. – С. 15–19.
58. Федоренко, И. Я. Механизм трения вибрационных рабочих органов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1986. – № 6. – С. 14–16.

59. Spravochnik inzhenera-mekhanika sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva [Handbook for mechanical engineer in agricultural production]. Under the editorship of V.V. Nungezer, V.F. Fedorenko. P.I. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2011. – 372 p.

60. Корпус плуга: пат. RU 173221 / В. И. Коновалов, С. И. Коновалов, О. А. Стерлигов. – Оpubл. 16.08.2017.

61. A kind of small-sized subsoiler self-excited vibration device : пат. 108353540 Китайская Народная Республика : МПК А01В13/08/ Yang Mingjin, Li Shou Tai, Chen Tonghao, Yang Ling, Xie Shouyong: заявитель Southwest University. – № 201810151899.5А; заявл. 08.02.2018; опубл. 03.08.2018 // Официальный бюллетень / China National Intellectual Property Administration. – 2018. – № 12. – С. 7.

62. Колебательный корпус плуга : пат. 2667768 Российская Федерация : МПК А01В 11/00/ С. С. Калаев, К. К. Дмитриев, К. М. Агубеевич; заявитель ФГОУ ВПО «Горский государственный аграрный университет» – № 2017137449; заявл 25.10.2017; опубл. 24.09.2018 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2018. – № 27. – С. 4.

63. Корпус плуга для каменистых почв: пат. 2380874 Российская Федерация : МПК А01В 15/00/ А. Б. Кудзаев, А. Э. Цгоев, И. А. Коробейчик, Т. А. Уроаев; заявитель ФГОУ ВПО «Горский государственный аграрный университет» – № 2008138334/12; заявл. 25.09.2008; опубл. 10.02.2010 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010. – № 4. – С. 5.

64. Корпус плуга: полезная модель 144741 Российская Федерация : МПК А01В 15/00/ В. В. Василенко, А. И. Сергиенко, Г. А. Халфин; заявители В. В. Василенко, А. И. Сергиенко, Г. А. Халфин. – № 2014115109/13; заявл. 15.04.2014; опубл. 27.08.2014 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2014. – № 24. – С. 14.

65. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия: пат. 2115278 Российская Федерация : МПК А01В 15/02/ Э. Яковлевич, А. Ф. Лосев; заявители Э. Яковлевич, А. Ф. Лосев – № 97112839/13; заявл. 29.07.1997; опубл. 20.07.1998 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1998. – № 24. – С. 7.

66. Почвообрабатывающее орудие: пат. 2327324 Российская Федерация : МПК А01В 35/06/ А. Д. Кормщиков, А. Ю. Шагин, Р. Ф. Курбанов, С. С. Храмцов; заявитель ФГОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» – № 2006137912/12; заявл. 26.10.2006; опубл. 27.06.2008 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2008. – № 18. – С. 7.

67. Плуг: пат. 656563 СССР : МПК А01В 35/06/ И. Г. Львутин, А. М. Комисарчук, П. М. Гильштейн, О. М. Мацепуро; заявитель Центральный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Нечерноземной зоны СССР – № 2113563; заявл. 14.03.1975; опубл. 15.04.1979// Официальный бюллетень Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий. –1979. – № 14. – С. 3.

68. Навесной вибрирующий плуг: пат. 2478270 Российская Федерация : МПК А01В 11/00/ В. В. Василенко, С. В. Василенко, А. А. Мухин; заявитель ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ – № 2011141674/13; заявл. 13.10.2011; опубл. 10.04.2013 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2013. – № 10. – С. 6.

69. Вибрирующий плуг: пат. 108167 Украина : МПК А01В11/00/ О. М. Шийко, М. Я. Довжик, А. В. Саенко; заявитель Сумський національний аграрний університет. – № u201512085; заявл. 07.12.2015; опубл. 11.07.2016 // Официальный бюллетень / Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2016. – № 13. – С. 5.

70. Устройство для рыхления мерзлых и прочих грунтов: пат. RU 977618 / Баловнев В. И., Храма Л. А., Шатов С. В., Потураев С. В., Алексеенко А. В., Яновский В. И., Захаров В. И., Фролов А. А., Сушко А. А. – Опубл. 30.11.1982.

71. Бабицкий, Л. Ф. Экспериментальные исследования и эффективность использования виброударных почвообрабатывающих рабочих органов / Л. Ф. Бабицкий, В. В. Шевченко, В. Ю. Москалевич // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6 (74). – С. 93–96.

72. Полосовой отвал плуга: пат. 2426290 Российская Федерация : МПК А01В 15/08/ В. В. Василенко, В. С. Василенко, Д. В. Стуров, Г. А. Халфин, А. И. Сергиенко; заявитель ФГОУ ВПО ВГАУ

им. К. Д. Глинки – № 2010112577/21; заявл. 31.03.2010; опубл. 20.08.2011 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010. – № 23. – С. 5.

73. Полосовой отвал плуга: пат. 18090 Республика Беларусь : МПК А01В 15/08/ И. Н. Шило, Н. Н. Романюк, В. А. Агейчик; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» – № а20111236; заявл. 23.09.2011; опубл. 30.04.2013 // Официальный бюллетень / Национальный центр интеллектуальной собственности. – 2013. – № 23. – С. 3.

74. Машины и оборудование в растениеводстве. Курсовое проектирование : учеб.-метод. пособие/ В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2020. – 204 с.

75. Ревут, И. Б. Физика почв. / И. Б. Ревут. – Д. : Колос, 1972. – 368 с.

76. Бернштейн, С. А. Сопротивление материалов. – С. А. Берштейн. – М. : Высшая школа, 1961.

77. Руководство по эксплуатации В 31.SPIDER8.40. Усилитель мобильный измерительный «Spider 8».

78. Измерение тягового сопротивления с помощью мобильного измерительного усилителя «Spider 8» / Д. А. Яновский [и др.] // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 октября, 2019 г. : в 2 ч. – Минск : БГАТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 253–255.

79. Справочник металлиста : в 5 т. ; под ред. С. А. Чернавского и В. Ф. Решикова. – Изд. 3-е, перераб. – М. : Машиностроение, 1976. – Т. 1. – 768 с.

80. Диментберг, Ф. М. Вибрации в технике и человек / Ф. М. Диментберг, К. В. Фролов. – М. : Знание, 1987. – 160 с.

81. Нестерович, Э. О. Разработка и обоснование параметров рабочих органов картофелеуборочной машины : автореф. ... дис. канд. техн. наук / Э. О. Нестерович. – Рязань, 2018. – 20 с.

82. Обоснование параметров отвально-лемешной поверхности корпуса плуга с пластинчатым вибрационным отвалом. Этап 2021 года : отчет о НИР (промежуточный) / БГАТУ ; рук. В. П. Чеботарев. – Минск, 2021. – 42 с. – № ГР 20212684.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Научное издание

**Чеботарев** Валерий Петрович,  
**Яновский** Денис Александрович,  
**Бондаренко** Дмитрий Николаевич и др.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСОВ ПЛУГА  
С ВИБРАЦИОННЫМИ ПЛАСТИНЧАТЫМИ ОТВАЛАМИ.  
РЕКОМЕНДАЦИИ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Корректор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Д. А. Яновского, Д. О. Михеевой*  
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 28.12.2023. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 4,72. Тираж 50 экз. Заказ 724.

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, 99–1, 220012, Минск.