

**В.А. Шейченко**, д. т. н, старший научный сотрудник, Полтавская государственная аграрная академия, e-mail: vsheychenko@mail.ru,  
тел.: 0503839532,

**Г.А. Хайлис**, д.т.н., профессор, Уманский национальный университет садоводства,

**В.В. Шевчук**, к.т.н., Уманский национальный университет садоводства,

**И.А. Дудников**, к.т.н., профессор, Полтавская государственная аграрная академия

**А.С. Пушка**, к.т.н., Уманский национальный университет садоводства

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИГОЛЬЧАТОЙ БОРОНЫ**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Глава 1. ....	6
1.1. Почва как объект механической обработки .....	9
1.2. Анализ технологических и конструктивных особенностей ротационных рабочих органов для поверхностной обработки почвы и их классификация	11
1.3. Ротационные рабочие органы для крошения (рыхления) почвы .....	15
1.4. Ротационные рабочие органы для уплотнения(прикатывания) почвы	19
1.5. Обзор исследований технологических свойств почвы и безприводных ротационных рабочих органов .....	27
1.6. Постановка вопроса, цели и задачи исследований .....	34
Глава 2. Теоретическое исследование работы игольчатых борон .....	35
2.1. Описание разработанных игольчатых борон .....	35
2.2. Исследование движения игольчатой бороны по почве.....	40
2.3. Влияние размещения дисков игольчатой бороны на их давление на почву .....	49
2.4. Взаимодействие игл игольчатой бороны при работе в почве .....	53
2.5. Определение усилия, необходимого для заглубления в почву иглы игольчатой бороны .....	66
2.6. Определение работы, затрачиваемой на прокалывание почвы иглами игольчатой бороны.....	80
Глава 3. Экспериментальные исследования .....	87
3.1. Общие положения .....	87
3.2. Исследования твердости почвы .....	89
3.3. Исследований по определению коэффициента, характеризующего твердость почвы.....	102
3.4. Определение тягового сопротивления экспериментальной секции игольчатой бороны .....	107

3.5. Исследования по определению показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы экспериментальной секцией игольчатой бороны .....	121
Глава 4. Экономическая эффективность использования игольчатой бороны в технологических процессах обработки почвы .....	125
4.1. Исходные данные для расчета .....	125
4.2. Результаты расчетов.....	127
Общие выводы.....	129
Список использованных источников .....	131
Приложения .....	146

## ВВЕДЕНИЕ

Существенным резервом повышения эффективности использования земельных ресурсов, увеличения урожайности сельскохозяйственных культур являются сокращение сроков и значительное улучшение качества выполнения технологических операций обработки почвы. Известные орудия с игольчатыми рабочими органами предназначены для ранневесеннего, предпосевного и послеуборочного поверхностного рыхления стерневого фона в зонах с почвами, которые предрасположены к ветровой эрозии, малопродуктивны, а повышение скорости их движения приводит к резкому снижению показателей качества. В настоящее время природно-климатические условия характеризуются образованием на почвах, склонных к ветровой эрозии, плотной корки. Она усложняет появление всходов, растрескиваясь, повреждает тонкую корневую систему культурных растений, увеличивает выпаривание влаги, что приводит к резкому снижению урожайности. Существующие игольчатые бороны не используются в операциях довсходового и после всходового боронования посевов зерновых культур, так как их рабочие органы не приспособлены к условиям работы на небольшой глубине.

Поэтому исследования, направленные на улучшение качественных и энергетических показателей технологических процессов обработки почвы игольчатыми боронами, угол заострения которых может изменяться, особенно при условии их использования для мелкого поверхностного рыхления почв в природно-климатических зонах, склонных к ветровой эрозии, являются актуальными.

Нами проведены исследования, которые направлены на повышение качества обработки почвы благодаря усовершенствованию технологических процессов и конструкции игольчатой бороны, угол заострения игл которой может изменяться.

## ГЛАВА 1

### 1.1. Почва как объект механической обработки

Почва – это уникальная углеродная среда, важнейшим показателем которой является плодородие. Чтобы не только сберечь, но и повысить плодородие, необходимо владеть знаниями о физических и технологических свойствах почвы, использовать научно-обоснованные новейшие системы обработки и технические средства для их выполнения с учетом природно-климатических условий производства и особенностей почвы каждого поля.

Под обработкой почвы подразумевают механическое воздействие рабочих органов машин и орудий, направленные на изменение ее свойств и состояния. Основная цель механической обработки – создать наиболее благоприятные условия для роста и развития культурных растений, а также непрерывного повышения плодородия почвы.

Почва представляет собой трехфазную дисперсную среду. Это означает, что вещества, составляющие почву, находятся в трех физических состояниях (фазах): твердом, жидком и газообразном, их составляющие частицы раздроблены и перемешаны.

Твердая фаза состоит главным образом из минеральных частиц (до 90%), но содержит и органические вещества, включающие гумус, растительные остатки (корни и стебли растений), а также живые организмы растительного и животного происхождения. Жидкая фаза включает в себя воду и растворы разных веществ в ней, которые обеспечивают питание растений через корни. Газообразная фаза представлена воздухом, что вмещает пары воды, углекислый газ, метан и другие газы.

Плотность – это отношение массы почвы к объему исследуемой пробы, взятой без нарушения ее природной структуры:

$$\rho = m/V, \quad (1.1)$$

где  $m = m_m + m_g$  – масса пробы в природном состоянии, кг; (здесь  $m_m$  – масса высушенной пробы (твердой фазы) и  $m_g$  – масса влаги (жидкой фазы);  $V = V_m + V_n$  – объем пробы, м<sup>3</sup> (здесь  $V_m$  – объем твердой фазы и  $V_n$  – объем пор).

Плотность почвы непосредственно связана с пористостью. Чем более пористая и пышная почва, тем меньше его плотность. Она изменяется от 0,9 до 1,8 г/см<sup>3</sup>.

Культурные растения чувствительны к плотности почвы, при ее оптимальном значении они быстро растут и развиваются. ПоИ. Ревуту [11,19,24,37,38,43,45,48,55,65], отклонение плотности почвы на 0,1...0,3 г/см<sup>3</sup> от оптимальной приводит к снижению урожайности на 20...40%. Оптимальная плотность составляет для зерновых 1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>, картофеля 1,0...1,2 г/см<sup>3</sup> и сахарной свеклы 1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>. Сравнивая равновесную плотность с оптимальной для той или иной культуры, определяют оптимальный способ обработки почвы.

Твердая фаза почвы характеризуется по механическому составу и структуре. Механическим составом называют относительное содержание в почве первичных элементарных частиц (механических элементов) различных размеров. Элементарные частицы, содержащиеся в почве, в зависимости от их размеров, поИ. Качинскому [11, 16, 19,24,26,37], подразделяются на следующие фракции: больше 3 мм – камни; 3...1 мм – гравий, 1...0,05 мм – песок; 0,05...0,001 мм – пыль; 0,001...0,0001 мм – ил; меньше 0,0001 мм (<0,1 мкм) – коллоиды. Кроме того, все элементарные частицы крупнее 1 мм называются почвенным скелетом, а меньше 1 мм – мелкоземом. Соотношение содержания в почве скелета и мелкозема положено в основу классификации почвы по каменистости. В не каменистых почвах частицы крупнее 1 мм (камень и гравий) составляют меньше 0,5%, слабокаменистых – 0,5...5, среднекаменистых – 5...10, сильнокаменистых – больше 10%.

О количестве воды, которое содержится в почве, судят по ее абсолютной влажности, которую определяют как отношение массы воды к массе сухой твердой фазы (скелета):

$$W_a = \frac{100 \cdot m_e}{m_c} = \frac{100 \cdot (m - m_c)}{m_c}, \quad (1.2)$$

где  $m_e$  и  $m_c$  – масса влаги и сухой почвы, содержащиеся в пробе;  $m = m_e + m_c$  – масса влажной почвы.

О степени насыщения почвы водой судят по относительной влажности  $W_e$ , %, которая представляет собой отношение содержания влаги в данной пробе к количеству, что насыщает почву к общей (полевой) влагоемкости:

$$W_e = \frac{100 \cdot W_a}{W_n}, \quad (1.3)$$

где  $W_n$ , – полевая (общая) влагоемкость – абсолютная влажность почвы после ее полного насыщения и дальнейшего свободного оттока гравитационной влаги, которая учитывает все категории почвенной влаги, кроме гравитационной.

«Физическая спелость» почвы в зависимости от ее механического состава наступает при относительной влажности 40...70%, что отвечает абсолютной влажности 15...30%.

На состояние и свойства почвы влияют механический состав и влажность. В зависимости от содержания влаги различаются твердые, пластичные или текучие почвы. Влияние механического состава и влажности на консистенцию почвы можно представить в виде диаграммы (рис. 1.1). предложенной Г.Д. Петровым [19,24,37,43,48, 55, 65]. Кривые верхнего  $CE$  и нижнего  $CD$  пределов пластичности делят площадь диаграммы на зоны, что характеризуют разные консистенции почвы: I – твердую, II – пластичную, III – текучую.

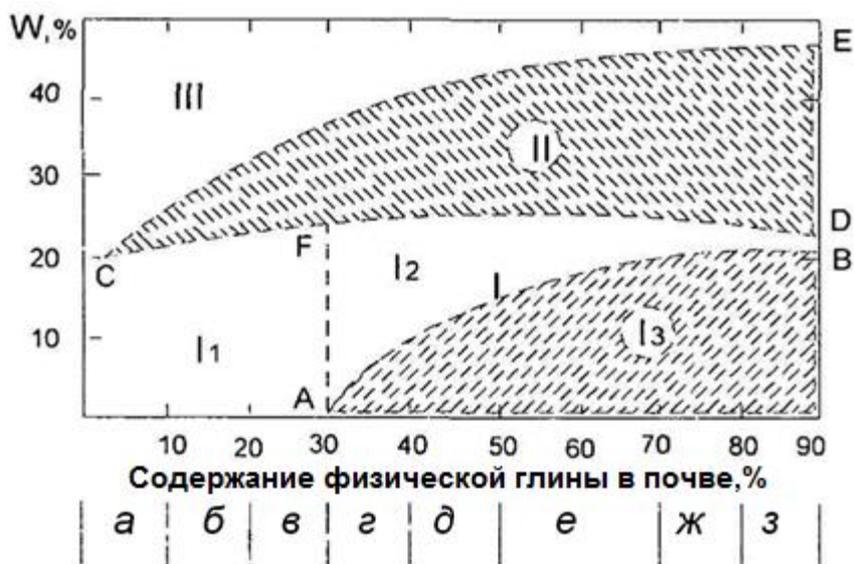


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния почвы в зависимости от ее механического состава и влажности: *а* – песок; *б* – супесь; *в* – легкий суглинок; *г* – средний суглинок; *д* – тяжелый суглинок; *е* – легкая глина; *ж* – средняя глина; *з* – тяжелая глина (ось X – содержание физической глины в почве, %)

Почву в основном обрабатывают, когда она находится в твердой консистенции (зона I). В зоне II почва представляет собой тестоподобную пластичную массу, прилипающую к рабочим органам, что усложняет и ухудшает его механическую обработку. В зоне III почва находится в виде текучей массы без формы.

Зону I состояния почвы, в свою очередь, можно разделить на подзоны I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> и I<sub>3</sub>, которые различаются технологическими свойствами при механической обработке. Левый нижний угол подзоны I<sub>1</sub> отвечает сухому сыпучему песку. При перемещении вправо и вверх в пределах подзоны песок переходит в супесь и легкий суглинок, влажность которых повышается. Такие почвы относят к легким, они легко разрыхляются рабочими органами машины. В правом нижнем углу подзоны I<sub>3</sub> – сухая глина, похожая на камень. При движении влево и вверх – глинистая и суглинистая сухая почва, которая с точки зрения механической обработки относят к разряду тяжелых.

При механической обработке такой почвы возникают большие твердые глыбы, создается большое сопротивление рабочим органам. В левом верхнем углу подзоны I<sub>2</sub> находится почва, которая наиболее благоприятная для механической обработки. При воздействии рабочих органов она рассыпается на относительно мелкие почвенные агрегаты (грудки).

При обработке почвы осуществляются следующие технологические операции:

1. Оборачивание (заделка удобрений, семян сорняков, улучшение структуры, заделка пожнивных и послеуборочных остатков).

2. Рыхление (крошение) – увеличение объема и пористости почвы (улучшается аэрация, водо- и воздухопроницаемость, биологическая деятельность).

3. Прикатывание – увеличение капиллярной пористости и уменьшение некапиллярности.

4. Перемешивание.

5. Выравнивание (уменьшение выпаривания влаги, создание условий для качественной заделки семян, уменьшения потерь урожая при его уборке).

Кроме того, в результате обработки почвы осуществляется подрезание сорняков, регулируется количество и масса пожнивных и послеуборочных остатков на ее поверхности для предотвращения эрозийных процессов и др.

К операциям обработки почвы относят: оборачивание (обработка, при которой обрабатываемый слой почвы оборачивается не меньше чем на 135°, крошится и рыхлится); безотвальное рыхление (обработка без переворачивания слоя и сохранения пожнивных остатков); лущение (обработка, при которой происходит рыхление, крошение, частичное переворачивание почвы и подрезание сорняков); культивация (поверхностная или мелкая обработка, обеспечивающая подрезание сорняков, крошение, рыхление, выравнивание и частичное перемешивание почвы); боронование (поверхностная обработка, которая крошит почву, выравнивает и частично перемешивает ее, уничтожает всходы однолетних сорняков); шлифование

(выравнивание поверхности и измельчение грудок); прикатывание (уплотнение почвы, измельчение грудок, выравнивание поверхности).

В зависимости от принятой глубины обработка различают: глубокая (больше 24 см); обычная (16...24 см); мелкая (8...16 см); поверхностная (0...8 см); нулевая.

## **1.2. Анализ технологических и конструктивных особенностей ротационных рабочих органов для поверхностной обработки почвы и их классификация**

Основной целью поверхностной обработки почвы является доведение ее до состояния, оптимального для роста культурных растений. При этом используются рабочие органы пассивного или активного действия.

Ротационные рабочие органы машин, орудий и агрегатов по способу их привода делятся на три основные группы: с активным приводом, безприводные (без привода от ВОМ (вал отбора мощности) трактора) и почвенноприводные.

К первой группе ротационных почвообрабатывающих машин относят почвенные фрезы, роторные плуги, пропашные фрезы, привод которых осуществляется от ВОМ трактора, электро- и гидропривода. Эти орудия не нашли широкого применения в сельскохозяйственном производстве. Основным причинам, которые обусловили это явление, являются следующие факторы:

- относительно высокая энергоемкость;
- сравнительно низкая производительность и рабочая скорость;
- сложность конструкции и большой износ рабочих органов.

К другой группе относятся ротационные почвообрабатывающие орудия с пассивными рабочими органами: игольчатые, ножевые и дисковые бороны, мотыги, луцильники, катки, шнековые культиваторы, прутковые

(пластинчатые) роторные бороны. Различные производители предлагают разные конструкции безприводных ротационных рабочих органов (рис. 1.2).

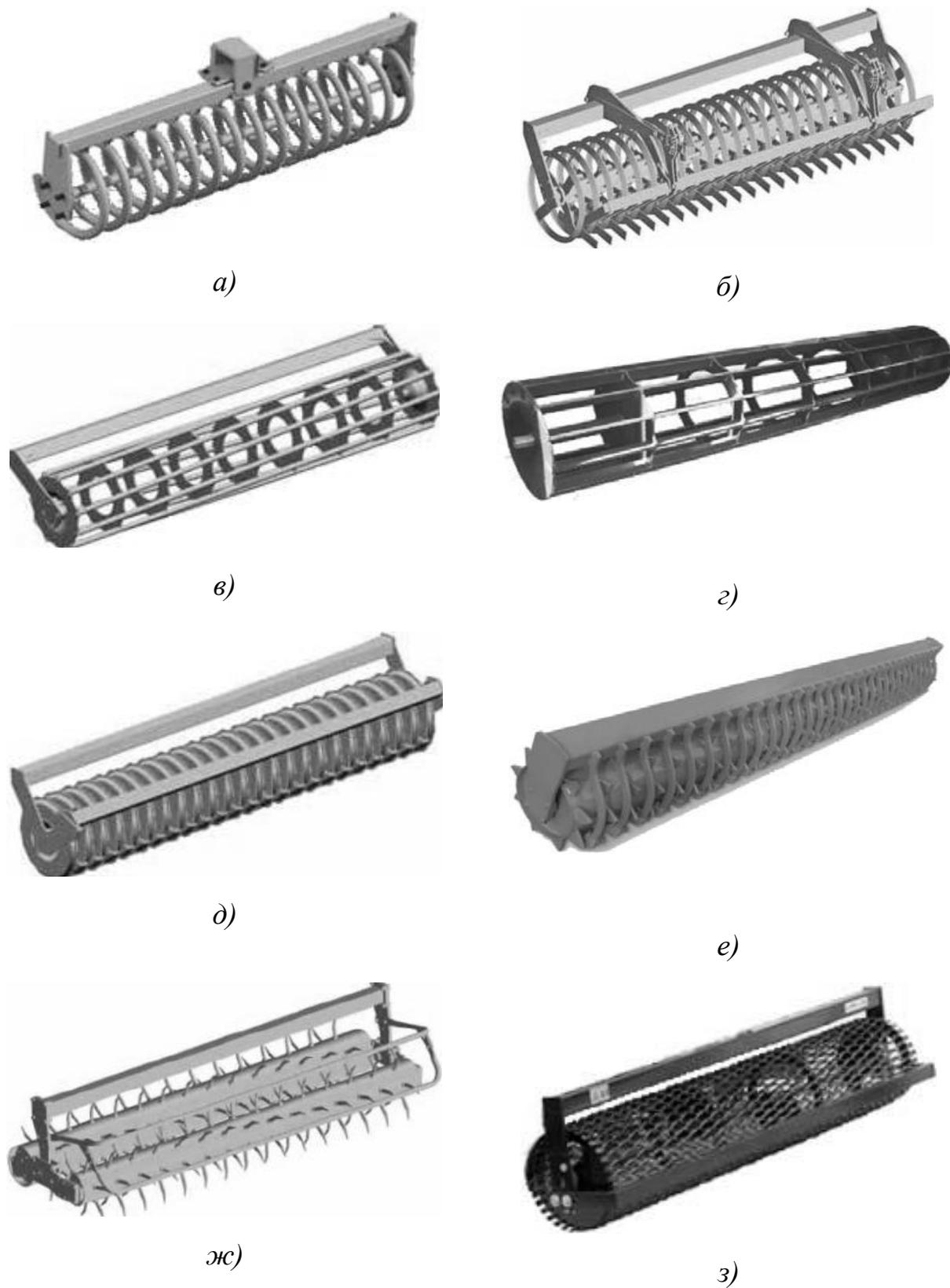


Рисунок 1.2 – Безприводные ротационные рабочие органы

почвообрабатывающих машин:

а – спиральный, б – кольцевой; в – трубчатый; г – пластинчатый; д – клиновидно-округлый; е – зубчатый; е – игольчатый; з – сетчатый

Среди них наиболее широкое применение нашли спиральные, трубчатые или пластинчатые, зубчатые, кольцевые, клиновидно-округлые, игольчатые и сетчатые рабочие органы.

Спиральные рабочие органы наиболее подходят для работы на переувлажненных почвах, а трубчатые или пластинчатые обеспечивают необходимое качество обработки на сухих и не липких почвах. Клиновидно-округлые и кольцевые рабочие органы используются также для обработки сухих почв. Однако в отличие от других типов рабочих органов они хорошо работают и на тяжелых почвах, где первые не всегда могут обеспечить необходимое качество работы. На тяжелых не липких почвах используются также игольчатые рабочие органы, которые позволяют выравнивать и рыхлить почву без уплотнения, а зубчатые обеспечивают равномерное уплотнение верхнего слоя по всей ширине захвата и хорошее крошение грудок большинства типов почв. Сетчатые ротационные рабочие органы используются в основном для подготовки почвы под посев трав, при обустройстве ландшафтов. Разновидностью безприводных ротационных рабочих органов являются конусоподобные барабаны, рабочими элементами которых могут быть зубья (иглы), ножовые спирали, гладкая поверхность (каток). Оси вращения этих рабочих органов могут быть горизонтальными или наклонными, фронтально или косоустановленными (под углом «атаки») [26,28,37,47,48].

К третьей группе относятся ротационные машины почвенноприводного действия, которые вращаются вследствие кинематической связи рабочих органов, батарей (секций). Эти рабочие органы устанавливаются в два и более ряда и оснащаются цепными, ременными, зубчатыми и другими передачами.

Такие машины могут работать в режиме ускоренного вращения (фрезерования) или торможения вращения части рабочих органов и имеют разные передаточные отношения механизмов (редукторов). Известны также конструкции почвообрабатывающих орудий, рабочие органы которых кинематически связаны с опорными колесами машины.

В данной работе исследуются лишь безприводные ротационные рабочие органы другой группы. Орудия с безприводными ротационными рабочими органами перспективны [6,9,16,20,29]. Они способны работать в разных условиях на почвах легких и средних по механическому составу, обеспечивают интенсивное крошение верхнего слоя почвы на глубину до 0,1...0,12 м. Такие орудия не требуют сложной и ненадежной системы привода от ВОМ трактора. В отличие от рабочих органов рыхлительного типа (лап), они способны самоочищаться от налипающих частиц почвы и растительных остатков. К преимуществам безприводных ротационных рабочих органов относятся также:

- ❖ способность работать на высоких скоростях (0...15 км/ч и больше), что позволяет в большей мере использовать энергетические возможности современных скоростных энергонасыщенных тракторов;
- ❖ сравнительно низкая энергоемкость;
- ❖ простота конструкции;
- ❖ относительно высокая износостойкость;
- ❖ не требуют тщательного досмотра и ремонта.

Безприводные ротационные рабочие органы движутся за счет реакции почвы, вращаясь в направлении поступательного движения орудия. Окружная скорость периметра (концов зубьев или игл) равняется поступательной скорости орудия или незначительно отличается от нее в сторону ускорения и замедления.

Их условно можно классифицировать на крошильно-рыхлительные, крошильно-уплотнительные и выравнивающие. При этом следует отметить, что всем видам ротационных рабочих органов присущи взаимные

технологические функции. Например, крошильно-рыхлительные ротационные рабочие органы помимо своего основного назначения, обеспечивают частичное уплотнение почвы и выравнивание микрорельефа.

### **1.3. Ротационные рабочие органы для крошения (рыхления) почвы**

Безприводные ротационные рабочие органы, предназначенные для крошения почвы, очень разнообразны и имеют различные конструктивные решения: дисковые, игольчатые, роторы с ножами, лопатами, зубьями [9,11,24,26,34,42,58,59].

Назначением этой группы рабочих органов является рыхление пласта, крошение глыб и грудок, частичное выравнивание микрорельефа, перемешивание почвенных слоев между собой и почвы с удобрениями, а также лушение, дискование, уплотнение и боронование почвы.

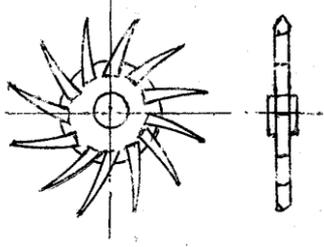
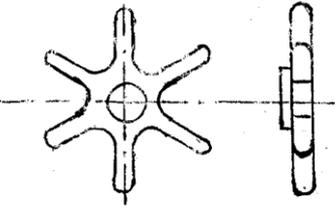
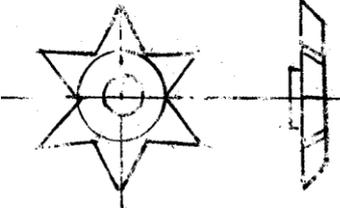
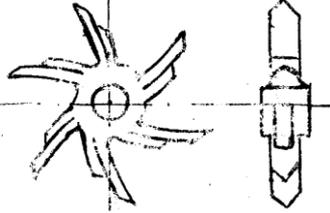
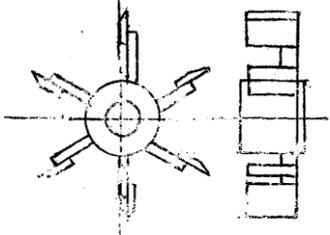
Игольчатые рабочие органы меньше расплывают почву, хорошо ее сепарируют, менее энергоемкие, способны работать на повышенных скоростях в сравнении с рыхлительными (культиваторными) и активными (фрезы) ротационными органами [24,26,59,74].

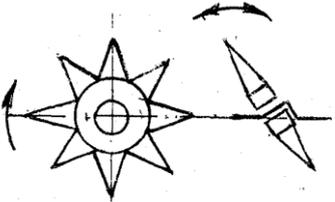
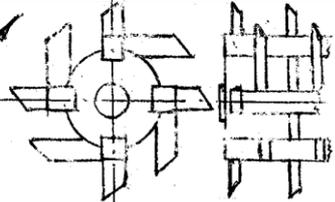
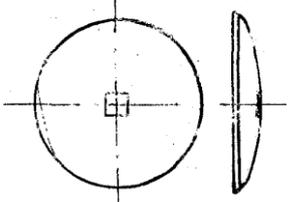
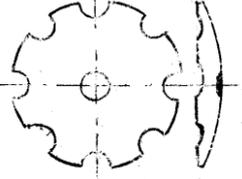
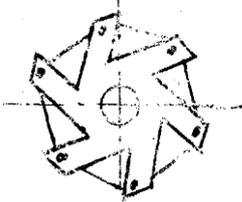
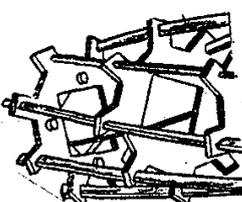
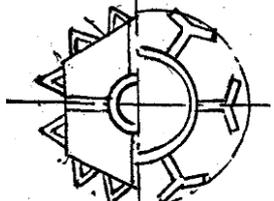
Разнообразие таких рабочих органов систематизировано в табл. 1.1. Рабочие органы 1.1, выполнены в виде игольчатых дисков, находят очень широкое применение как в однооперационных, так и в комбинированных агрегатах. Широкое распространение за рубежом получили звездообразные бороны 1.2 и 1.3 (табл. 1.1), которые имеют зубы круглой или клиноподобной заостренной формы.

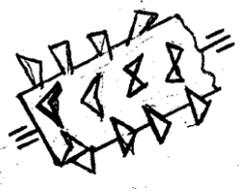
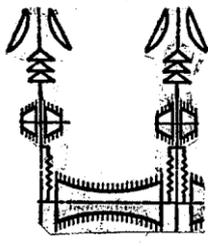
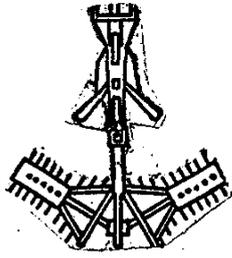
Ротационные культиваторы 1.4 выпускаются в Германии. В США выпускаются орудия для предпосевного выравнивания поверхности поля, выполненные в виде лопастного культиватора 1.5 [11,26,34,59]. Шатковую ротационную игольчатую борону 1.6 выпускает немецкая фирма RAU. Эта борона интересна тем, что на свободно вращающейся оси есть непараллельные ей участки, на которых свободно вращаются игольчатые диски. При движении орудия по полю диск вращается в продольной и

качается в поперечной плоскостях, обеспечивая тем самым повышенное воздействие рабочих элементов на почву [11,13,26,37,65].

Таблица 1.1. Рабочие органы для крошения почвы

№ п/п	Название	Форма рабочих органов	Область использования
1.1	Игольчатый диск		Бороны игольчатые БИГ-3, БМШ-15 (Россия), МТ-12, МТ-16 (США)
1.2	Звездообразная борона		В-452 (Германия), КР-1Б-40 (Венгрия)
1.3	Звездообразная борона		В-452 (Германия), КР-1Б-40 (Венгрия)
1.4	Ротационный культиватор		Крошение, рыхление и выравнивание почвы
1.5	Лопатный культиватор		Рыхление почвы

1.6	Шаткая борона ротационная		Крошение, рыхление и выравнивание почвы
1.7	Батарея дисков игольчатых		Приспособления ПСТ-2,5, ПСТ-4,5 к дизельным плугам П4-2,5 и П4-4,5
1.8	Сферический диск		Лушение стерни, дискование почвы. Луцильники серии ЛДТ
1.9	Сферический диск с вырезами		Лушение стерни, дискование. Дисковые плуги, бороны
1.10	Проволочная борона (струнная)		Крошение, выравнивание посевного слоя почвы
1.11	Рыхлитель прутковый (планчатый)		Крошение, выравнивание почвы
1.12	Измельчитель почвы		Измельчение глыб и грудок, уплотнение посевного слоя

1.13	Почвенный рыхлитель Тимофеева		Крошение, выравнивание почвы
1.14	Ротационное оборудование к пропашному культиватору		Нарезание грядок с рыхлением откосов. Уничтожение сорняков.
1.15	Ротационная борона БРУ-0,7		Нарезание гребней с рыхлением их до всходов и после всходов

Сферические диски 1.8 и сферические диски с вырезами 1.9 нашли массовое применение в дисковых луцильниках, садовых дисковых боронах типа БДТ-7 как в нашей стране, так и за рубежом. Оптимальная рабочая скорость дисковых рабочих органов находится в пределах 7...10 км/ч [26,59,65]. При более высокой скорости сферические диски далеко разбрасывают почву, качество работы снижается.

Орудия с прутковыми рабочими органами (боронами) 1.10 используются в агрегатах из зубовыми боронами или культиваторами с S-подобными лапами. Они осуществляют разделение и выравнивание пласта почвы с частичным ее уплотнением [71,72].

В Австрии выпускаются на базе культиваторов комбинированные агрегаты для предпосевной обработки почвы с одно- или двурядными прутковыми боронами-рыхлителями 1.11. Рабочие кромки прутковых катков имеют гладкую или рифленную поверхность, при этом рифы имеют разную форму и размеры. Рыхлитель Тимофеева 1.13 представляет собой трубу, на которой по винтовой линии закреплены пластинчатые элементы специальной

формы, которые описывают сложную траекторию при движении орудия и проводят качественное рыхление почвы [102,122].

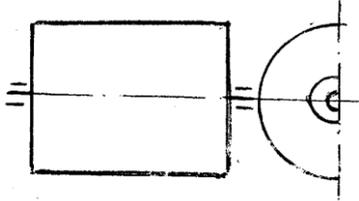
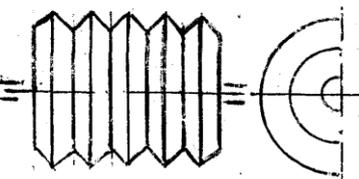
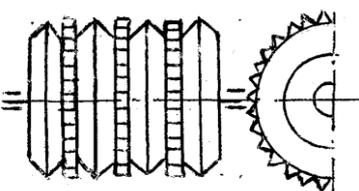
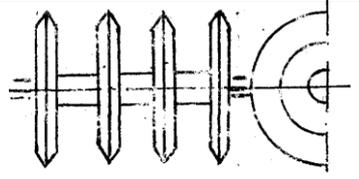
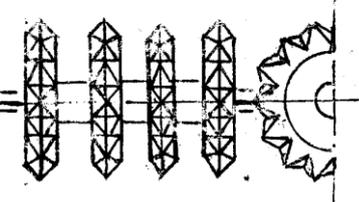
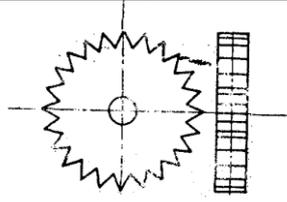
Ротационное оборудование к пропашному культиватору 1.14 используется для обработки картофеля на грядах [77, 88]. Оно необходимо для нарезания гряд с одновременным рыхлением откосов и уничтожением сорняков.

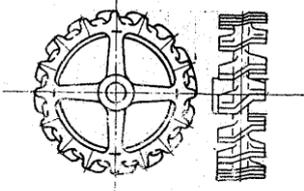
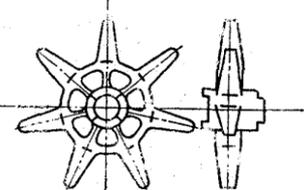
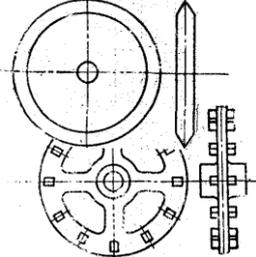
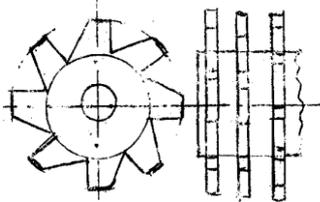
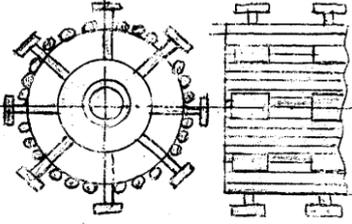
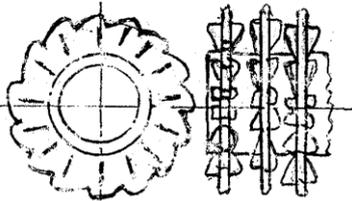
Ротационная борона 1.15 состоит из двух частей: цилиндрической зубчатой и конической зубчатой. Она используется в агрегате с пропашным культиватором при обработке картофеля на гребнях для нарезания гребней и уничтожения сорняков [86,92,94].

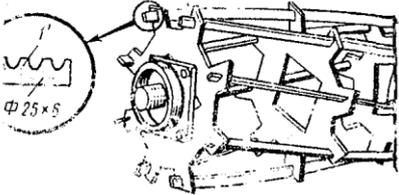
#### **1.4. Ротационные рабочие органы для уплотнения(прикатывания) почвы**

Основной задачей прикатывания является уплотнение взрыхленного пласта почвы с целью создания оптимальных условий для посева и развития культурных растений. При этом на глубине залегания семян должна быть уплотненная прослойка (семенное ложе), которая способствует лучшему контакту семян с почвой и обеспечению их влагой. Кроме того, семенное ложе оберегает почву от выдувания влаги из нее. В нем конденсируются пары воды, что поднимаются по капиллярам с нижних слоев почвы. Прикатывая почву вместе с уплотненной прослойкой, целесообразно обеспечить на поверхности почвы мульчированный верхний слой толщиной 2...3 см, который оберегает ее от испарения влаги и образования корки. Кроме того, катки измельчают грудки и глыбы на поверхности почвы, частично выравнивая ее. Современные конструкции катков имеют большую массу и недостаточно высокую рабочую скорость передвижения [10,26,37,39]. Их уплотняющее воздействие на почву по глубине не превышает 0,15м.

Таблица 1.2. Рабочие органы для прикатывания почвы

№ п/п	Название	Форма рабочих органов	Область применения
1	Гладкий каток		Уплотнение, выравнивание почвы перед посевом
2	Кольчатый каток		Уплотнение нижних слоев почвы, крошение грудок
3	Кембриджский каток		Крошение и уплотнение почвы перед и после посева
4	Каток Кемпбелла		Уплотнение нижних слоев почвы, крошение глыб
5	Зубчатый каток		Крошение глыб, уплотнение посевного слоя
6	Зубчатый каток		Крошение глыб, уплотнение посевного слоя

7	Кольцево-шпоровый каток		Уплотнение посевного слоя, крошение глыб и грудок
8	Звездообразный каток		Крошение глыб, разрушение воздушных пустот
9	Клиновидный каток		Крошение и уплотнение посевного слоя в агрегате с фрезами
10	Комбинированный каток		Крошение глыб, поярусное уплотнение почвы
11	Каток-паковщик		Крошение грудок и уплотнение почвы в составе комбинированного агрегата
12	Измельчитель-паковщик		Крошение посевного слоя, уплотнение почвы в агрегате с дисковыми боронами

13	Спиральный каток (тяжелый)		Уплотнение почвы до посева и после в агрегате с зубчатой бороной
14	Спиральный каток (легкий)		Крошение, выравнивание и уплотнение посевного слоя почвы
15	Прутковый каток		Крошение, выравнивание, частичное уплотнение почвы в составе комбинированных машин

Гладкий водоналивной каток 1 (табл. 1.2) используется для предпосевного прикатывания почвы. Его нельзя использовать для прикатывания посевов, потому что он создает глянцевую поверхность, которая после дождя превращается в корку. Катки с гладкой поверхностью почти не крошат грудки, а вдавливают их в верхний слой почвы [65,75,89].

Кольчатый каток 2 с конусоподобными рабочими поверхностями разрезает почвенные глыбы и создает на поверхности профильные бороздки. Диски кольчатого катка целесообразно изготавливать диаметром не менее 0,45 м. Для копирования рельефа поля секции катков изготавливают шириной захвата не более 2 м. Кольчатые катки хорошо измельчают глыбы, грудки и при этом хорошо прикатывают почву. В противном случае поверхность ее остается ребристой.

Кембриджский каток 3 создает воздействие на почву благодаря своей конструкции. Между гладкими кольцами с конической поверхностью размещены зубчатые диски немного большего диаметра со свободным

размещением на валу. Такая конструкция обеспечивает интенсивное крошение глыб, находящихся на поверхности, самоочищение катка от влажных частиц почвы. Важным свойством кембриджского катка является то, что он оставляет на поверхности почвы тонкий измельченный слой, который оберегает от быстрого выпаривания влаги нижележащие слои. Эти катки особенно эффективны при рабочей скорости свыше 7 км/ч. Потребляемая мощность составляет 4...6 кВт на метр захвата.

Почвоуплотнитель Кемпбелла 4 имеет клиноподобную рабочую поверхность. Хорошо уплотняет и ниже размещенные слои почвы благодаря большому диаметру колец и их способностью проникать на глубину почвы. Предназначены для агрегатирования с плугами с целью ускорения усадки почвы перед посевом. Эти катки состоят из узких тяжелых колец диаметром 0,7...0,9 м, вставленных в оси с интервалом 0,15 м.

Зубчатый каток 5 имеет рубчатый профиль в виде четырехгранных выступов, которые хорошо крошат глыбы и уплотняют почву на значительную глубину. Другой разновидностью зубчатого катка 6 являются диски с насечкой треугольной формы, размещенной на периферии параллельно оси вращения. На практике используются не часто [103, 119].

Известная конструкция кольчато-шпорового катка, между шпорами которого закреплены звенья цепи. Кольчато-шпоровый каток 7 состоит из отдельных колец со шпорами. Это один из наиболее широко распространенных типов катков. Выпускается модель двурядного катка ЗККШ-6, диски в рядах которого установлены с перекрытием, позволяющим ему самоочищаться от налипающей почвы. Для регулирования давления этих катков на почву на них устанавливают набор балластных грузов или ящики для сыпучих материалов.

Звездообразные катки 8 представляют собой насаженные на оси чугунные диски, имеющие 5-6 клиновидных рабочих элементов. Эти катки предназначены для крошения глыб и разрушения воздушных пустот при вспашке в агрегате с плугом. Катки S200 (S250) вместе с регулировочной

резальной балкой обеспечивают оптимальное выравнивание и крошение на средних и тяжелых почвах. При вспашке тяжелых почв рекомендуется дополнительное использование ножевого бруса, рабочая глубина которого регулируется мелкоступенчато (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Звездообразный каток S200; S250

Клиновидные катки 9 состоят из несущей трубчатой конструкции с приваренными шинами (клинья) разной формы: трапециевидной, треугольной, круглой. Такие катки чаще всего используются в комплекте с фрезами. Они склонны к залипанию и забиванию частицами почвы, поэтому снабжены чистиками, закрепленными на поперечном бруске [134, 135].

Комбинированные катки 10 имеют два типа рабочих органов: звездочные и кольцево-шпоровые. Звездочные диски предназначены для разрушения больших глыб, уплотнения нижних и рыхления верхних слоев почвы. Кольцево-шпоровые катки в основном рыхлят и уплотняют верхний слой почвы. При совместной работе двух типов рабочих органов удастся значительно улучшить качество обработки, особенно при вспашке. Катки

ПВР-2,6 (3,5) (приспособление выравнивающее рыхлительное) применяются с плугами [50,79,92,94].

Катки-паковщики 11 состоят из двух типов рабочих органов, закрепленных на оси. Прутковые элементы закреплены по периферии параллельно оси. В промежутках между прутками вставлены звездочки со штырями, на концах которых закреплены поперечные сегменты в виде пятки. Такие катки используются в комбинированных агрегатах ВК-3 и ВК-6.

Измельчитель-паковщик 12 состоит из оси, на которой установлены кольца, на периферии которых имеется система заостренных шпор, предназначенных для интенсивного крошения верхнего (0,03...0,04 м) слоя почвы и уплотнения нижнего слоя. Особенностью конструкции этого катка является то, что диски свободно посажены на ось, причем с очень большим зазором. Это обеспечивает самоочищение рабочих органов и наиболее полное копирование микрорельефа поля. Агрегатируется с тяжелыми дисковыми боронами на предпосевной обработке почвы [26, 37, 42].

Спиральный тяжелый каток 13 используется для подготовки почвы под посев и ее уплотнения после посева. Бороны серии 95 (Канада) включает [137, 138] широкозахватную раму, секции зубовых борон с пружинным зубом и специальные катки двух разных по весу разновидностей.

Спиральные рабочие органы облегченного типа диаметром 0,42 м, сечением спирали 30x20 мм (14) используются в серии комбинированных агрегатов фирмы FRANKUET. Спиральный каток этой серии состоит из двух спиралей, которые жестко закреплены на осях, связанных между собой цепной передачей, которая синхронизирует работу спиралей, установленных относительно один другого с перекрытием витков. Каток измельчает грудки, выравнивает и уплотняет почву. Недостатком этого катка является повышенная энергоемкость, связанная с поперечным сдвигом почвы [135,137].

Прутковые (пластинчатые) катки 15 используются главным образом в составе комбинированных агрегатов для предпосевной обработки почвы

вместе с боронами и культиваторными лапами разных конструкций и типов. Разнообразие прутковых катков очень большое.

Кроме этих конструкций катков в последнее время используются новые разработки. Например – навесной почворыхлитель ГН-2,9 (рис. 1.4). Рабочие органы игольчатых катков – ежи, которые установлены на подшипники вала, обеспечивая в процессе эксплуатации крошение и выравнивание почвы. Интенсивность крошения почвы регулируется изменением величины усилия сжатия пружин.

Фирма HORSCH комплектует свои почвообрабатывающие агрегаты пружинными катками (рис. 1.5), самоочищающимися катками (рис. 1.6), катками-пакерами (рис. 1.7), призмоподобными зубчатыми катками (рис. 1.8).

Степень крошения и уплотнения почвы катками зависит от поступательной скорости орудий. При увеличении скорости возрастает степень крошения почвы, однако уменьшается ее уплотнение. Наибольший эффект достигается при работе катков в составе комбинированных агрегатов, когда влажные грудки легко разрушаются рабочими поверхностями катков. Одновременно отметим, что не пересохшая почва легко уплотняется.



Рисунок 1.4 – Навесной почворыхлитель ГН-2,9



Рисунок 1.5 – Пружинный каток



Рисунок 1.6 – Самоочищающийся каток



Рисунок 1.7 – Каток-пакер



Рисунок 1.8 – Призмочно-зубчатый каток

### **1.5. Обзор исследований технологических свойств почвы и безприводных ротационных рабочих органов**

Значительный вклад в исследования физико-механических и технологических свойств почвы при ее обработке внесли ученые В.П. Горячкин, В.А. Желиговский, Г.Н. Синюк, И.М. Панов, А.М. Ширяев, М.М. Ковалев, В.В. Сафонов, и др.

Под технологическими свойствами почвы следует подразумевать те физические свойства, которые влияют на закономерности и характер протекания технологических процессов, связанных с ее механической обработкой. К технологическим свойствам почвы относят: твердость, фракционность, липкость, пластичность, упругость, вязкость, хрупкость и влажность.

В работе Н.И. Кленына, В.А. Сакуна [55] приведена зависимость удельной силы прилипания обрабатываемой почвы к рабочим органам от влажности почвы (рис. 1.9).

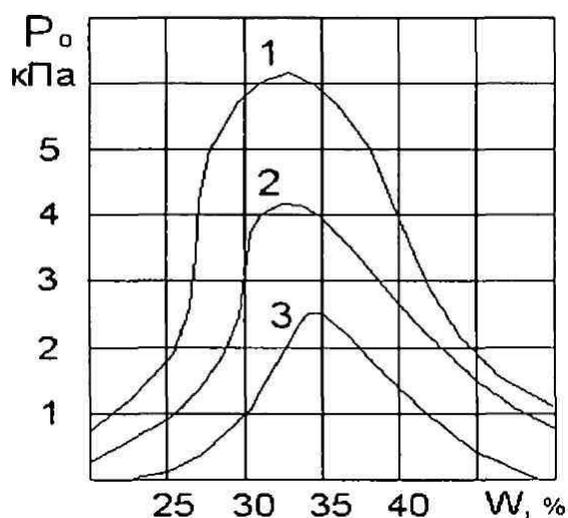


Рисунок 1.9 – Зависимость удельной силы прилипания  $P_0$  от абсолютной влажности почвы  $W_a$ : 1 – сталь; 2 – капрон; 3 – фторопласт

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 1.9 следует, что верхний предел влажности определяется появлением сил липкости на поверхности контакта обрабатываемой почвы и рабочего органа. С увеличением влажности липкость сначала возрастает, а затем уменьшается: к капрону и фторопласту почва прилипает значительно хуже, чем к стали. Для рабочих органов с металлической поверхностью наименьшее слипание происходит при влажности 10%, а для рабочих органов, покрытых капрон – 23,5%, покрытых фторопластом – 29%.

Теория взаимодействия с почвой рабочих органов почвообрабатывающих машин отображена в работах В.П. Горячкина [32, 33]. В развитие теории и практики почвообработки значительный вклад внес В.А. Желиговский [27].

Результаты исследований этих ученых позволяют сделать обоснованный выбор в пользу разработки ротационных рабочих органов, в частности, пассивного действия.

Рабочие органы без привода от ВОМ трактора (безприводного действия) имеют множество форм и модификаций. В данном случае рассматриваются игольчатые диски без приводного действия, как наиболее перспективные при создании разных машин для обработки почвы.

Технологический процесс ротационных рабочих органов типа игольчатый диск (игольчатая мотыга) заключается в том, что при перекачивании их в слое почвы иглы входят в него, сминая и разрушая его в направлении оборачивания, частично откидывая его назад и в стороны, осуществляя рыхление пласта, крошение глыб, заделывая растительные остатки и частично вытягивая их из почвы, уничтожая сорняки и разравнивая неровности микрорельефа.

Р.Ф.Зиязетдиновым и др. авторами изучались вопросы технологии работы этих рабочих органов. Обоснованы основные параметры плоских игольчатых дисков [37]. Кинематику ротационных рабочих органов, кроме дисковых, рассматривали многие исследователи. Наиболее полный анализ кинематики сферических дисков разных типов с необходимыми выходными данными для расчета и конструирования дисковых машин выполнен Г.Н. Синеоковым и И.У. Пановым [106], а также В.Ф. Стрельбицким [90].

Батарей дисковых машин часто устанавливают под углом «атаки» в направлении движения. Площадь вращения дисков создает угол « $\alpha$ » с направлением движения машины, поэтому рабочая поверхность дисков осуществляет сложное движение в пространстве.

Исследованы ротационные рабочие органы при обработке сельскохозяйственных культур и определена зависимость вертикальной составляющей реакции почвы от глубины хода игольчатых дисков [49]. Установлено, что при увеличении глубины хода от 0,04 до 0,07 м реакция почвы в вертикальной плоскости увеличивается относительно медленно, а в дальнейшем почти пропорционально увеличению глубины. Для расчетов вертикальной нагрузки предложена формула:

$$Q = k \cdot a, \quad (1.4)$$

где  $a$  – глубина заглубления иголок диска, м;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $k = 1,2$  кг/см – экспериментальная величина коэффициента для суглинистого чернозема

Получена зависимость величины результирующего сопротивления почвы  $R$  и угла ее наклона к горизонту  $\psi$ :

$$\psi = Q/P, \quad (1.5)$$

де  $P$  – горизонтальная составляющая, Н.

А.Т. Вагин, А.З. Пилецкий [95] экспериментально установили, что в зоне повышенного увлажнения целесообразно проводить игольчатыми боронами с дисками диаметром 0,55...0,6 м, расстояниями между дисками 0,16...0,2 м, углами «атаки» 20...25° и вертикальным усилием на диск не меньше 600Н. При увеличении поступательной скорости возрастает степень рыхления. Однако, при этом (увеличение скорости свыше 3 м/с) уменьшается глубина обработки. Качество рыхления повышается с увеличением угла «атаки», однако, при углах «атаки», которые превышают 25°, наблюдается сдвиг почвы, а также значительно возрастает боковая нагрузка на диски.

С.М. Панцулая считает [92], что для повышения рыхлительной способности игольчатого рабочего органа необходимо его иглам создать несколько замедленное движение в почве. В этом случае качение

объединяется со скольжением, т.е. концы сил вращаются с меньшей угловой скоростью ( $V_o = \omega \cdot R$ ), чем скорость поступательного движения ( $V_n$ ) орудия. Автор установил, что при свободном перекачивании диска мотыги МВН-2,5 радиусом 0,22 м (имеет 12 зубов), со скоростью поступательного движения – 1,1 м/с, больше 80% длины бороздки остается необработанной.

Чайгиц Н.В. считает [105], что агротехнические и энергетические показатели работы игольчатых дисков зависят от размеров лунок, созданных иглами при движении дисков. Эффективность работы предлагается оценивать показателем воздействия рабочих органов на почву, который является отношением длины зоны воздействия игл за один оборот диска к пройденному пути:

$$\chi = \frac{b \cdot n}{2\pi R}, \quad (1.6)$$

де  $b$  – длина лунки;  $n$  – число зубьев на диске;  $R$  – радиус круга, при котором диск движется без скольжения, м.

Даценко Н.В. [41] исследовал процесс работы игольчатых дисков для обработки посевов пропашных культур. Автор исследовал воздействие жесткости иглы на критическую скорость крошения глыб и силу удара, используя при этом коэффициент жесткости.

Работа игольчатого диска оценивается степенью воздействия игл на почву, которая равна отношению суммарной длины пути воздействия на средней глубине хода, к пути, пройденному диском за один оборот.

Для определения интервала между концами игл при условии цельности обработки почвы используют выражение:

$$l = \frac{d + 2h \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\cos \varphi}, \quad (1.7)$$

де  $d$  – диаметр иглы, м;  $h$  – глубина обработки, м;  $\theta$  – угол скалывания почвы;  $\varphi$  – угол трения иглы о почву.

С точки зрения максимального рыхления почвы оптимальными параметрами являются: диаметр 0,45 м; диаметр иглы 0,01...0,012 м; глубина обработки 0,05...0,06 м; интервал между концами игл 0,11...0,12 м; угол «атаки» 20...25°, скорость движения 8...10 км/ч.

Ковриков И.Т. [64] теоретически обосновал форму иглы и параметры игольчатого диска для поверхностной обработки почвы. Предложена формула для определения радиуса игольчатой бороны [55]:

$$R = h_{\max} + a + 0,5d, \quad (1.8)$$

де  $h_{\max}$  – максимальная глубина обработки;  $a$  – высота стерни;  $d$  – диаметр ступицы.

Труфанов В.В. отмечает, что игольчатые диски наиболее перспективны для разрушения глыб и выравнивания поверхности почвы после работы плугов, глубокорыхлителей, дизельных культиваторов, тяжелых дисковых борон и т.д. Экспериментально была исследована энергоемкость и крошение сухих глыб игольчатыми дисками диаметров 0,55 м с иглами в форме; заостренного круглого цилиндра, треугольника, 4-х угольной пирамиды, квадрата, прямого круглого конуса и двухгранного клина. Исследования показали, что сила квадратного элемента разрушает твердые сухие глыбы на 4 части, конусные – цилиндрические и треугольные – на три части, остальные – на две части.

Бакулин Б.К. изучал [4]заглубление игольчатых дисков на твердой почве. Их самозаглубление можно обеспечить, используя эффект, который возникает в процессе замедления вращения, когда окружная скорость концов игл меньше поступательной скорости орудия. Вследствие этого возникает вертикальная составляющая сопротивления почвы, направленная вниз. Степень замедления дисков определяется исходя из выражения:

$$K = \frac{n}{n_0}, \quad (1.9)$$

где  $n$  и  $n_0$  – частота вращения замедляемого диска и диска-путеизмерителя.

Чем выше степень замедления, тем больше длина бороздки, созданной одной иглой. При коэффициенте замедления  $K=4...5$ , длина бороздки составляет  $0,08...0,12$  м, что достаточно для заглабления диска на  $0,06...0,1$  м при твердости почвы  $1,7$  МПа в слое  $0...0,05$  м.

По Бакулину при установке дисковой батареи под углом атаки происходит ускорение вращения дисков. Это утверждение противоречит классическому пониманию процесса, в соответствии с которым имеет место замедленное движение дисков [122].

Анализ литературных источников позволил систематизировать параметры игольчатых дисков, что выпускаются разными фирмами (табл. 1.3).

Табл. 1.3. Технические характеристики игольчатых дисков

№ п/п	Марка орудия	Диаметр диска, м	Количество игл на диске, шт.	Интервал между концами игл, м	Длина иглы, м
1	БИГ-3, БИГ-3А	0,550	12	0,140	0,200
2	БМШ-15, БМШ-20	0,550	11	0,154	0,200
3	МТ-12, МТ-16 (Джон-Дир)	0,457	11	0,128	0,185
4	КЛТ-28	0,450	12	0,115	0,130
5	МВХ-5	0,340	12	0,085	0,095
6	УСМК-5, 4	0,300	12	0,078	0,080
7	ПСТ-2,5 (4,5)	0,515	8	0,200	0,100
8	АКП-2, 5	0,450	10	0,140	0,100
9	Диски "ВИМ"	0,550	12	0,140	0,100

### **1.6. Постановка вопроса, цели и задачи исследований**

На основе проведенного анализа сформулированы следующие задачи исследований:

1. Разработать и усовершенствовать технологические процессы, направленные на повышение качества обработки почвы.
2. Выявить механико-технологические основы для обеспечения качества обработки почвы и обосновать параметры и режимы работы соответственно конструкции игольчатой бороны с повышенными технико-экономическими показателями.
3. Исследовать перекачивание игл бороны в продольно-вертикальной плоскости и определить кинематические показатели ее работы.
4. Исследовать воздействие размещения бороны и ее влияние на давление на почву.
5. Экспериментально исследовать технологические процессы и рабочие органы экспериментальной секции бороны с целью проверки адекватности их математических моделей.
6. Оценить эффективность использования новых технологий и конструкции игольчатой бороны.

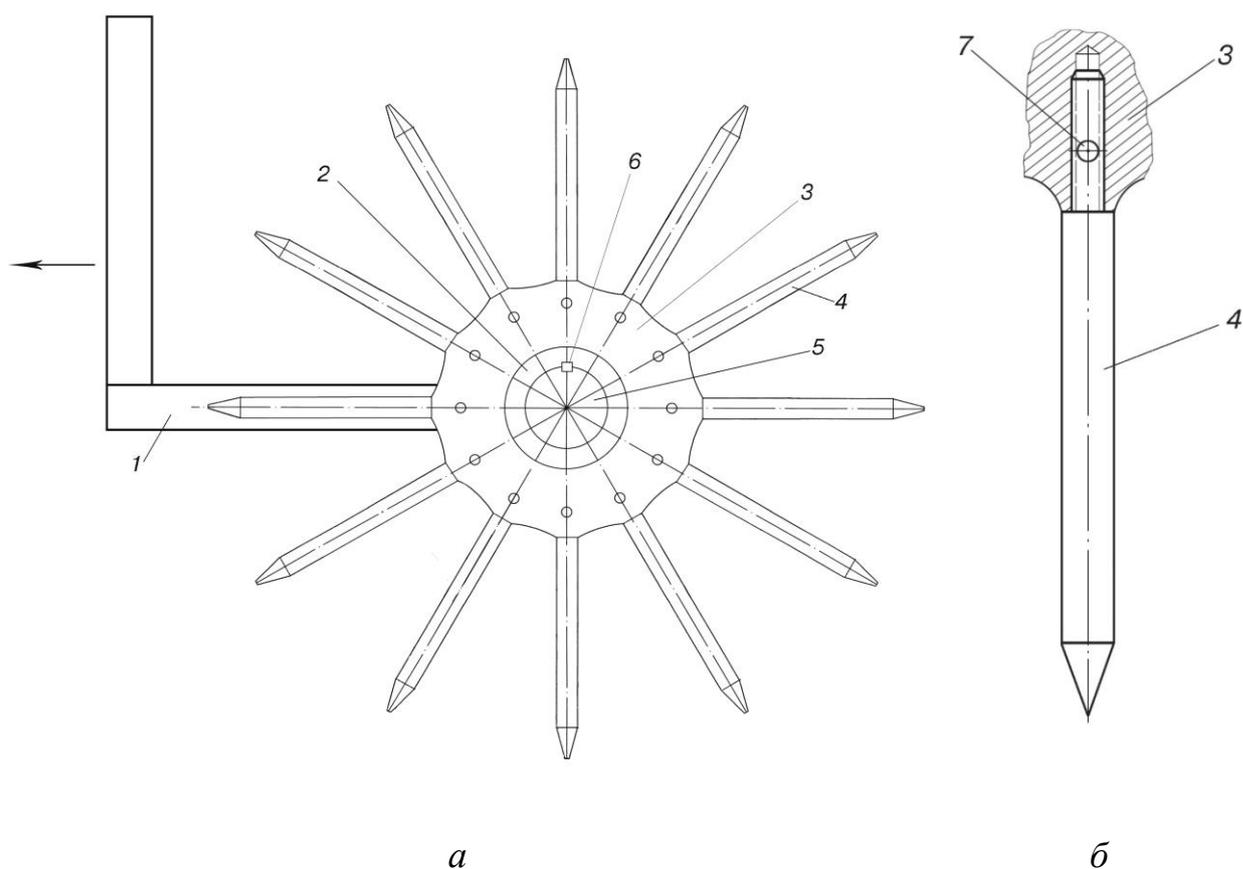
## ГЛАВА 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИГОЛЬЧАТЫХ БОРОН

#### 2.1. Описание разработанных игольчатых борон

Разработанные нами игольчатые бороны относятся к боронам, которые представляют собой известные конструкции, осуществляющие перекачивание в продольно-вертикальной плоскости. По числу дисков с иглами нами разработаны одно- и двухдисковые бороны, при соединении которых может быть образована многодисковая борона.

Схема однодисковой бороны изображена на рис. 2.1, где *а* – вид сбоку, *б* – изображение игл и их крепление на диске.



(увеличен в два раза)

Рисунок 2.1 – Схематичное изображение игольчатой бороны: *1* – рама, *2* – ступица, *3* – диск, *4* – игла, *5* – вал, *6* – шпонка, *7* – стопорный винт

Игольчатая борона имеет раму 1, ступицу 2, диск 3 и иглы 4. Ступица 2 крепится на валу 5 бороны с помощью шпонки 6. Каждый диск имеет отверстия для игл 4. Диск 3, выполненный в виде плоской фигуры с торцевыми отверстиями по всему его контуру на одинаковом расстоянии один от одного; в этих отверстиях нарезана резьба. Каждая игла 4 имеет цилиндрическую форму с конусным концом с одной стороны, а на другом конце иглы нарезана резьба такого же калибра, как резьба в торцевых отверстиях ступицы иглы. Иглы своей резьбовой частью ввинчиваются в отверстия контура диска и стопорятся с помощью стопорного винта 7.

Число игл по контуру должно быть таким, чтобы расстояние между концами игл было одинаковым, т.е. чтобы угол между соседними иглами был один и тот же. Чаще всего устанавливается угол между иглами 30 градусов, но может быть и больше, например – 45 градусов. Игольчатая борона работает следующим образом.

При работе агрегата на поле нижние концы игл под действием массы бороны заглубляются в почву и прокалывают ее. При трогании агрегата с места нижние концы игл остаются в почве, а диски с прикрепленными к ним иглами, начинают перекатывание, двигаясь вперед, при этом иглы прокалывают почву на своем пути. Таким образом, работает агрегат. На данное устройство получен патент Украины на полезную модель (№ 77789 от 25.02.2013 г.).

Недостатком данной однодисковой бороны является неодинаковое воздействие игл на почву в местах его прокалывания. В местах, где почва ближе к игле, имеет место наибольшая глубина прокалывания почвы, а в местах, где поверхность почвы отдалена от иглы, имеет место недостаточное прокалывание, как по глубине, так и по ширине участка, который обрабатывается. Анализ данного явления показывает, что для улучшения воздействия игл на почву в местах ее прокалывания необходимо, чтобы в первом диске с иглами, угол между которыми равняется  $\alpha$ , и в другом диске, который размещен рядом с первым диском (т.е. параллельно первому диску), иглы также находились между собой под углом  $\alpha$ , однако эти иглы вместе с диском должны быть повернуты в направлении движения дисков (или против направления движения этих дисков) на угол  $\alpha/2$ . В этом случае при работе машины иглы одного диска сразу заглубляются в почву, а иглы диска, движущегося рядом, опускаются в почву лишь через некоторое время, пока этот диск повернется на угол  $\alpha/2$  и опустит иглы в почву при условии, когда справа (или слева) не действуют силы соседних дисков. Тем самым можно улучшить воздействие (т.е. повысить равномерность воздействия) игл на почву.

Во время конструирования двухдисковой бороны была поставлена задача путем изменения конструкции игольчатой бороны обеспечить повышения равномерности воздействия игл на поверхность почвы. Разработанная двухдисковая борона схематично изображена на рис. 2.2 и 2.3. Она состоит из рамы 1, вала 2, ступицы 3, левого диска 4, правого диска 5 и игл 6. Ступица 3 выполнена в виде втулки, к которой жестко приделаны круглые диски – левый 4 и правый 5. В торцах дисков левого 4 и правого 5 просверлено по 12 отверстий с одинаковым шагом, в которых нарезана резьба. В отверстия закручиваются иглы 6, которые стопорятся винтами 7. При жестком соединении ступицы 3 с дисками 4 и 5, диск 4 устанавливается со смещением на угол  $\alpha/2$  (вперед или назад) в сравнении с установленным диском 5. Двухдисковая игольчатая борона работает следующим образом.

При контакте агрегата (с бороной) с почвой, иглы под действием веса машины, прокалывают и заглубляются в нее. При движении агрегата нижние концы игл остаются в почве, но сами диски с иглами вращаются и прокалывают почву по пути их движения.

У игл бороны много параметров, но главный из них – это половина угла при вершине конуса, удвоенный тангенс, который представляет собой его конусность.

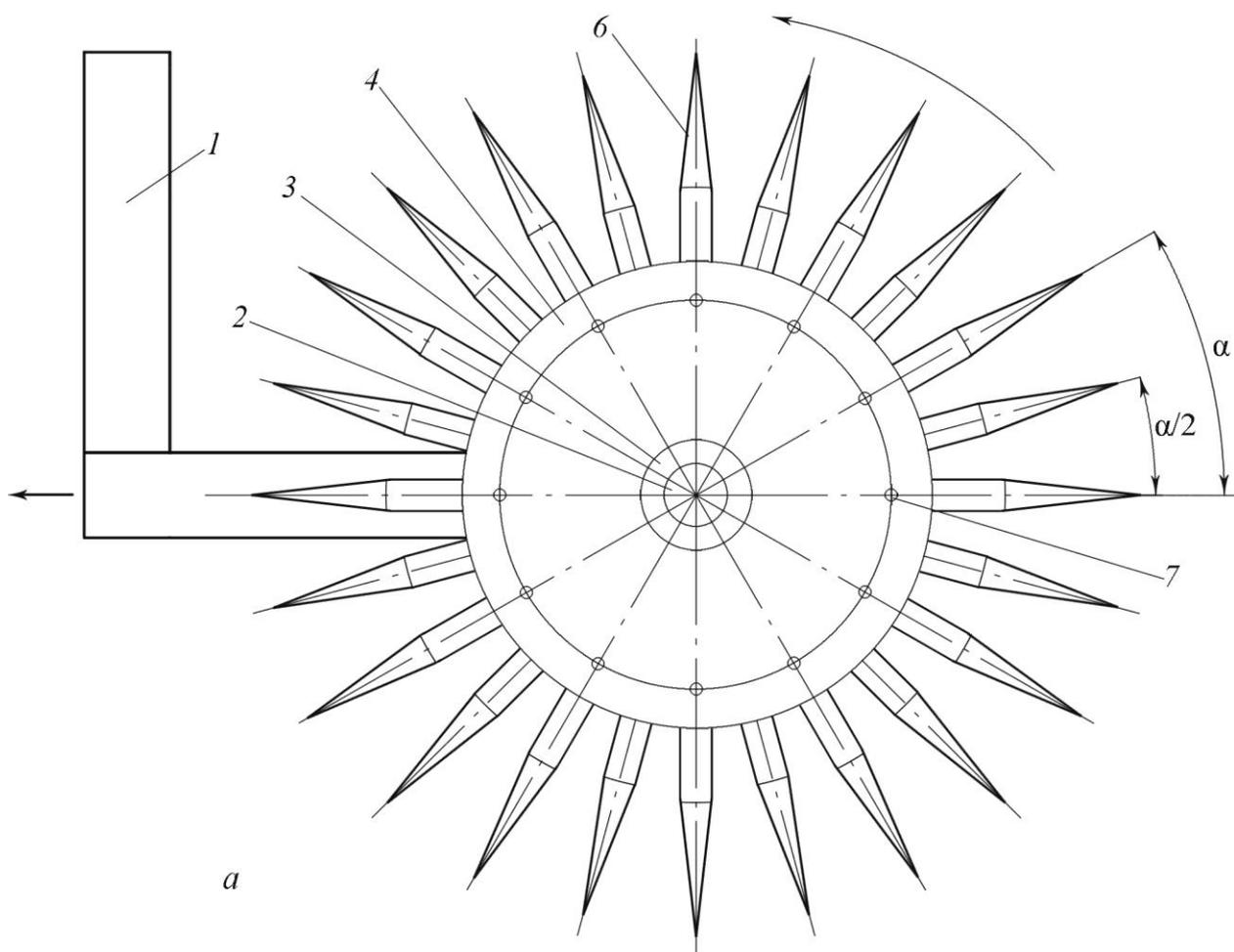


Рисунок 2.2 – Вид двухдисковой бороны слева (а) и спереди (б): 1 – рама, 2 – вал, 3 – ступица, 4 – левый диск, 5 – правый диск, 6 – игла, 7 – стопорный винт

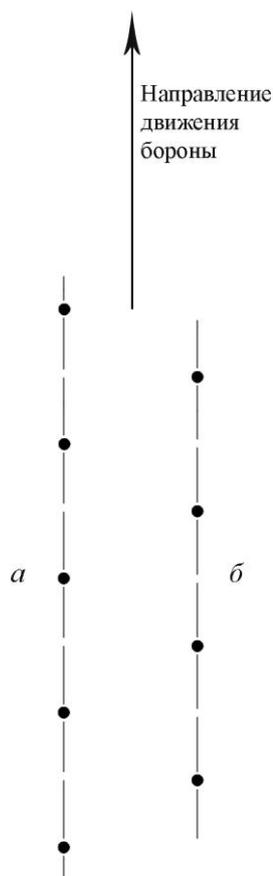


Рисунок 2.3 – Положение на поле точек, изображающих проколыпочвыиголками двухдисковой бороны: *a* – прокол иглами левого диска, *б* – прокол иглами правого диска

На рис. 2.4 показаны три конуса игл, в пределах которых может находиться названный угол. Основные параметры бороны, кроме указанного угла, следующие: диаметр диска с иглами, длина иглы, диаметр цилиндрической части иглы, высота конической части иглы и угол между двумя соседними иглами диска.

Обоснование и определение этих и других параметров бороны будет изложено в следующих пунктах.

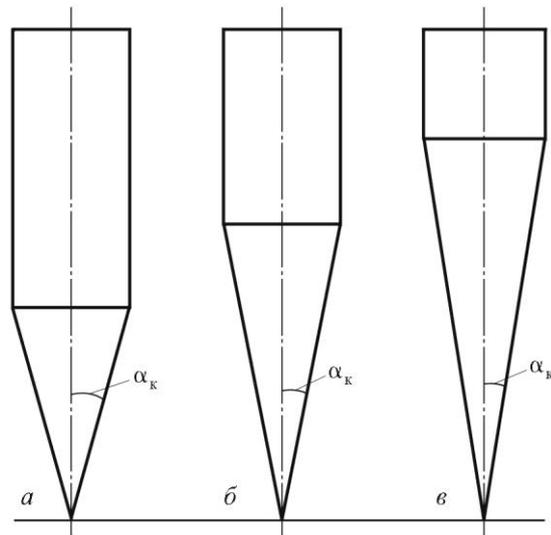


Рисунок 2.4 – Схемы заострения игл: *a* – игла менее острая, *б* – игла среднеострая, *в* – игла более острая

## 2.2. Исследование движения игольчатой бороны по почве

Секция игольчатой бороны состоит из ряда дисков (рис. 2.1,а), оси которых жестко связаны одна с другой. Каждый диск имеет ступицу, ось, втулку и иглы, жестко соединенные со ступицей. Игла представляет собой радиально закрепленный на диске прямолинейный стержень, форма которого в средней части близка к цилиндрической; в концевой части каждая игла выполнена в виде конуса и заканчивается заострением. При движении дисков с иглами конец каждой иглы описывает в воздухе циклоиду.

Во время движения бороны каждый диск с иглами вращается вокруг своей оси, которая в свою очередь жестко связана с общим держателем осей для всех дисков, движется на одинаковой высоте от поверхности почвы. Так работает борона при жесткой связи осей дисков одна с одной. Если же рассматривать движение отдельного диска, ось которого не связана с общим держателем осей, то характер его движения изменяется. Рассмотрим сначала такое движение при небольшом заглублении игл в почву.

Пусть диск с иглами, ось которого не связана с осями других дисков (рис. 2.5), движется влево по ровной однородной почве, не содержащей

твердые включения (камни). Скорость его центра тяжести обозначим  $v_c$ . Под действием силы тяжести диска  $G$  одна из игл заглубляется в почву на глубину  $h_0$ . В начале движения машины, игла, опустившаяся в почву, может задержаться, и какая-то из ее точек станет мгновенным центром вращения (это точка, скорость которой в данный момент равняется нулю). Пусть этим мгновенным центром вращения будет нижняя точка  $C_v$ . Обоснование, что точка  $C_v$  стала мгновенным центром следующее: эта точка находится в почве глубоко и ей тяжело быстро менять свое положение.

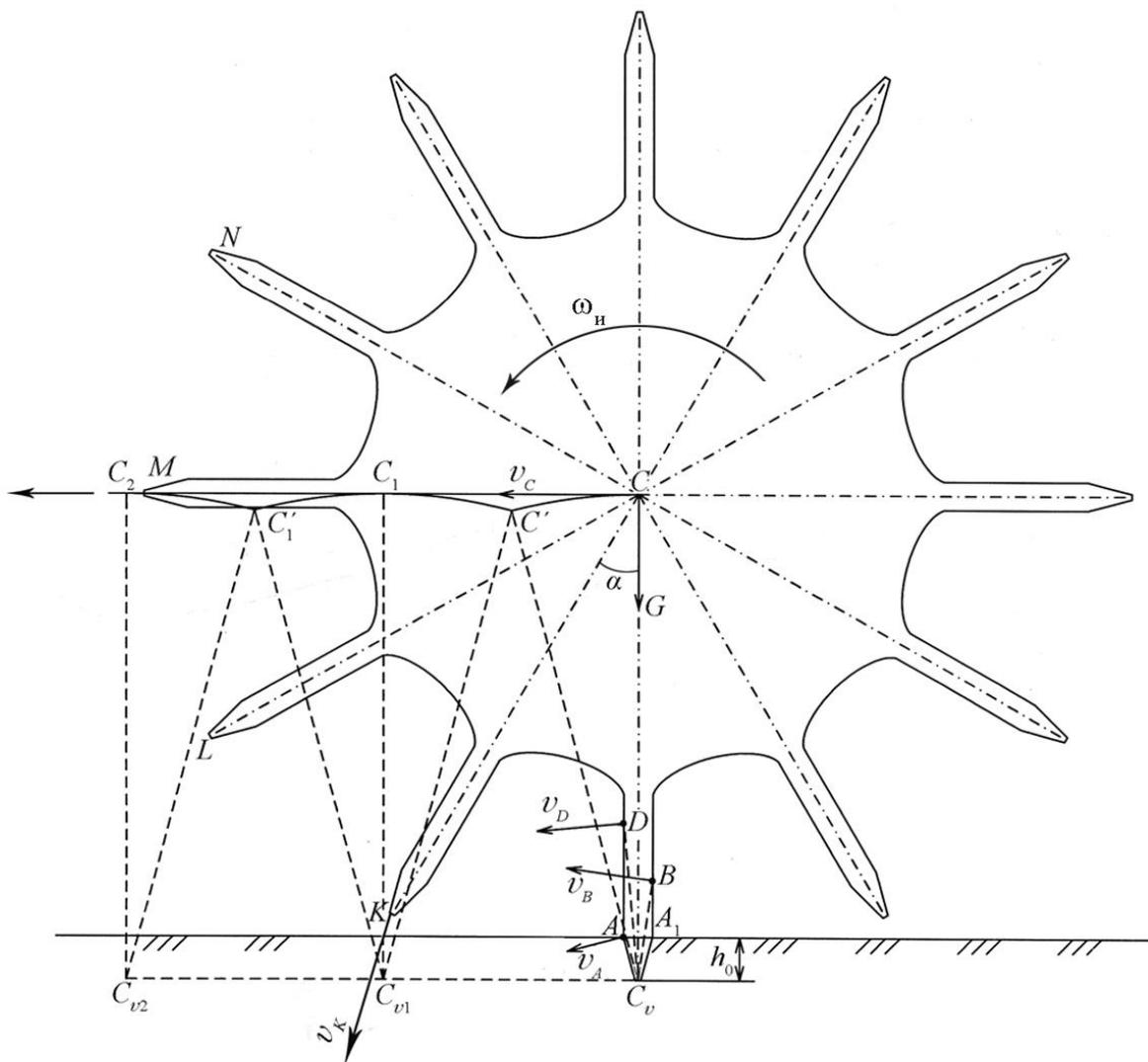


Рисунок 2.5 – Схема к анализу движения по полю диска игольчатой борони, ось которого не связана с осями других дисков, а глубина заглубления игл незначительна

Если точка  $C_v$  является мгновенным центром вращения, то радиусом поворота будет линия  $CC_v$  и угловая скорость иглы  $\omega_{и}$  будет равняться:

$$\omega_{и} = \frac{v_C}{CC_v}, \quad (2.1)$$

где  $CC_v$  – расстояние от точки  $C$  до точки  $C_v$ .

Во время движения диска влево все его точки (кроме  $C_v$ ) также будут осуществлять движение: точка  $D$  приобретает скорость  $v_D$ , точка  $B$  приобретает скорость  $v_B$  точка  $A$  будет иметь скорость  $v_A$ ; эти скорости будут равняться:

$$\begin{aligned} v_D &= \omega_{и} (C_v D); \\ v_B &= \omega_{и} (C_v B); \\ v_A &= \omega_{и} (C_v A), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $C_v D$  – расстояние  $C_v D$ ,  $C_v B$  – расстояние  $C_v B$ , а  $C_v A$  – расстояние  $C_v A$  (расстояния  $C_v D$ ,  $C_v B$ , и  $C_v A$  – это радиусы вращения точек  $C$ ,  $B$  и  $A$ ).

Векторы этих скоростей показаны на рис. 2.5 (они перпендикулярны радиусам вращения). Из представленных данных видно, что чем больше расстояние от точки  $C_v$  до точки иглы, что рассматривается, тем больше ее скорость.

Если иметь ввиду, что положение точки  $C_v$  некоторое время не изменяется во время движения машины, то во время движения центра  $C$  влево этот центр должен будет опуститься, что видно из рис. 2.5, на котором показано новое положение иглы  $C_v C'$  при перемещении центра  $C$  влево до точки  $C'$ . Дуга  $CC'$  – это траектория движения точки  $C$  в начале перехода иглы  $C_v C$  вместе с диском бороны из положения  $C_v C$  в положение  $C_v C'$ .

За время этого перехода игла  $KC$ , что оказалась впереди иглы  $C_v C$  также повернется вместе с диском вокруг точки  $C_v$  против часовой стрелки, при этом точка  $K$  (конец иглы  $CK$ , что находится впереди) пройдет со

скоростью  $v_K$ , что равняется  $\omega_{и}$ , помноженной на расстояние  $КС_v$ , в точке  $C_{v1}$  (тут  $C_{v1}$  – положение мгновенного центра вращения иглы  $СК$  в конце поворота вокруг точки  $C_v$ ) останется в этом месте ( $C_{v1}$ ) в почве.

Как только игла  $C'K$  начнет поворачиваться вокруг точки  $C_{v1}$ , она (игла) выйдет с положения  $C_vC'$  вверх и влево, точка  $C'$  (центр диска) вместе с верхней частью иглы  $C_{v1}C'$  направится влево и вверх в точку  $C_1$ ; туда же придет центр  $C$  диска после того, как игла  $КС$  приобретет вертикальное положение  $C_{v1}C_1$ , т.е. точка  $C'$  перейдет в положение  $C_1$ .

При дальнейшем движении машины с иглой  $КС_1$ , которая заняла вертикальное положение  $C_{v1}C_1$  начнется тоже самое, как уже произошло с иглой  $C_vC$ , а именно, произойдет поворот иглы вокруг точки  $C_{v1}$  с движением точки  $C_1$  по дуге  $C_1C_1'$ , которую опишет эта точка  $C_1$  при дальнейшем движении диска (рис. 2.5). При этом центр игольчатого диска  $C$  придет в точку  $C_1'$ , а с иглой  $LC$ , что следует за иглой  $КС$ , будет происходить тоже самое, как раньше произошло с иглой  $КС$ , а до этого – с иглой  $C_vC$ .

Таким образом, движение центра  $C$  отдельного диска не является движением по прямой линии. Это движение состоит из ряда колебаний вниз по траекториям  $СС', C_1C_1'$  и др. и вверх по траекториям, как  $C'C_1, C_1'C_2$  и т.д. Заглубление иглы в почву произойдет через каждые  $30^\circ$  поворота диска с иглами при длине круга концов этого диска с иглами, что равняется  $3,14 \cdot 2 \cdot 144 \approx 904$  мм (тут 144 мм – это принятый для расчета радиус круга, который обозначим  $r_{дг}$ ); заглубление в почву игл будут происходить через каждые  $904/12 \approx 75$  мм пути.

Описанные выше колебания (вниз и вверх) во время движения центра  $C$  диска, когда его ось не связана с осями других дисков, имеют место не только при небольшой глубине  $h_0$  заглубления игл, но и при большом заглублении игл в почву.

Как видно из рис. 2.5, при повороте диска на  $360^\circ$  нижние точки  $K, L, M, N$  и другие точки иглы опишут 12 таких хорд круга радиусом  $СС_v$  как  $C_vK, KL$  и др. Расстояние  $C_vC_{v1}$  (оно же равняется расстоянию  $C_{v1}C_{v2}$  или  $KL$ )

является основой равнобедренного треугольника и равняется (с учетом того, что угол  $C_vCK$ , обозначенный  $\alpha$ ):

$$C_vC_{v1} = 2(CC_v)\sin(\alpha/2). \quad (2.3)$$

Общая длина  $L_k$  12-ти таких хорд составляет, учитывая, что радиус  $CC_v$  обозначенный  $r_{дг}$ :

$$L_k = 12(C_vK) = 24 r_{дг} \sin(\alpha/2). \quad (2.4)$$

При угле  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\sin(\alpha/2) = 0,2588$ , а длина  $L_k$  контура, что объединяет концы всех игл, составляет:

$$L_k = 24r_{дг} 0,2588 = 6,2112 r_{дг}. \quad (2.5)$$

Длина  $L_0$  круга радиусом  $r_{дг}$  равняется  $2\pi r_{дг} = 6,2831 \cdot r_{дг}$ . Мы видим, что величина  $L_k$  меньше  $2\pi r_{дг}$  на  $0,0719r_{дг}$ . В процентном отношении это уменьшение составляет  $\frac{0,0719}{6,2831} 100 \approx 1,14\%$ . Это небольшое отклонение от длины круга радиусом  $r_{дг}$ .

В общем случае, если у диска есть  $n_\Gamma$  игл, то угол  $\alpha$  между иглами составляет  $360/n_\Gamma$  или  $2\pi/n_\Gamma$  радиан. Тогда длина контура  $L_k$  будет:

$$L_k = 2n_\Gamma r_{дг} \sin(\alpha/2) = 2n_\Gamma r_{дг} \sin(\pi/n_\Gamma); \quad (2.6)$$

если  $\alpha$  дано в радианах

$$L_k = 2n_\Gamma r_{дг} \sin(\alpha/2) = 2n_\Gamma r_{дг} \sin(180/n_\Gamma). \quad (2.6)$$

если  $\alpha$  дано в градусах

Следует отметить, что радиус диска с иглами  $r_{дг}$  равняется сумме

$$r_{дг} = r_d + l_\Gamma, \quad (2.7)$$

где  $r_d$  – радиус диска,  $l_\Gamma$  – длина иглы без резьбовой части (рис. 2.1,б).

Рассмотрим теперь движение диска, ось которого входит в состав пяти дисков с осями, жестко связанными с общим держателем осей, благодаря

чему все диски движутся в том направлении и на той же высоте, что и держатель. Эта схема приведена на рис. 2.6.

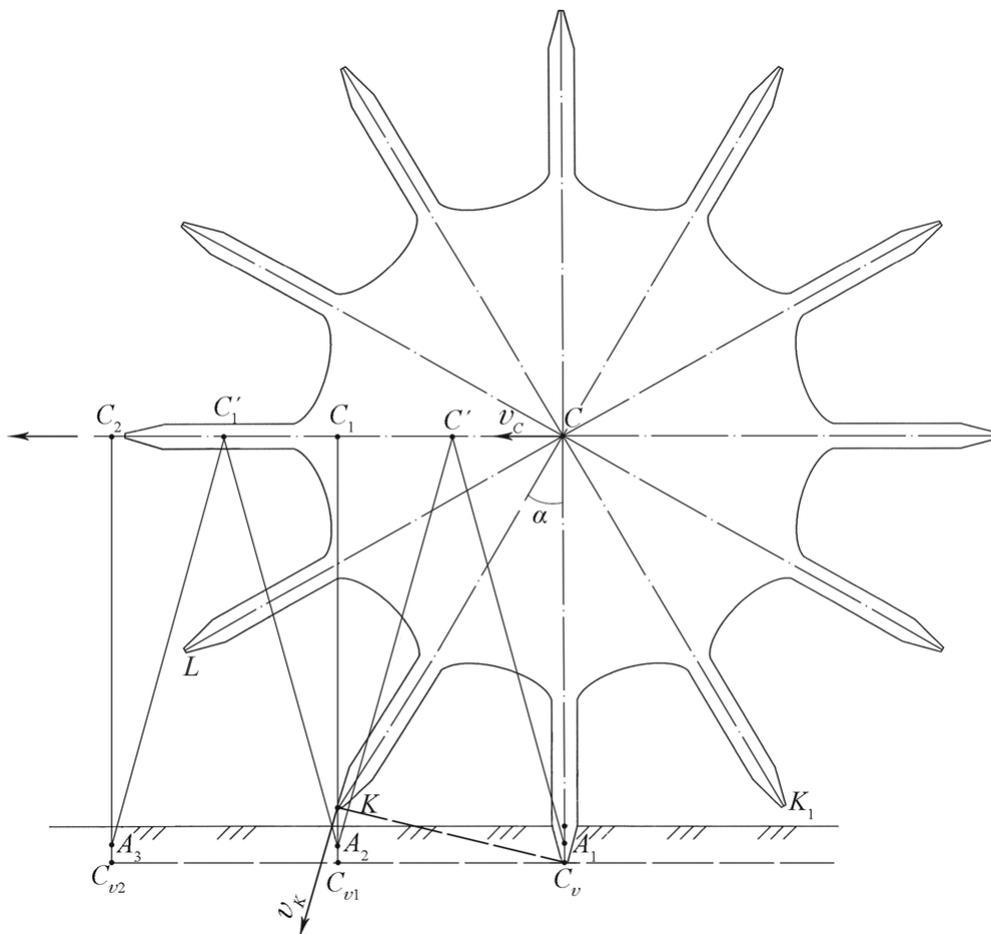


Рисунок 2.6 – Схема к анализу движения по полю диска игольчатой бороны, ось которого связана сосями других дисков, а глубина заглабления игл незначительна

Пусть диск с центром  $C$  перемещается вместе с другими дисками, движется так, что скорость  $v_c$  центра  $C$  направлена по горизонтали, а глубина заглабления игл незначительная. В начале радиус  $CC_v$  вертикальный, а точка  $C_v$  (мгновенный центр вращения) находится в нижней точке вертикальной иглы  $CC_v$ . При движении центра  $C$  по горизонтали влево, влево направится верхняя часть иглы  $CA_1$ , точка  $C$  останется на ровной линии  $CC'C_1C_1'C_2$ , а нижний конец иглы  $CA_1$  будет выходить с почвенного заглабления возле

точки  $C_v$  и поднимется вверх сперва на небольшую высоту  $C_v A_1$ , ввиду чего можно считать, что точка  $A_1$  осталась на линии  $C_v C$ , хотя в действительности она (точка  $A_1$ ) стала немного левее этой линии  $C_v C$  на высоте  $C_v A_1$ , т.е. будет иметь место приблизительное равенство  $CC_v \approx C'A_1$ .

Одновременно повернется влево весь диск с иглой  $A_1 C$ , которая займет положение  $A_1 C'$ ; также одновременно повернется вниз игла  $CK$  и опустится также вниз точка  $K$  иглы  $CK$ . При дальнейшем движении влево центра точка  $K$  опустится вниз в положение  $A_2$ , а потом игла  $CK$  займет вертикальное положение  $C_1 C_{v1}$ , при этом  $C_1 C_{v1} \approx C'A_2$ .

При дальнейшем движении центра  $C$  влево будет иметь место повторение событий, а сам центр  $C$  подойдет к положению  $C_1'$ , при этом нижний конец  $K$  иглы  $CK$  выйдет с положения точки  $C_{v1}$  в почву, до этого времени игла  $CL$  опустится вниз и точка  $L$  будет приближаться к точке  $A_3$ , а потом и к точке  $C_{v2}$ . В тоже время, когда центр  $C$  подойдет к положению  $C_2$ , конец  $L$  иглы опустится в почвенное заглубление, где находятся точки  $A_3$  и  $C_{v2}$ , а в момент, когда центр  $C$  будет в положении  $C_2$  игла  $KL$  займет вертикальное положение  $C_2 C_{v2}$ .

Из приведенных на рис. 2.6 данных видно, что движение центра  $C$  имеет место по прямой  $CC'C_1 C_1' C_2$ , а нижние точки  $A_1, A_2, A_3$  игл  $CC_v, CK$  и  $CL$  опускаются на полную глубину в почву лишь в тех случаях, когда иглы занимают такие вертикальные положения, как  $CC_v$  или  $C_1 C_{v1}$  или  $C_2 C_{v2}$  и т.д.

И в первом (рис. 2.5) и в другом случае (рис. 2.6) иглы в положении близком к вертикальному, опускаются в почву и заглубляются в нее.

На рис. 2.7 показано движение по почве диска с иглами при большой глубине их заглубления. Из схемы видно, что характер перекачивания по почве диска с иглами мало изменяется, однако возрастает нагрузка на иглы, которые разрушают значительно большее количество почвенных частиц, чем в случаях, представленных на рис. 2.5 и 2.6.

Из рис. 2.7 видно, что вектор  $v_K$  скорости точки  $K$  иглы, направленный под углом  $\beta$  к вертикали. Угол  $\beta$  влияет на условия прокалывания почвы. Определим его.

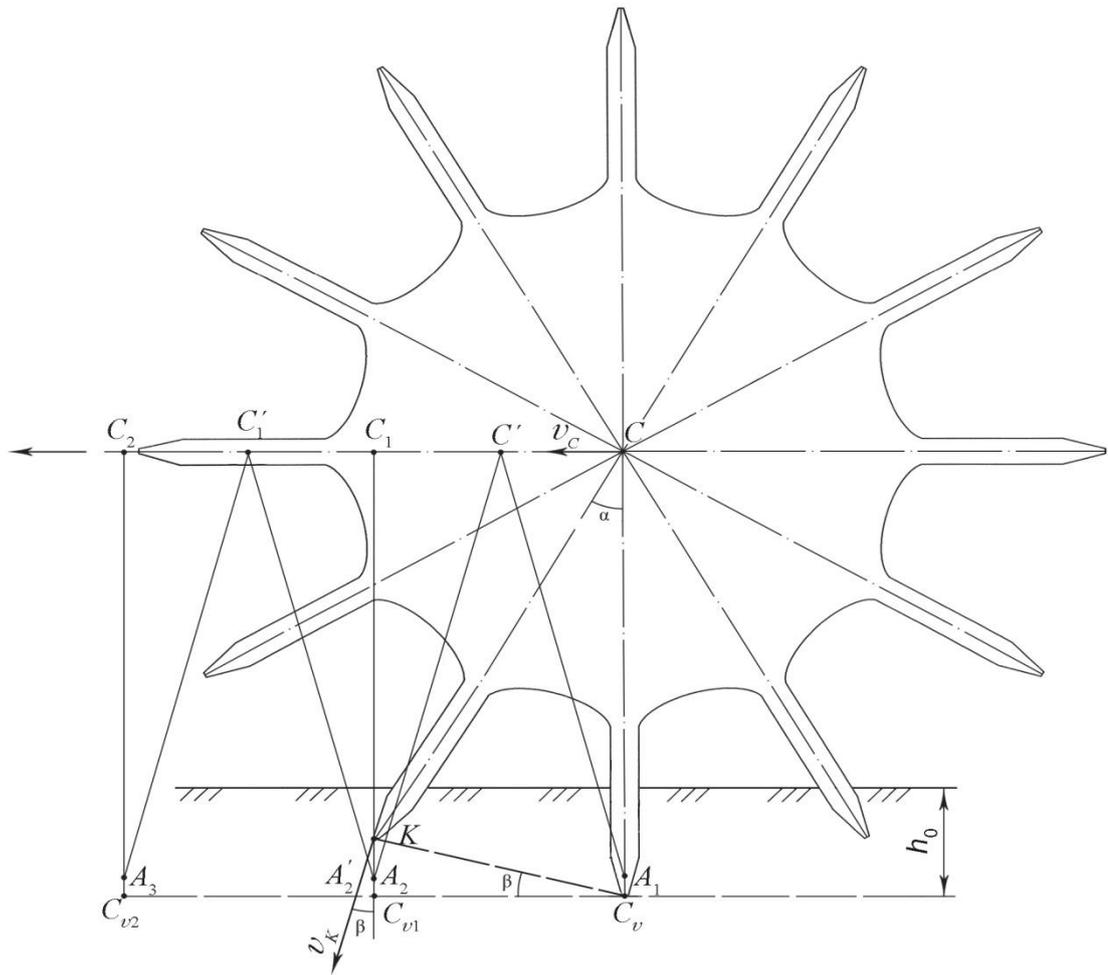


Рисунок 2.7 – Схема к анализу движения по полю диска игольчатой бороны, ось которого связана с осями других дисков, а глубина заглубления игл значительная

Рассматривая прямоугольные треугольники  $C_vKC_{v1}$  и  $C_vKA_2'$ , видим, что они подобны, а углы  $KC_vC_{v1}$  и  $A_2'KC_{v1}$  равняются  $\beta$ . Тангенс угла  $\beta$  равняется

$\frac{KC_{v1}}{C_{v1}C_v}$ , тогда

$$\beta = \arctg \frac{KC_{v1}}{C_{v1}C_v}, \quad (2.8)$$

где  $KC_{v1}$  – высота конца  $K$  иглы  $KC$  над линией  $C_{v2}C_{v1}C_v$ , а  $C_{v1}C_v$  – расстояние от точки  $C_{v1}$  до точки  $C_v$ .

При работе бороны нужно, чтобы скорость  $v_K$  в момент начала прокола почвы не была отклонена от вертикали, а если и отклонена, то на довольно небольшой угол  $\beta$  (про который говорилось выше). Учитывая, что расстояние  $C_vC = r_{\text{дг}}$ , где  $r_{\text{дг}}$  – радиус диска бороны с иглами, а угол  $KCC_v$  равняется  $\alpha$  (рис. 2), то из треугольника  $KCC_v$  получаем:

$$KC_v = 2r_{\text{дг}} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  – угол между иглами  $CK$  и  $CC_v$ .

Обозначим расстояние  $KC_{v1}$  через  $h_K$  (т.е.  $h_K$  – это высота точки  $K$  над линией  $C_{v2}C_{v1}C_v$ ), тогда

$$h_K = \sqrt{(KC_v)^2 - (C_{v1}C_v)^2}. \quad (2.10)$$

Так как  $h_K = (KC_v)\sin\beta$ , а  $C_{v1}C_v = (KC_v)\cos\beta$ , то в результате проведения дальнейших расчетов принимаем:

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \left[ \frac{h_K}{2r_{\text{дг}} \sin \frac{\alpha}{2}} \right]^2}. \quad (2.11)$$

С полученного равенства видно, что чем меньше  $h_K$ , тем меньше угол  $\beta$ . При уменьшении  $h_K$  до 0 угол  $\beta$  также зануляется, а скорость  $v_K$  будет направлена по вертикали вниз, т.е. прокалывание почвы будет осуществляться по вертикали.

А нам это и нужно, так как при таком прокалывании почвы силы трения иглы с почвой будут меньшими, чем при угле  $\beta$  больше нуля; улучшится также качество обработки почвы.

### 2.3. Влияние размещения дисков игольчатой бороны на их давление на почву

Во время движения бороны каждый диск вращается вокруг своей оси, которая в свою очередь жестко связана с общим держателем осей дисков и движется вместе с другими дисками на одинаковой высоте над поверхностью почвы. Во время движения дисков конец каждой иглы описывает циклоиду.

Каждая игла состоит из цилиндрической и конической частей (рис. 2.8). Заглубление игл в почву происходит под действием силы тяжести дисков. На рис. 2.8 приведено заглубление конической части иглы (при небольшой силе давления игл на почву) и заглубление трех головок в почву от его поверхности  $D_1DD_2$  (при большой силе давления на почву).

Движение диска бороны, являющегося ведомым рабочим органом (рис. 2.8), осуществляется под действием горизонтально приложенной к центру  $C$  диска силы  $P_0$ . Диск давит на почву с силой  $G$ , которая приложена в центре  $C$  и действует вертикально вниз. На действие силы  $G$  почва отвечает вертикальной силой реакции  $N$ , что приложена в некоторой точке  $A$  иглы левее вертикальной оси  $CB$  и направлена вверх. На действие разрушающей силы  $P_0$  почва отвечает горизонтальной реакцией  $X$ , которая приложена в той же точке  $A$  и действует по горизонтали вправо. Силы  $G$  и  $N$  создают пару сил с плечом, что равняется примерно половине толщины иглы. Момент этой пары является моментом опоры. Для преодоления этого момента при движении диска в упомянутой точке  $A$  действует, как уже указывалось, горизонтальная сила реакции  $X$ , которая вместе с разрушающей силой  $P_0$  создает разрушающую пару сил с плечом от точки  $A$  до линии действия силы  $P_0$ . На рис. 2.8 с центра  $C$  проведены ось  $y$  и влево ось  $x$ . Точка  $A$  на игле смещена относительно упомянутой оси  $y$  вперед на некоторое расстояние, которое является плечом пары сил  $G$  и  $N$ . При большом усилии  $G$  иглы заглубляются на значительную глубину от линии  $D_1DD_2$ , учитывая, что

глубина заглубления игл будет  $DB$  (рис. 2.8), при этом в почву могут заглубиться и концы  $K$  и  $K_1$  соседних игл.

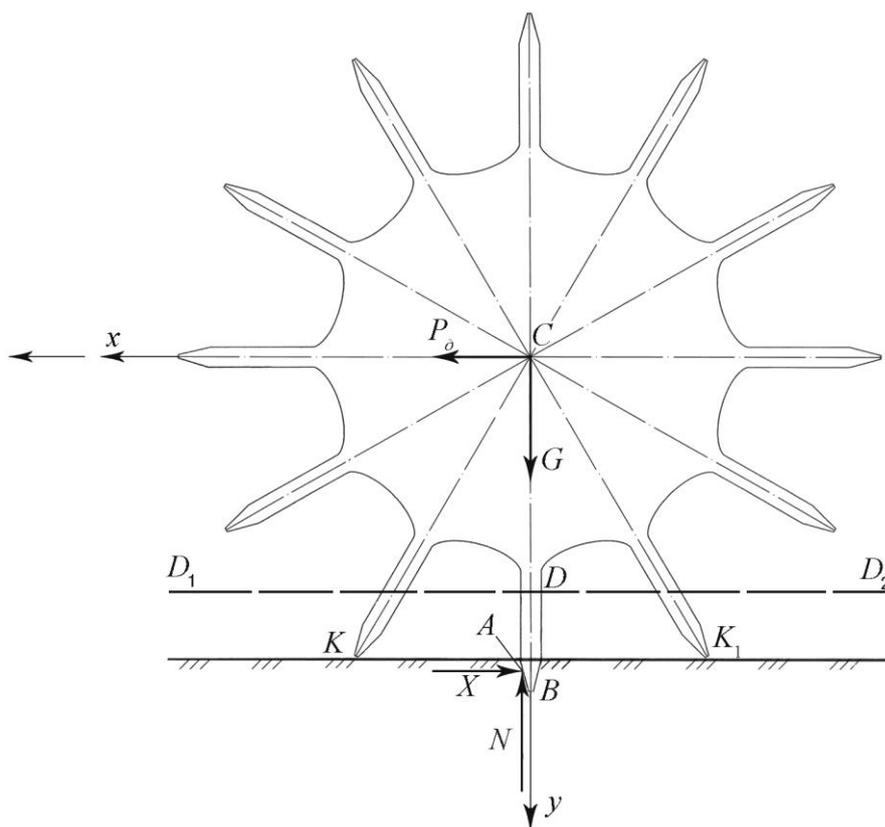


Рисунок 2.8 – Схема, иллюстрирующая положение отдельного диска сиглами при действии на него разрушающей силы  $P_\delta$  и силы тяжести  $G$  при условии различной глубины заглубления игл в почву

Познакомившись с действующими на иглы и диск силами, полнее проанализируем влияние размещения дисков в агрегате на усилие, с которым иглы давят на почву.

Результат работы бороны зависит от степени синхронизации действия игл разных дисков на почву. Так, если нижние иглы пяти дисков одновременно опускаются в почву, будет одновременное прокалывание

поверхности почвы этими иглами, а давление при этом равняется сопротивлению почвы заглублению в него игл. Если иглы разных дисков не опускаются в почву одновременно, то будет поочередное заглубление игл разных дисков в почву, при этом давление при прокалывании будет равняться сопротивлению почвы, но прокалывание почвы будет иметь случайный характер и зависеть от положения дисков и игл один относительно другого перед прокалыванием.

При синхронной работе разных дисков, т.е. в случае, когда иглы отдельных дисков одновременно заглубляются в почву и прокалывают ее, иглы других дисков также могут заглубляться в почву и выходить из нее.

Положение игл дисков одной секции для их синхронной работы представлено на рис. 2.9. На этой схеме диски с иглами секций обозначены цифрами 1, 2, 3, 4 и 5, силы давления дисков 1, 2, 3, 4 и 5 на почву соответственно –  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  и  $G_5$ , эти силы изображены ниже дисков секций, начинаются они в точках  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$ , на горизонтальную площадь они (эти силы) проектируются в точки, которые обозначены  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $d'$  и  $e'$ . Силы  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  и  $G_5$  представляют собой систему параллельных сил, из них проекции сил  $G_2$  и  $G_3$  на рис. 2.9, а совпадают и действуют по одной прямой от точки  $c$ , а на рис. 2.9, б они действуют в точках  $b'$  и  $c'$ . Принимаем, что центры тяжести дисков находятся на пересечении осей вращения их окружностей (на вертикальной проекции) с вертикальными площадями симметрии дисков.

Добавлением сил  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$  по правилу добавления параллельных сил находим равнодействующую силу  $G_{1,3}$ , добавлением сил  $G_4$  и  $G_5$  – их равнодействующую  $G_{4,5}$ , а добавлением сил  $G_{1,3}$  и  $G_{4,5}$  силу давления всех пяти дисков на почву. Кроме дисков с иглами есть еще держатель осей и кронштейн, однако вес этих составляющих незначителен и им можно пренебречь. Тогда сила давления секции на почву будет  $G_{1-5}$ . Проекция точки центра тяжести секции на поверхность почвы  $S$ . Как уже отмечалось, положение дисков секции для их синхронной работы отвечает их положению

на рис. 2.9. Кроме этого, при сборке дисков их секции можно размещать таким образом, чтобы иглы одного диска осуществляли прокалывание почвы в момент времени, который не совпадал бы со временем прокалывания почвы иглами второго, третьего, четвертого или пятого дисков. При таких условиях виды этих дисков сбоку будут отличаться от вида, представленного на рис. 2.9. Таких вариантов размещения дисков один относительно другого для несинхронной их работы может быть много.

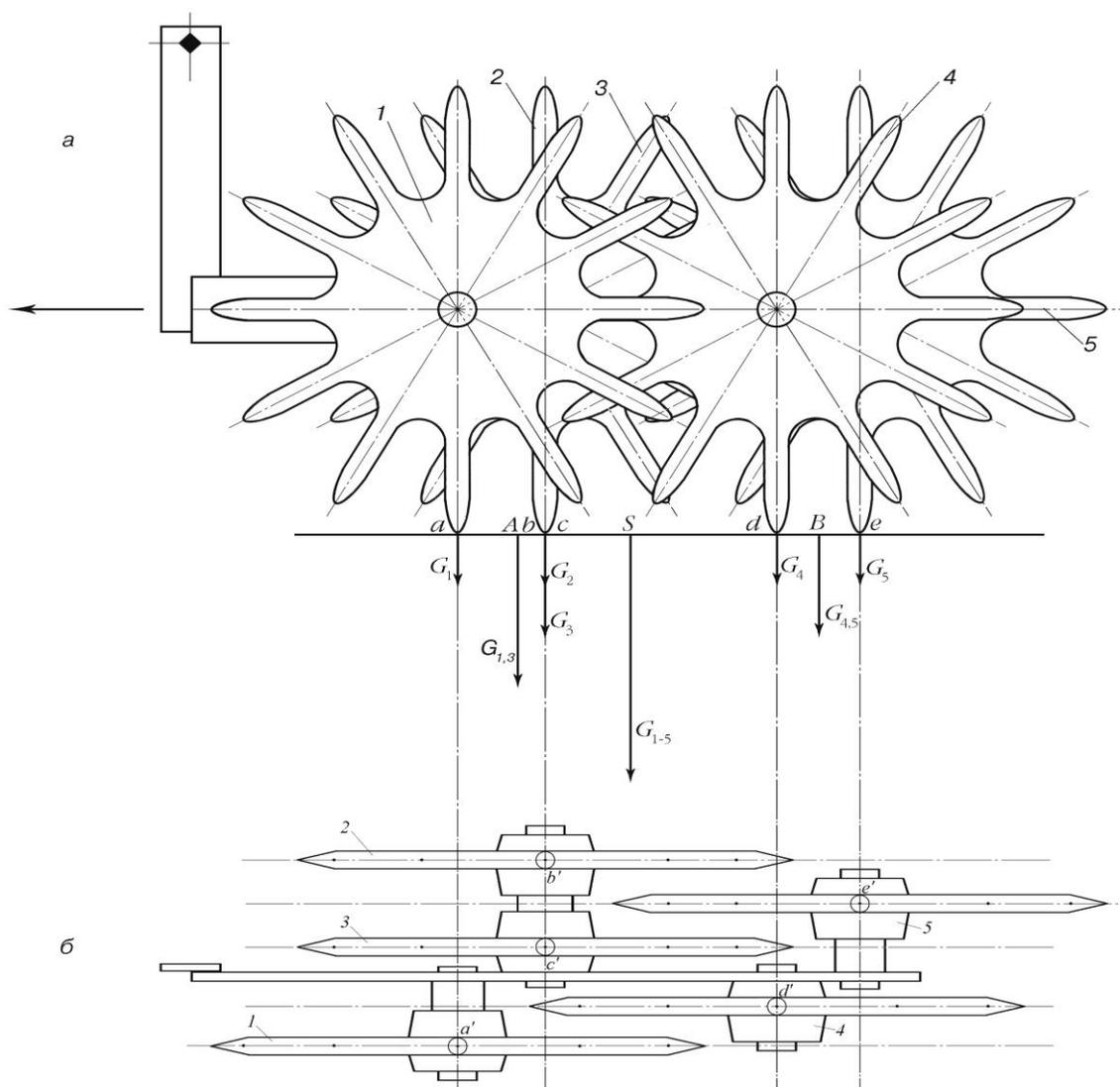


Рисунок 2.9 – Схема секций игольчатой бороны (вид сбоку – *a*, сверху – *б*) и сил, действующих на почву: 1, 2, 3, 4 и 5 – номер диска (на горизонтальной проекции точками *a'*, *b'*, *c'*, *d'*, и *e'* отмечены положения концов игл)

Отметим, что в случае использования бороны с синхронной работой дисков в секции и незначительных значений сил тяжести дисков с иглами, поворот дисков на  $30^\circ$  будет приводить к возникновению пяти одновременных проколов почвы, а в остальное время проколов почвы не будет. При такой работе бороны и жесткой связи между осями дисков сила, действующая на иглы во время их заглубления в почву, равняется силе тяжести секции, а на каждый диск (и таким образом, иглу) будет действовать сила, которая равняется силе тяжести секции, поделенной на 5.

Назовем угол поворота диска для прокалывания иглой почвы и выхода из нее углом прокалывания. В существующих боронах теоретически этот угол равняется  $30^\circ$ , из которых половина используется на заглубление иглы в почву, а другая половина – для выхода из нее. В общем случае этот угол может быть другим, например,  $36^\circ$  или  $45^\circ$ . При таких условиях прокалывание будет происходить при повороте иглы на  $18^\circ$  или  $22,5^\circ$ , а выход иглы из почвы – соответственно при тех же углах ( $18^\circ$  или  $22,5^\circ$ ). Однако, при угле  $30^\circ$ , частота прокалывания выше, чем в других случаях (углах  $36^\circ$  или  $45^\circ$ ). То есть угол прокалывания  $30^\circ$  является наиболее рациональным.

#### **2.4. Взаимодействие игл игольчатой бороны при работе в почве**

Рассмотренная борона относится к устройствам, представляющим собой ведомые звенья, которые осуществляют качение по почве в продольно-вертикальной плоскости (рис. 2.10). Иглы дисков, движущиеся в этой плоскости, заглубляются в почву, производят ее прокалывание и рыхление. При этом также может происходить удаление корневой системы сорняков из почвы.

Движение бороны осуществляется под действием горизонтально приложенных в центрах дисков сил. Диск на рис. 2.10 движется влево со

скоростью  $v_c$  и с угловой скоростью  $\omega$  вращается против часовой стрелки вокруг оси  $C$ , перпендикулярной площади чертежа, которая смещается влево. Заглубление игл в почву происходит под действием сил тяжести  $G$  дисков и всей бороны.

Как видно из рис. 2.10, почва взаимодействует с бороной только в тех случаях, когда иглы находятся в нижней зоне  $A_1A_{12}A_{11}$ . В другой зоне, что соответствует рис. 2.10, при угле  $30^\circ$  по дуге  $A_{11}A_{10}A_9A_8A_7A_6A_5A_4A_3A_2$  иглы не взаимодействуют с почвой. В дальнейшем будем рассматривать взаимодействие с почвой игл, что находятся в нижней зоне.

Каждая игла в нижнем положении существенно заглубляется в почву, конец иглы начинает заглубляться в почву, когда угол  $A_{12}CA_1$  (кут  $\alpha$ ) равняется  $25^\circ \dots 30^\circ$ , и заканчивается прокалыванием, когда игла займет вертикальное положение острием вниз (рис. 2.10, в).

Из изложенного следует, что взаимодействие каждой иглы с почвой происходит на участках  $A_1A_{12}$  и  $A_{12}A_{11}$  (рис. 2.10, а), причем на участке  $A_1A_{12}$  игла опускается в почву, а на  $A_{12}A_{11}$  игла выходит из почвы. На всем нижнем участке иглы делают полезную работу. Эти явления повторяются приблизительно через каждые  $30^\circ$  поворота диска, что зависит от угла  $\alpha$  и максимальной глубины  $h_{\text{и}}$  проникновения иглы в почву. С учетом изложенного проведем дальнейший анализ прокалывания почвы. При движении центра  $C$  бороны влево со скоростью  $v_c$  мгновенный центр вращения нижней вертикальной иглы окажется в нижнем конце иглы  $A_{12}$  (рис. 2.10, а), но может оказаться и внизу иглы  $A_1$  (рис. 2.10, в). Нижний конец иглы с мгновенным центром вращения, так и находится глубоко в почве и не может быстро менять положение. Таким образом, считаем, что в нижних точках  $A_{12}$  и  $A_1$  находятся мгновенные центры вращения, которые обозначим как  $C_v$ . Возле центра  $C_v$  диск с иглами поворачивается вокруг своего вертикального нижнего положения.

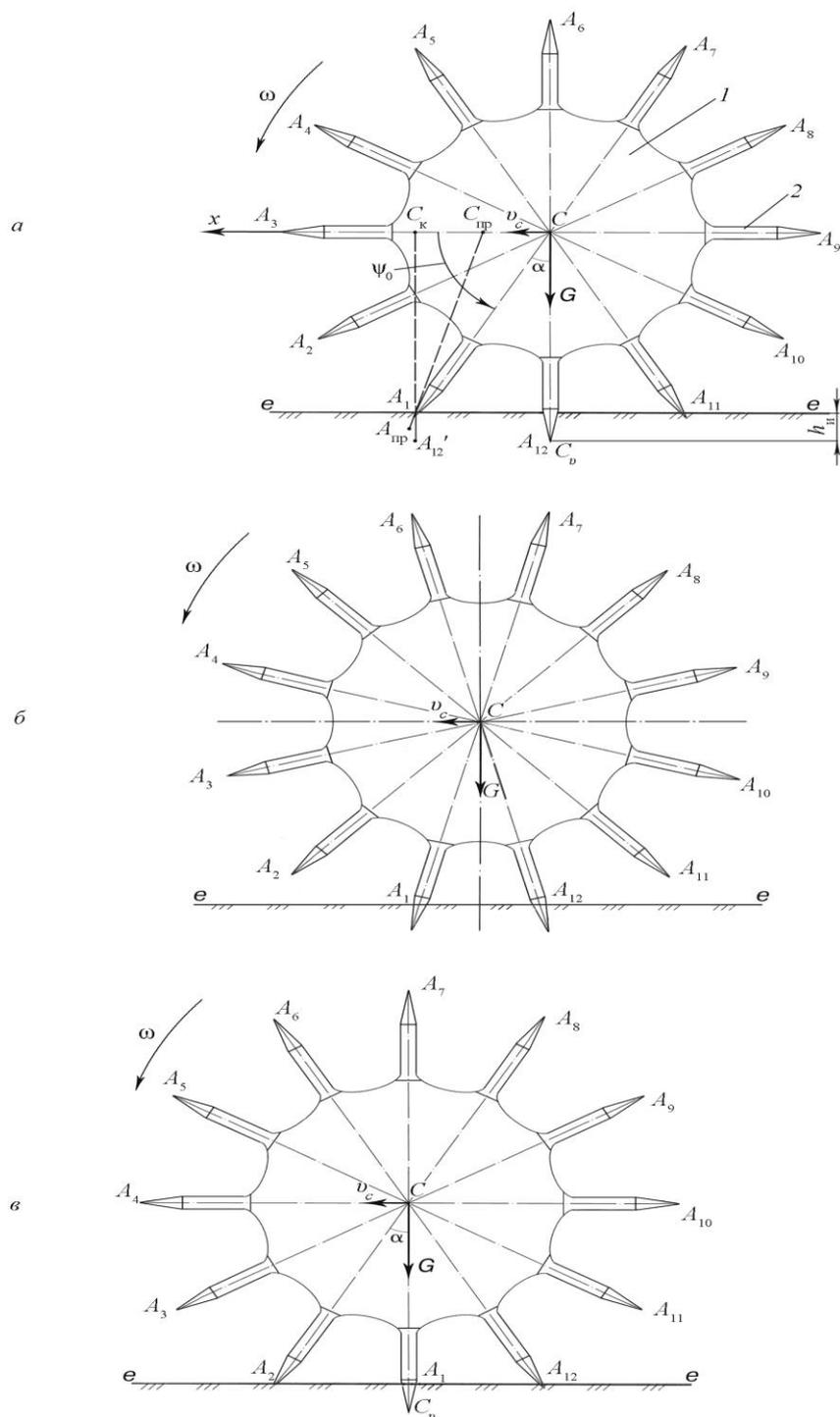


Рисунок 2.10 – Схемы расположения дисков боронисиглами, которые движутся по почве, при последовательном их повороте на половину угла между соседними иглами: *a* – начало выхода из почвы иглы  $A_{12}$ , сделавшей прокол; *б* – заглубление в почву иглы  $A_{11}$  и окончание выхода из почвы иглы  $A_{12}$ ; *в* – начало входа в почву иглы  $A_2$ , окончание входа в почву иглы  $A_{11}$  и окончание выхода из почвы иглы  $A_{12}$

Таким образом, работа агрегата состоит из непрерывных взаимодействий переднего нижнего ряда игл и соседнего с ним заднего ряда. При этом, пока задние иглы выходят из заглублений в почве, передние иглы заглубляются.

На схемах приведены начало и конец взаимодействия иглы с почвой при условии вхождения (прямая  $CA_1$  на рис. 2.10, а) и выхода (прямая  $CA_{12}$  на рис. 2.10, в). Промежуточное положение иглы при прокалывании представлена на рис. 2.10, б, на котором видно как игла  $A_1$  вошла в почву и частично ее проколола, а игла  $A_{12}$  выходит из почвы. Для силового анализа прокола почвы лучше использовать рис. 2.10, а, где игла  $A_1$  начинает его осуществлять.

Выше отмечалось, что в зоне  $A_{12}A_{11}$  (рис. 2.10, а) и задней части зоны иглы  $A_{12}$  (рис. 2.10, б), а также в зоне  $A_1A_{12}$  (рис. 2.10, в) иглы выходят из заглублений в почве. Поскольку, выход игл из почвы происходит при небольших затратах энергии, будем считать, что сила, необходимая для вытягивания игл из почвы, слишком малая, т.е. близкая к нулю. Следовательно, силовой расчет игл стоит проводить для случая заглубления иглы в почву (зона  $A_1A_{12}$  на рис. 2.10, а), когда сила сопротивления почвы входу в нее иглы существенная и действует снизу вверх по линии иглы.

Путь  $x_{п}$  центра  $C$  диска при его движении со скоростью  $v_c$  влево (рис. 2.10, а) при осуществлении прокалывания почвы концом иглы  $CA_1$  равняется по длине расстоянию  $CC_k$ , где  $C$  – начальное положение центра диска, при котором конец иглы коснулся поверхности почвы в точке  $A_1$ , а  $C_k$  – конечное положение центра диска, который продвинулся, при этом игла вместе с диском поворачивается с угловой скоростью  $\omega$  против часовой стрелки и становится вертикально, заканчивая тем самым прокалывание почвы. Это вертикальное положение радиуса диска с иглой обозначено  $C_kA_{12}'$  (здесь  $A_{12}'$  – нижний конец иглы в вертикальном положении) и показано на рис. 2.10,а. На этом же рисунке показано промежуточное положение  $C_{пр}$  центра диска между точками  $C$  и  $C_k$ . Ему отвечает положение  $C_{пр}A_{пр}$  радиуса диска с

иглой, где  $A_{пр}$  – нижнее положение острого конца этой иглы. На рис. 2.10, а показан еще угол  $\psi_0$  отклонения радиуса  $CA_1$  диска с иглой, что повернулся, от горизонтального радиуса  $CA_3$  диска с иглой  $A_3$ . Указанный выше путь  $x_{п}$  (расстояние  $CC_k$ ) равняется:

$$x_{п} = r_{дг} \sin \alpha, \quad (2.12)$$

где  $r_{дг}$  – радиус  $CA_1$  диска.

Обратимся теперь к рис. 2.11, на котором дана схема заглубления игл в почву. Игла вращается вокруг центра  $C$  и вместе с ним движется влево. В случае, когда она вращается вокруг неподвижного центра  $C$ , конец иглы описывает дугу  $A_3'A_1A_{12}'$ . Центр  $C$  вместе с диском и иглами движется влево со скоростью  $v_c$ , а диск с иглами вращается вокруг центра  $C$  против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ . При таких условиях конец иглы описывает в пространстве сложную кривую (циклоиду). На диск с иглами действуют сила тяжести  $G$  и разрушающая сила  $P_d$ .

Проведем анализ игольчатой бороны при следующих допущениях:

а) бороны с дисками и иглами рассматривается как тело, движущееся вместе с энергетическим тяговым средством (трактором) влево по горизонтали, при этом оси дисков перпендикулярны площади движения, а диски с иглами вращаются против часовой стрелки вокруг своих осей;

б) начало взаимодействия движущейся иглы с почвой имеет место, когда ее конец касается почвы в положении  $A_1$  (рис. 2.10,а и рис. 2.11,а). После этого эта игла, что прокалывает почву, обозначена как  $CA_1'$ , поворачивается и еще больше заглубляется в почву под углом  $\psi_0 + \psi$  до горизонтали  $Cx$ , по которой направлена разрушающая сила бороны  $P_d$  (здесь  $\psi_0$  – угол  $xCA_1$ , характеризующий начальное положение иглы на рис. 2.10 и 2.11; а  $\psi$  – текущее значение угла  $A_1CA_1'$ , характеризующего положение иглы во время ее поворота и заглубления в почву);

в) нижняя правая игла  $A_{12}'$ , что выходит из почвы (рис. 2.11), не сильно давит своим концом на проколотые почвенные частицы, вследствие чего можно считать, что она вообще не осуществляет воздействие на почву, а сила тяжести  $G$  передается, в основном, на иглу  $CA_1'$ .

На диск с иглами (рис. 2.11) по горизонтали действует разрушительная сила  $P_\rho$ . Сопротивление иглы заглублению в почву обозначается силой  $Q$ , которая направлена по оси иглы до центра вращения  $C$ .

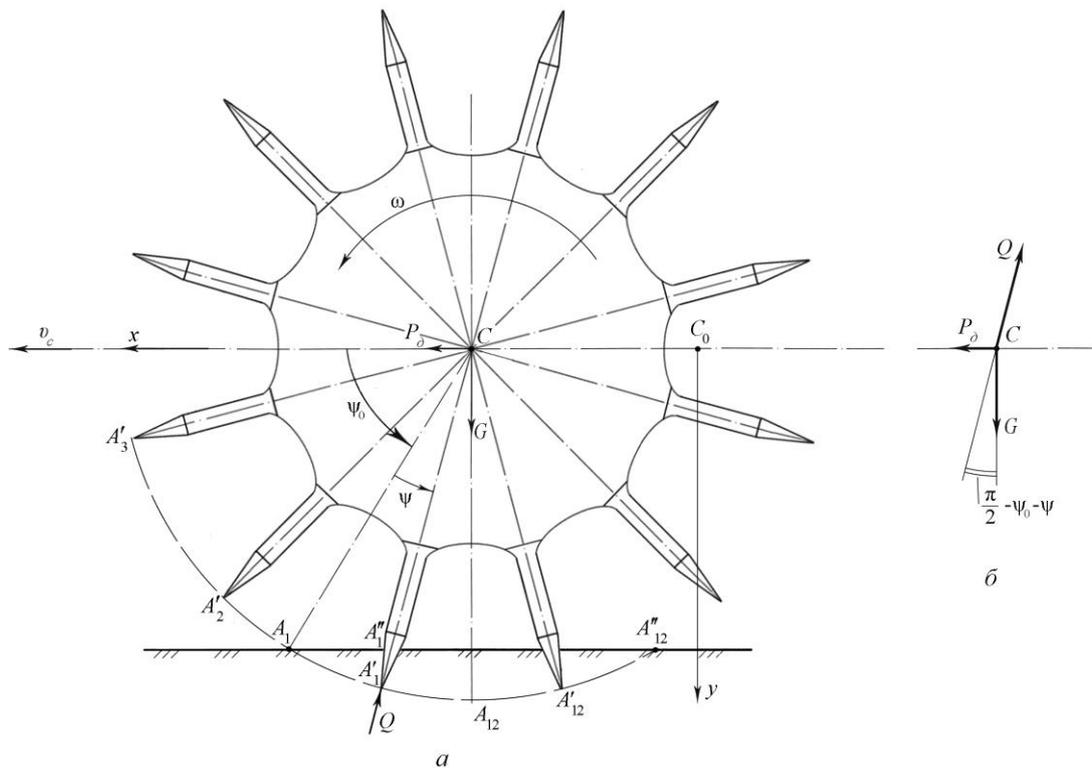


Рисунок 2.11 – Схема движения игольчатой бороны (а) и силы, действующие на центр  $C$  диска бороны (б)

Принимаем на рис. 2.11, а неподвижную систему координат  $x C_0 y$  началом в точке  $C_0$  (центр диска в начальном положении). Ось  $x$  направим по горизонтали влево из центра  $C_0$  в направлении движения бороны, а ось  $C_0 y$  – вниз. На рис. 2.11, б приведены силы, действующие на центр  $C$  диска бороны. Тогда, соответственно по законам плоскопараллельного движения твердого

тела, можно составить следующие дифференциальные уравнения движения диска бороны:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{др}} \ddot{x}_c &= m_{\text{др}} \frac{d^2 x_c}{dt^2} = P_\partial - Q_x; \\ m_{\text{др}} \ddot{y}_c &= m_{\text{др}} \frac{d^2 y_c}{dt^2} = G - Q_y; \\ I_c \ddot{\psi} &= I_c \frac{d^2 \psi}{dt^2} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где  $m_{\text{др}}$  – масса диска с иглами;  $\ddot{x}_c$  – проекция линейного ускорения центра  $C$  диска на ось  $x$ ;  $t$  – время;  $Q_x$  – проекция силы  $Q$  на ось  $x$ ;  $\ddot{y}_c$  – проекция линейного ускорения центра  $C$  диска на ось  $y$ ;  $Q_y$  – проекция силы  $Q$  на ось  $y$ ;  $I_c$  – момент инерции диска с иглами относительно оси вращения  $C$ ;  $\ddot{\psi}$  – угловое ускорения вала диска,  $\psi$  – угол поворота диска от линии  $CA_1$  (отсчитывается он против часовой стрелки),  $x_c$  – абсцисса центра  $C$  диска,  $y_c$  – ордината центра  $C$ .

Из первого уравнения (2.13) с учетом характера движения бороны в агрегате с трактором, что движется равномерно, следует, что проекция ускорения  $\ddot{x}_c$  равняется нулю. Тогда  $\dot{x}_c = v_0$ , где  $v_0$  – константа, т.е. скорость центра  $C$  бороны при равномерном движении. В другом уравнении (2.13)  $\ddot{y}_c = 0$ , потому что проекция ускорения точки  $C$  на ось  $y$  равняется нулю (центр  $C$  не двигается по вертикали). В третьем уравнении (2.13) угловое ускорение  $\ddot{\psi} = 0$ , а угловая скорость  $\dot{\psi}$ , равняется  $\omega$  и имеет постоянное значение. Поэтому из трех равенств (2.13) остаются следующие два:

$$\left. \begin{aligned} P_\partial - Q_x &= 0; \\ G - Q_y &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Как видно с рис. 2.11, «выходная» игла  $A_{12}'$  вращается в зоне, где прокалывание почвы уже выполнено. Она не опирается на твердую почву и сила реакции почвы тут мала. Поэтому стоит считать, что сила  $G$  давит в

основном на иглу  $A_1'$ , что осуществляет прокалывание почвы. Это положение тем справедливей, чем ближе игла  $A_1'$  к выходу из зоны  $A_1'A_{12}'$  (рис. 2.11), т.е. к вертикали  $CA_{12}$ . Из равенств (2.14) учитывая, что угол отклонения силы  $Q$  от вертикали равен  $90^\circ - \psi_0 - \psi$ , а силы  $P_\delta$  и  $G$  равны:

$$\left. \begin{aligned} P_\delta &= Q_x = Q \sin(90^\circ - \psi_0 - \psi) = Q \cos(\psi_0 + \psi); \\ G &= Q_y = Q \cos(90^\circ - \psi_0 - \psi) = Q \sin(\psi_0 + \psi). \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

При таких значениях сил  $P_\delta$  и  $G$  будет выполнен прокол почвы. Другое равенство (2.15) указывает на важность обеспечения необходимой массы бороны, так как при недостаточной массе  $G$  бороны прокалывание почвы может не произойти. При заглублении иглы в почву и осуществлении ее прокалывания угол  $\psi$  непрерывно изменяется от 0 до  $90^\circ$  (как говорилось ранее). Угол  $\psi$  равняется:

$$\psi = \omega t_n, \quad (2.16)$$

где  $t_n$  – время поворота иглы от положения  $CA_1$  до  $CA_{12}$  (рис. 2.11)

Из зависимости (2.15) видно, что прокол почвы происходит одновременно с действием сил  $P_\delta$  и  $G$ . Под действием силы  $G$  игла заглубляется в почву, а под действием сил  $P_\delta$  борона движется по полю. Сила  $P_\delta$  создается трактором, а сила  $G$  возникает благодаря массе бороны.

Сила  $Q$  зависит от глубины  $\lambda$  заглубления иглы в почву и увеличивается при заглублении. Согласно исследовательских данных зависимость  $Q$  от  $\lambda$  близка к линейной.

С учетом зависимости (2.17) равенства (2.15) получаем:

$$Q \approx k \lambda, \quad (2.17)$$

де  $k$  – коэффициент, который зависит от сопротивления почвы при заглублении иглы, ее конусности и твердости почвы, определяется экспериментальным путем и измеряется в Н/м.

С учетом зависимости (2.17) уравнения (2.15) получаем:

$$\left. \begin{aligned} P_{\delta} &\approx k\lambda \cos(\psi_0 + \psi); \\ G &\approx k\lambda \sin(\psi_0 + \psi). \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Сначала глубина прокола  $\lambda$  равна нулю, а разрушающая сила  $P_{\delta}$  также равна нулю, т.е. в центре  $C$  в начальном его положении для следующей иглы разрушающая сила равна нулю. При заглублении иглы в почву сила  $P_{\delta}$  будет увеличиваться, потому что увеличивается глубина. При завершении прокола угол  $\psi$  равняется  $90^{\circ} - \psi_0$ , но в случае, когда прокол прекратился – сила  $P_{\delta}$  также равняется нулю. Сила  $G$  во время работы орудия меняется в соответствии с другой формулой (2.15). Время прокола почвы равняется времени  $t_{\pi}$  вращения иглы с положения  $CA_1$  до положения  $CO_1$  (рис. 2.12). В это время игла поворачивается на угол  $\frac{\pi}{2} - \psi_0$ ; вращение иглы равномерно с угловой скоростью  $\omega$ . Имеем:

$$t_{\pi} = \frac{\psi_{12}}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{2} - \psi_0}{\omega}. \quad (2.19)$$

Пройденный иглой путь  $s_{\pi}$  за час одного ее заглубления в почву и выходу из почвы, равняется:

$$s_{\pi} = v_c 2t_{\pi} = \frac{2v_c}{\omega} \left( \frac{\pi}{2} - \psi_0 \right). \quad (2.20)$$

Как видно из рис. 2.11, если глубину  $\lambda$  учитывать по линии иглы от поверхности  $A_1A_{12}''$  почвы, то данная глубина не будет строго перпендикулярна линии  $A_1A_{12}''$ . В тоже время при возрастании угла  $\psi$  положение линии иглы приближается к вертикали. Для анализа этого явления применим для рассматриваемого механизма метод оборота, т.е. дадим всей системе, представленной на рис. 2.11, а, направление движения вправо со скоростью –  $v_c$ . Вследствие этого характер движения игл не изменится, однако ось  $C$  остановится, а диск с иглами будет вращаться

вокруг неподвижной оси  $C$  в том же направлении (с угловой скоростью  $\omega$ ). Почва будет перемещаться вправо со скоростью  $v_c$ .

Схема такого движения представлена на рис. 2.12, где иглы изображены в виде линий  $CA_1$  и  $CA_1'$ , а угол поворота линии  $CA_1'$  от положения  $CA_1$  и раньше обозначенный  $\psi$ , глубина  $\lambda$  – расстояние  $A_1''A_1'$ .

В точке  $A_1$  глубина заглабления иглы  $\lambda$  равняется нулю, а в точке  $O_1$  она равняется глубине  $O_1A_{12}$ , которая представляет собой полную глубину  $h_n$  заглабления иглы в почву.

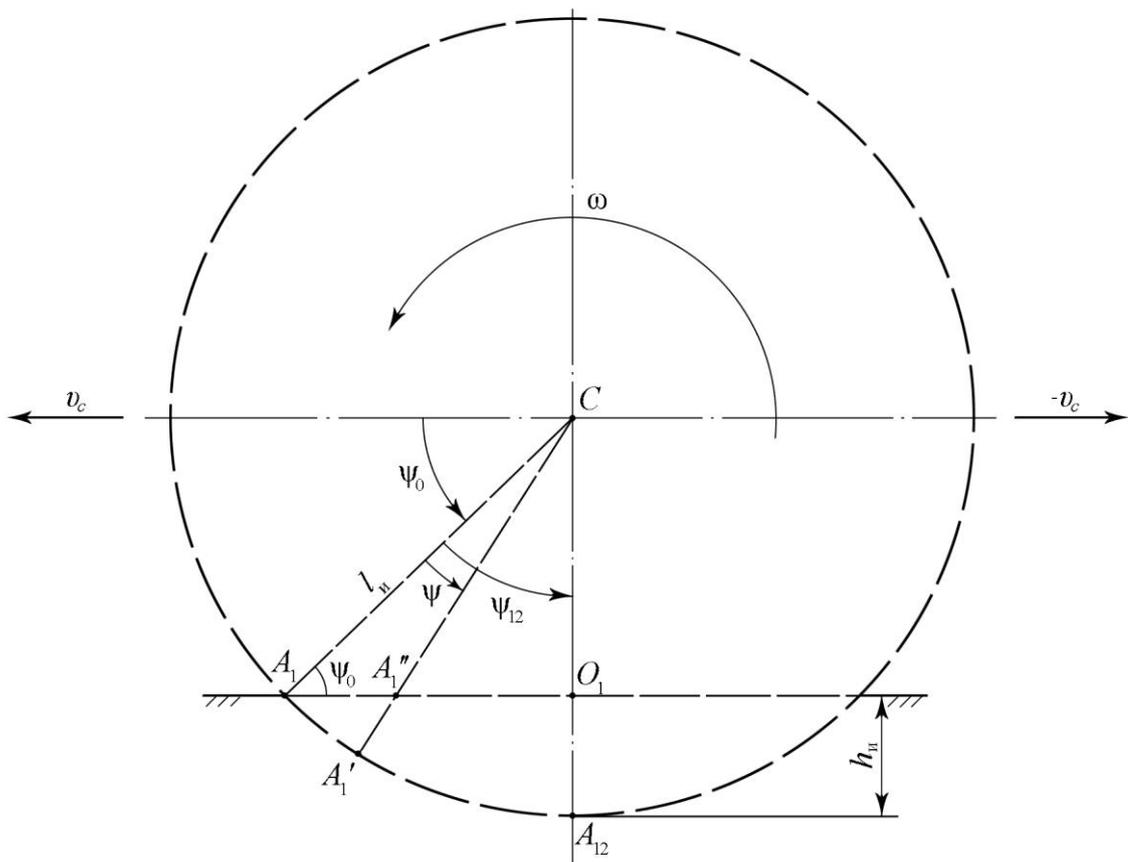


Рисунок 2.12 – Схема к определению глубины  $\lambda$  заглабления иглы в почву

Из схемы следует, что возрастание  $\lambda$  на всем пути от точки  $A_1$  до точки  $O_1$  близко к прямолинейной зависимости. Чтоб не усложнять дальнейшие расчеты, будем считать, что с увеличением угла  $\psi$  пропорционально возрастает и глубина  $\lambda$ . Поскольку  $\psi = 0$  и  $\lambda = 0$  в точке  $A_1$ ,  $\psi = \psi_{12} = 90^\circ - \psi_0$

в точке  $O_1$ ;  $\lambda = h_{и} = O_1A_{12}$ , зависимость  $\lambda$  от угла  $\psi$  будет выглядеть

$$\lambda \approx \frac{h_{и}}{\psi_{12}} \psi, \quad (2.21)$$

где  $\psi_{12}$  – полное значение угла  $\psi$  от точки  $A_1$  до точки  $O_1$ ,  $\psi_{12} = 90^\circ - \psi_0$ .

Если  $\psi$  – это угол  $A_1CA_1'$ , то  $\psi_{12}$  – угол  $A_1CA_{12}$ .

С учетом выражения (2.21) зависимость (2.18) примет вид:

$$P_\delta \approx k \frac{h_{и}}{\psi_{12}} \psi \cos(\psi_0 + \psi). \quad (2.22)$$

До начала прокалывания почвы при глубине  $\lambda = 0$  угол  $\psi$  и сила  $P_\delta$  равняются нулю.

Для анализа зависимости (2.22) обозначим значения  $k \frac{h_{и}}{\psi_{12}}$  через букву  $B$ .

Измеряется  $B$  в  $\frac{\text{Н}}{\text{м}} \frac{\text{м}}{\text{рад}} = \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ . Тогда:

$$P_\delta \approx B \psi \cos(\psi_0 + \psi). \quad (2.23)$$

Построим при помощи формулы (2.23) графическую зависимость силы  $P_\delta$  от  $\psi \cos(\psi_0 + \psi)$ , которая изменяется от угла  $\psi$ . Данное построение сделано для случая, когда  $\psi_0 = 60^\circ$ , а  $\psi$  равняется  $0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  и  $30^\circ$ . В данном случае углы  $\psi$  перед  $\cos$  будем выражать в радианах:

$$P_{\delta 1} \approx B \cdot 0 \cdot \cos(60^\circ + 0) = 0;$$

$$P_{\delta 2} \approx B \cdot \frac{10}{57,3} \cos 70^\circ \approx 0,06 \cdot B, \text{ Н};$$

$$P_{\delta 3} \approx B \cdot \frac{15}{57,3} \cos 75^\circ \approx 0,07 \cdot B, \text{ Н};$$

$$P_{\delta 4} \approx B \cdot \frac{20}{57,3} \cos 80^\circ = 0,06 \cdot B, \text{ Н};$$

$$P_{\delta 5} \approx B \cdot \frac{30}{57,3} \cos 90^\circ = 0.$$

Полученные данные наносим на график зависимости силы  $P_\delta$  от пути движения центра  $C$  иглы бороны. Построение начинается от начального положения центра  $C$  (т.е. от начала прокола почвы). Этот график приводится ниже (рис. 2.13) и размещен в середине круга, который описывается концом иглы во время ее вращения. Данный график связан с рис. 2.10. На данном графике (рис. 2.13) сила  $P_\delta$  откладывается по вертикали вверх от центра иглы  $C$ , а путь  $x_c$  и скорость  $v_c$  движения центра  $C$  иглы направлены по горизонтали влево при этом занимают следующие положения  $C, C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  при  $x_c = v_c t$ , где  $t$  – время движения. На этом графике сила  $P_{\delta 1}$  равняется нулю; сила  $P_{\delta 2}$ , что находится в точке  $C$ , равняется  $0,06B$ ; отложена от точки  $C_1$  вверх до точки  $C_1'$ . Сила  $P_{\delta 3}$  равняется  $0,07B$  отложена от точки  $C_2$  вверх до точки  $C_2'$ . Сила  $P_{\delta 4}$  равняется  $0,06B$ ; отложена от точки  $C_3$  вверх до точки  $C_3'$ . Сила  $P_{\delta 5}$  равняется  $0$ , находится в точке  $C_4$ . Размещение точек при прокалывании почвы представлены на рис. 2.13 в виде промежутков  $CA_0, C_1A_1, C_2A_2, C_3A_3$  и  $C_4A_4$ .

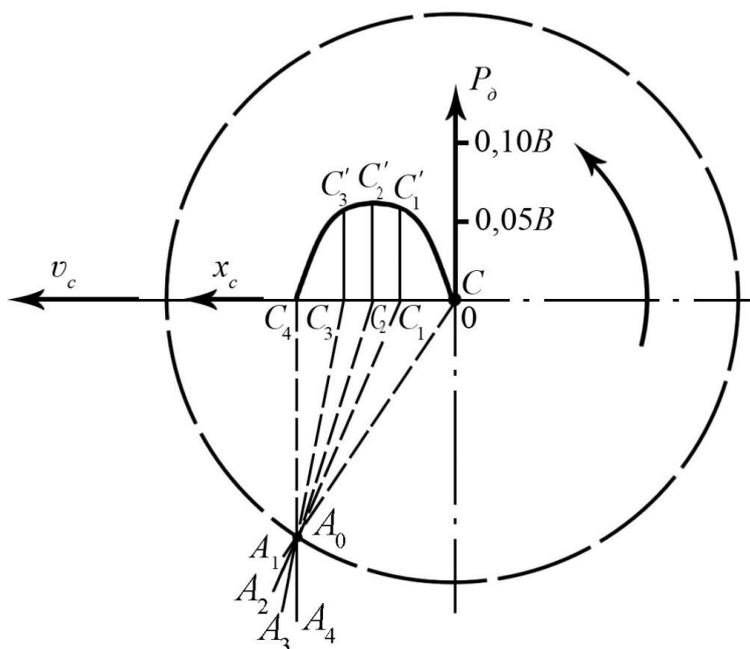


Рисунок 2.13 – График изменения величины горизонтальной силы  $P_{\delta}$ , которая давит на верхнюю часть иглы при ее вращении вокруг оси  $C$  (при движении бороны влево)

Из графика видно, что сила  $P_{\delta}$  в начальном положении движения центра бороны равняется нулю, однако она увеличивается по ординате в точке  $C_2'$ , а потом попадает в конечную точку  $C_4$  и равняется нулю. Во время представленных теоретических расчетов и графических построений нами проведены расчеты по формуле (2.23) с использованием компьютера. На основе приведенных выше данных разработана программа на ПК, благодаря которой определяли зависимость разрушающей силы от глубины загибания иглы бороны в почву.

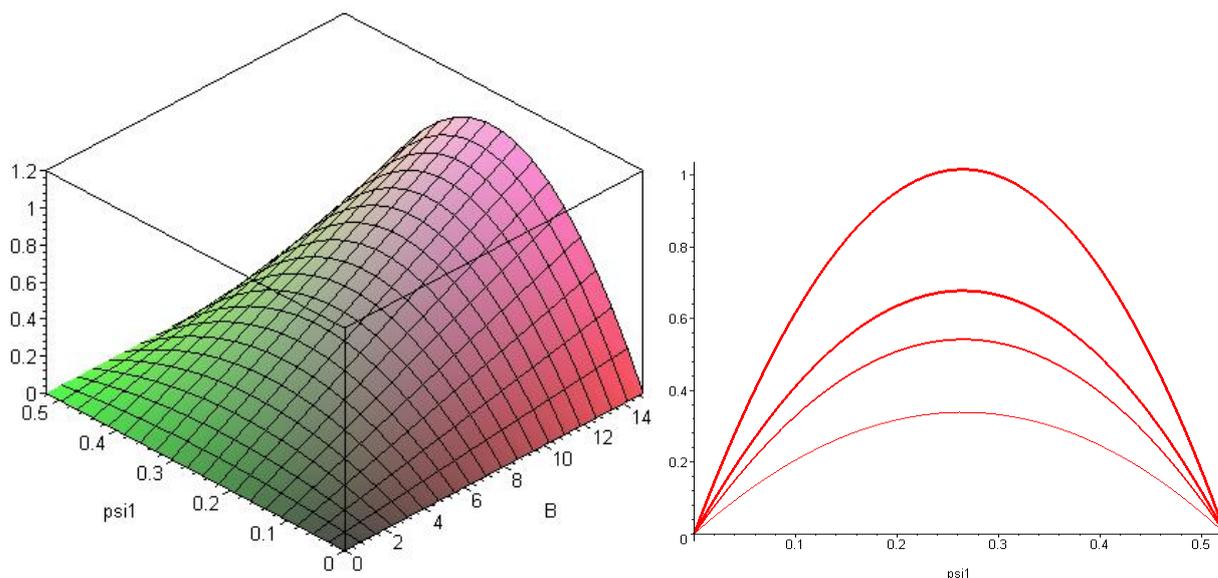


Рисунок 2.14 – Зависимость разрушающей силы  $P_{\delta}$  от текущего значения угла  $\psi$ , характеризующего положение иглы во время ее поворота и загибания в почву и глубины загибания иглы

## 2.5. Определение усилия, необходимого для заглабления в почву иглы игольчатой бороны

При работе игольчатых борон их иглы могут проникать в почву с некоторым отклонением от перпендикуляра, или перпендикулярно к его поверхности. Этот вопрос частично рассмотрен в подразделе 2.2, где отмечено, что скорость движения иглы при прокалывании почвы может быть отклонена от перпендикуляра к поверхности почвы на угол  $\beta$ , значение которого изменяется от  $15...20^\circ$  в начале движения и приближается к нулю в момент завершения прокола почвы (2.23). При таких условиях будем считать, что угол  $\beta$  изменяется в пределах от 0 до  $20^\circ$ .

Схема заглабления в почву деформатора в виде иглы приведена на рис. 2.4, 2.5 и 2.6. Аналогичные схемы представлены на рис. 2.15 и 2.16, б. Силу, которая давит, обозначена через  $G$ . На рис. 2.16, а приведена схема заглабления в почву деформатора в виде плоского горизонтального круглого тела. С помощью таких плоских деформаторов определяют твердость почвы. Для сравнения схем заглабления в почву разных деформаторов на рис. 2.16 приведены устройства в виде: горизонтального круглого тела (рис. 2.16, а) и вертикального конуса, который направлен острием вниз (рис. 2.16, б).

При условии деформации почвы при заглаблении деформатора (плунжера) твердомера в почву (рис. 2.16, а) на его регистрирующей части записывается диаграмма, представляющая собой зависимость силы  $G$  давления на плунжер от глубины  $\lambda_i$  его заглабления в почву (рис. 2.13). С помощью этой диаграммы определяют твердость  $p$  почвы:

$$p = \frac{h_{\text{ср}} \kappa_{\text{пр}}}{S}, \quad (2.24)$$

где  $h_{\text{ср}}$  – среднее значение ординаты (в см) на участке  $OA$  этой диаграммы,  $\kappa_{\text{пр}}$  – жесткость пружины (Н/см), а  $S$  – площадь плунжера в месте его контакта с почвой (см<sup>2</sup>). Твердость почвы измеряется в Н/см<sup>2</sup>.

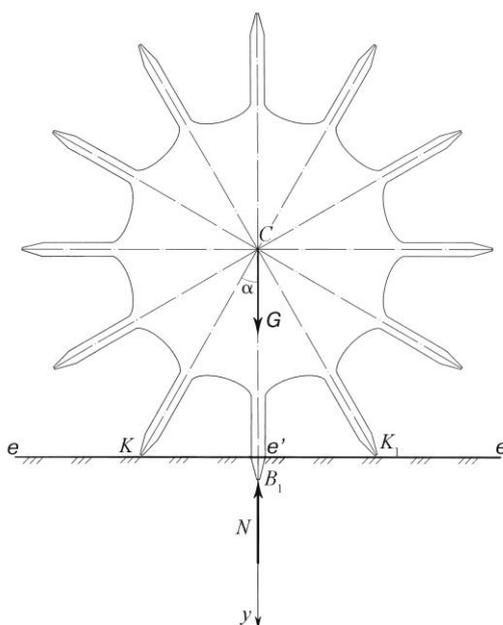


Рисунок 2.15 – Схема заглабления в почву иглы диска под действием силы  $G$

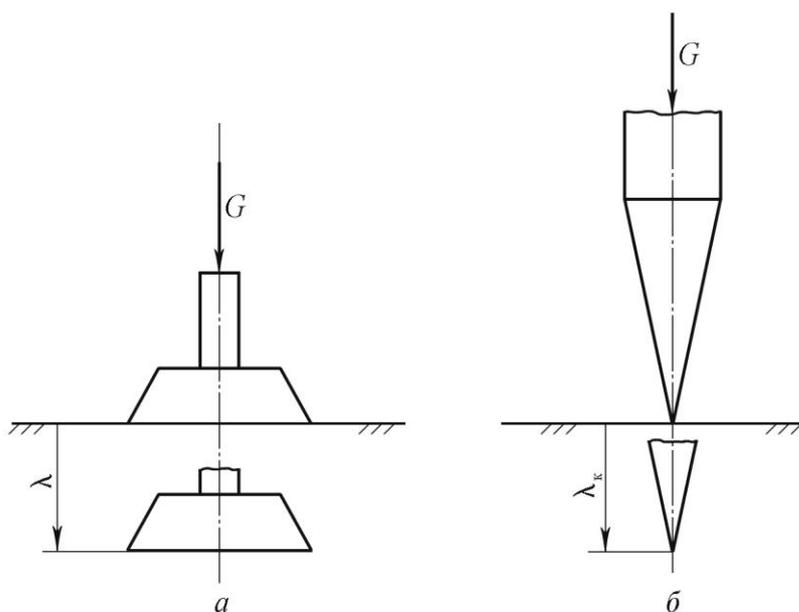


Рисунок 2.16 – Схема заглабления в почву на глубину  $\lambda$  деформатора разной формы:  $a$  – плоское горизонтальное круглое тело;  $b$  – вертикальный конус, направленный острием вниз

Прямая  $OA$  на диаграмме характеризует возрастание силы  $G$  в зависимости от глубины  $\lambda_i$ , а прямая  $AB$  – условия деформации почвы, когда

она «течет», т.е. продолжает деформироваться под действием постоянной силы  $G_A$  давления на него. Точка  $A$  на диаграмме находится на значительной глубине  $\lambda_i$  от поверхности почвы (20 см и больше). Такой является закономерность деформации почвы плунжером, который выполнен в виде плоского горизонтального круглого тела. Однако, закономерность деформации почвы конусной иглой (рис. 2.16, б) еще не установлена. Жесткость пружины  $\kappa_{пр}$  – это сила  $P_{п}$  ( $H$ ), которая необходима для продольного сжатия пружины на одну единицу ее длины (см)

$$\kappa_{пр} = \frac{P_{п}}{a_{п}}, \quad (2.25)$$

де  $a_{п}$  – деформация сжатия пружины, см

Отрезки  $\lambda_1 a_1$ ,  $\lambda_2 a_2$ ,  $\lambda_A A$  (рис. 2.17) – отвечают расстоянию  $a_{п}$ , на котором сжимается пружина твердомера при заглублении в почву деформатора, т.е. это путь перемещения по бумаге конца самописца под действием силы  $G$ .

Как отмечено выше, величина  $\lambda_n$  согласно литературным данным [56] находится в пределах значений  $\lambda$ , которые не превышают предела глубины обрабатываемого слоя почвы, а глубина, обрабатываемая игольчатыми боронами, не превышает 70 мм [26].

На рис. 2.17 силе давления  $G_1$  соответствует отрезок  $\lambda_1 a_1$ , силе  $G_2$  –  $\lambda_2 a$ , а силе  $G_A$  – соответственно  $\lambda_A A$ .

При таких условиях можно утверждать, что в случае использования таких борон сопротивление почвы заглублению в него иглы будет изменяться линейно по прямой, аналогичной  $OA$  (рис. 2.17).

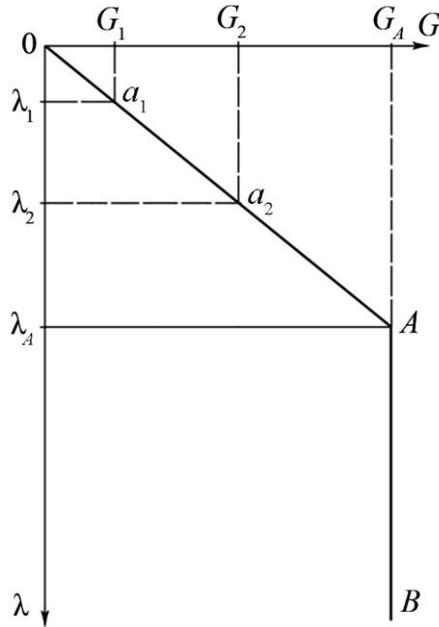


Рисунок 2.17 – Зависимость изменения силы  $G$  давления плунжера на почву от глубины  $\lambda$  его заглубления

Игольчатая борона, концы игл которой имеют конусную форму, приведена на рис. 2.18. Представлены нижнее конусное тело иглы длиной  $h_k$  и часть цилиндрического тела с длиной  $h_{ц}$ . Уровень почвы при прокалывании соответствует линии  $E_1O_1E_2$ , однако он может быть и ниже этой линии. Общая длина части иглы, заглубляемой в почву, определяется  $h_k + h_{ц}$ , при условии, что уровень почвы выше линии  $E_0O_0E_0$ . При этом эта длина может быть меньше  $h_k$ , в случае если уровень почвы ниже линии  $E_0O_0E_0$ . При условии, если уровень почвы проходит по линии  $E_0O_0E_0$ , глубина заглубления иглы в почву  $\lambda$  отвечает  $h_k$ .

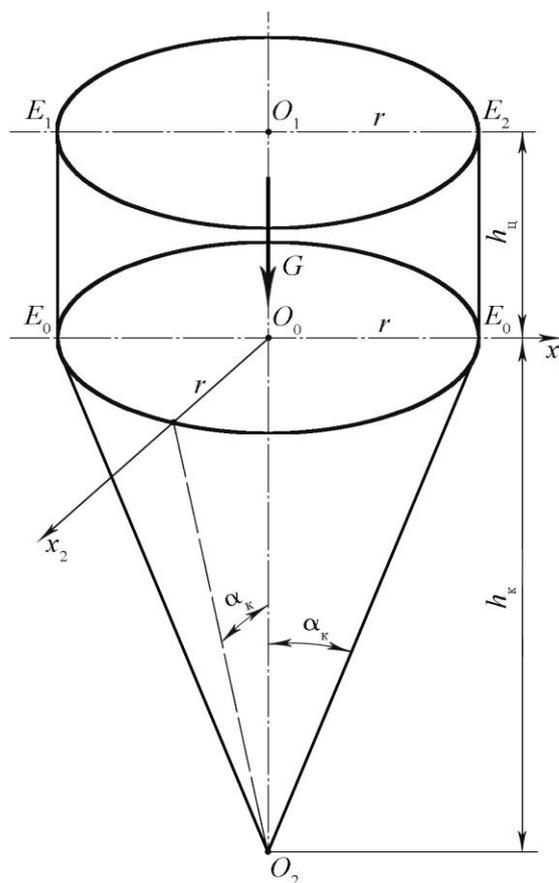


Рисунок 2.18 – Схема части иглы, взаимодействующей с почвой

Объем  $V$  части иглы, находящейся в почве, в общем случае равняется –  $V_k + V_{ц}$ , где  $V_k$  и  $V_{ц}$  – объем соответственно конусной и цилиндрической части иглы, заглубленной в почву. Так объем конуса  $V_k$  равняется  $\frac{\pi}{3}r^2h_k$ , а  $V_{ц}$  равняется  $\pi r^2h_{ц}$ , где  $r$  – радиус круга в основанию конуса (цилиндра), тогда

$$V = \pi r^2 \left( h_{ц} + \frac{1}{3} h_k \right). \quad (2.26)$$

Конус иглы, в случае ее заглубления под действием силы  $G$  будет влиять на почву (распирать) ее в направлениях, перпендикулярных образующим конуса. Однако он может одновременно и скользить по почве. При таких условиях возникают силы трения скольжения по всей поверхности контакта конуса с почвой. Схема таких действий приведена на рис. 2.19, а (с трением) и на рис. 2.19, б (без трения).

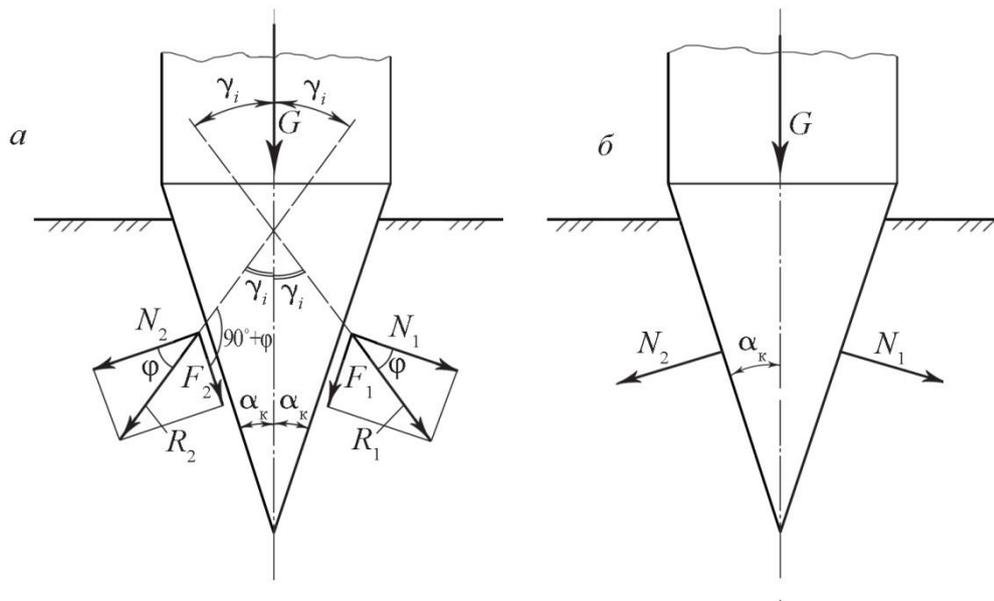


Рисунок 2.19 – Схема действия сил конусной части иглы на почву: *а* – равномерное вертикальное заглубление; *б* – без заглубления

На рис. 2.19, а приведен результат взаимодействия конусной части иглы с почвой во время ее заглубления. В результате такого взаимодействия со стороны боковых поверхностей на почву будут действовать нормальные силы реакции  $N_1$  и  $N_2$  перпендикулярно поверхности конуса и силы трения скольжения  $F_1$  и  $F_2$  по направляющим конуса в направлении противоположному действию силы  $G$ . Эти силы приведены в двух точках, но такие силы действуют по всей поверхности контакта иглы с почвой. Равнодействующую сил  $N_1$  и  $F_1$  обозначали  $R_1$ , а сил  $N_2$  и  $F_2$  соответственно  $R_2$ . Направление действия силы  $R_1$  отклонено от направления действия силы  $N_1$  на угол трения  $\varphi$ , на такой же угол  $\varphi$  отклонена сила  $R_2$  от силы  $N_2$ . Сила  $F_1$  равняется  $fN_1$ , а сила  $F_2 - fN_2$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения, который определяется  $\operatorname{tg}\varphi$ .

На рис. 2.20, а приведен аналогично рис. 2.19, а результат взаимодействия под действием силы  $G$ , которая достаточна для заглубления конуса иглы в почву.

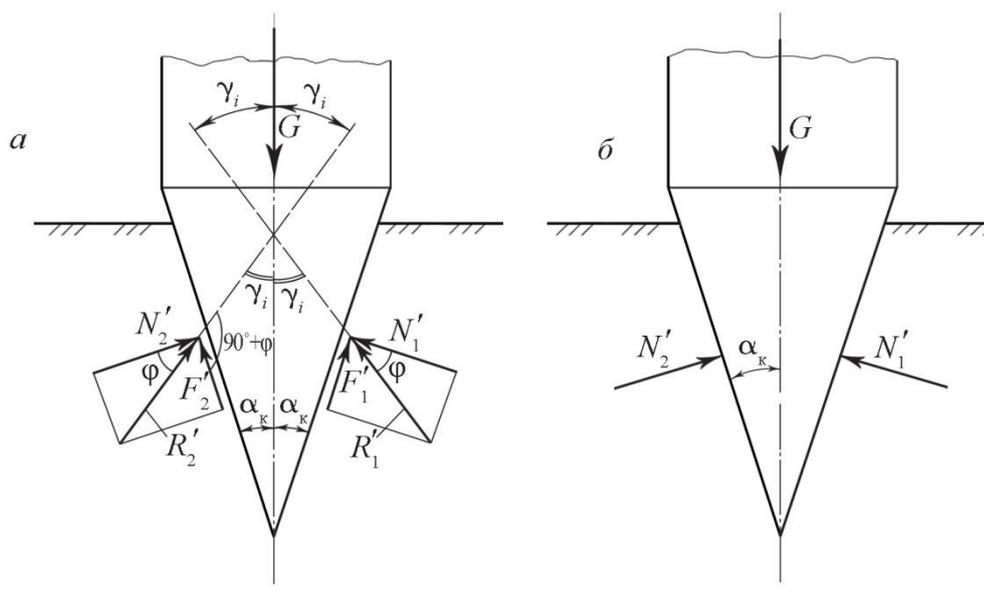


Рисунок 2.20 – Схема действия сил на боковые поверхности конусной части иглы: *а* – равномерное вертикальное заглубление в почву; *б* – без заглубления

Со стороны почвы на боковую поверхность конуса будут действовать нормальные силы реакции  $N_1'$  и  $N_2'$  перпендикулярно поверхности конуса и силы трения скольжения  $F_1'$  и  $F_2'$  по образующим конуса в сторону противоположную направлению силы  $G$ . Эти силы приведены в двух точках, но они действуют по всей поверхности.

Направление действия силы  $R_1'$  отклонено от направления действия силы  $N_1'$  на угол трения  $\varphi$ , на такой же угол отклонена сила  $R_2'$  от силы  $N_2'$ . Сила  $F_1'$  равняется  $fN_1'$ , а сила  $F_2'$  –  $fN_2'$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения, который равняется  $\operatorname{tg}\varphi$ . Силы  $R_1'$  и  $R_2'$ , а также  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 2.19) действуют по всей поверхности конусной части иглы, которая заглублена в почву. Обозначим каждую из них  $R_i$ .

Для обеспечения равномерного движения конуса вниз (рис. 2.20, а) необходимо выполнение следующих условий:  $G = \sum_{i=1}^n R_i \cos \gamma_i$ , где  $\gamma_i$  – угол

между направлением действия силы  $R_i$  и вертикалью, а  $n$  – количество сил  $R_i$  по всей поверхности конусной части иглы, что имеет контакт с почвой.

Угол  $\gamma_i$  составляет  $180^\circ - \alpha_k - (90^\circ + \varphi) = 90^\circ - \alpha_k - \varphi$ , который в свою очередь равняется  $\sin(\alpha_k + \varphi)$ . Вследствие чего  $R_i \cos \gamma_i = R_i \sin(\alpha_k + \varphi)$ .

Учитывая, что  $R_i = \frac{N_i'}{\cos \varphi}$ , где  $N_i'$  – нормальная сила, обозначенная выше  $N_1'$  и

$N_2'$ , то

$$G = \sum_{i=1}^n R_i \cos \gamma_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_i'}{\cos \varphi} (\sin \alpha_k + \varphi) = \sum_{i=1}^n N_i' (\sin \alpha_k + f \cos \alpha_k), \quad (2.27)$$

где  $\sum_{i=1}^n N_i'$  – сумма нормальных сил по всей поверхности конусной части иглы,

что контактирует с почвой, а  $n$  – количество сил  $N_i'$ .

В случае, когда плунжер не заглубляется в почву и силы трения равняются нулю (рис. 2.19, б), т.е.  $f = 0$ , равновесие сил будет при условии равенства нулю силы  $G$ , которая определяется

$$G = \sum_{i=1}^n N_i' \sin \alpha_k. \quad (2.28)$$

С учетом (2.28) находим

$$\sum_{i=1}^n N_i' = \frac{G}{\sin \alpha_k}. \quad (2.29)$$

Из анализа равенств (2.27) и (2.28) отметим, что для обеспечения заглубления конусной части иглы в почву необходимо создать большую силу, чем при ее уравновешенном положении (рис. 2.19, б). Это объясняется необходимостью преодоления силы трения, возникающей при движении иглы в почве.

Определим условия, при которых одна из игл заглубляется в почву настолько глубоко, что ее две соседние  $K$  (слева) и  $K_1$  (справа) остались на поверхности  $e-e$  (рис. 2.15). На этой поверхности  $e-e$  расположена точка  $e'$  иглы, которая проникла на длину  $B_1e'$  и, соответственно определяется  $CB_1$ -

$(CK)\cos\alpha$ , где  $CK$  – радиус  $r_{\text{дг}}$  диска с иглами, угол  $\alpha$  равняется  $30^\circ$ . Обозначив через  $h_0$  глубину  $B_1e'$  получим

$$h_0 = r_{\text{дг}} - r_{\text{дг}}\cos\alpha = r_{\text{дг}}(1-\cos\alpha), \quad (2.30)$$

Определим необходимую глубину заглабления игл в почву при ее обработке. Как известно, прокалывание почвы иглами осуществляется с целью ее рыхления на глубину 4...6 см, уничтожения поверхностной корки, выравнивания рельефа, закрытия влаги, заделки семян и уничтожения сорняков. Помимо этого, агрофон почвы в случае его прокалывания иглами не может быть излишне плотным. Скорее всего, он будет иметь состояние, которое создается через некоторое время после вспашки или при обработке междурядий пропашных культур. Т.е. значение твердости почвы при таких условиях не будет слишком большим.

Как отмечено выше, в случае установления показателей почвы по диаграмме на рис. 2.17, глубина  $\lambda$  иглы, заглабляемой в почву, должна быть не меньше проекции прямой  $OA$  на ось  $O\lambda$  на этом графике. Эта глубина  $\lambda$  будет значительно меньше глубины пахотного слоя почвы и предела несущей способности этой почвы (точка  $A$  на рис. 2.17). Т.е. возрастание сопротивления почвы заглаблению в него конусной иглы будет меньше, чем в случае деформации почвы по прямой  $AB$  (рис. 2.17).

С учетом изложенного проанализируем заглабление иглы в почву на основе приведенных в данном параграфе результатов теоретического анализа и особенностей конструкции твердомера почвы.

Рассмотрим теперь определение основных параметров иглы игольчатой бороны, имеющей цилиндрическую и коническую части. Это следующие параметры: угол  $\alpha_k$  конуса нижней части иглы, высота  $h_k$  конусной части иглы и радиус  $r$  цилиндрической части иглы, причем  $r = h_k \operatorname{tg}\alpha_k$ .

Для определения необходимого угла  $\alpha_k$  конусности иглы проанализируем еще раз схему на рис. 2.20. На этой схеме силы  $N_1$  и  $N_2$  и другие аналогичные силы действуют со стороны почвы на конус. С такими

же силами, но в противоположном направлении, действует конус на почву. По результатам анализа этого явления получена зависимость (2.29), которая показывает, что при условии постоянного значения силы  $G$  увеличение угла  $\alpha_k$  приводит к возрастанию суммы сил  $\Sigma N_i$ , действующих на почву и выполняющих ее прокол и разрушение. Таким образом установлено, что угол  $\alpha_k$  должен быть по возможности меньшим, иногда будет меньше усилие, под действием которого игла заглубляется в почву и разрушает ее. Это важное качество угла  $\alpha_k$ , так как чем меньше этот угол, тем меньше необходимая действующая сила и тем меньше, таким образом, работа, затраченная на прокалывание почвы.

Однако, при малых значениях угла  $\alpha_k$  конус иглы будет толще, длиннее и острее; это нежелательно по причине поломки игл. Кроме того, из-за слишком малой конусности и толщины иглы почва может быть плохо проколота, оставшись не измельченной и не взрыхленной. Окончательное решение вопроса относительно выбора необходимого угла  $\alpha_k$  будет принято по результатам полевых испытаний дисков с иглами разной конусности. Таким образом установлено, что основными факторами, влияющими на определение необходимого значения силы для заглубления в почву игл бороны являются: глубина заглубления  $\lambda$  иглы, угол трения иглы о почву и угол, характеризующий конусность иглы. Кроме того, сила, которая необходима для заглубления иглы, зависит от твердости почвы, т.е. от ее механического состава и влажности. Однако существующие технологии механической обработки почвы не предусматривают использование игольчатых борон при ее высокой влажности.

Определим зависимость глубины заглубления в почву от силы давления на нее, ее параметров и свойств почвы. Иглы бороны присоединяются к дискам консольно. Консоль лучше сопротивляется изгибу, если она выполнена конусной. Таким образом, иглы представлены в виде конусов, каждый из которых в верхней части имеет достаточно большой диаметр, снизу его конец заострен.

Глубина полного заглубления конуса иглы в почву обозначена  $\lambda_k$ , она равняется высоте конуса  $h_k$ ; при этом глубина заглубления некоторой точки поверхности иглы в почву обозначены  $\lambda$  (то есть без буквы к). Если же игла полностью в почву не заглубилась, то глубину ее нижнего кончика также обозначим  $\lambda_k$  но это  $\lambda_k$  в данном случае меньше  $h_k$ .

Из анализа приведенных выше данных следует, что силы  $G$ , которые нужно приложить к каждой игле сверху вниз для прокалывания почвы, тем больше, чем больше удвоенный тангенс угла  $\alpha_k$ , глубины  $\lambda$  и  $\lambda_k$ , а также коэффициент трения иглы с почвой (т.е. сила  $G$  прямо пропорциональная коэффициенту  $f$ , глубинам  $\lambda$  и  $\lambda_k$  и двум тангенсам угла  $\alpha_k$ ).

На основе изложенного зависимость силы  $G$  от влияющих факторов, можно математически представить таким образом:

$$G \approx k_{пf} \lambda \ 2tg\alpha_k, \quad (2.31)$$

где  $k_{п}$  – коэффициент, учитывающий твердость в выходном состоянии

Так как  $G$  измеряется в Н, а Н равняется кг м/с<sup>2</sup>,  $\lambda$  измеряется в м, то коэффициент  $k_{п}$  измеряется в кг/с<sup>2</sup>. Коэффициенты  $k_{п}$  находятся опытным путем.

Если глубина  $\lambda$  равняется глубине  $\lambda_k$ , то в формулу (2.31) подставляется вместо  $\lambda$  глубина  $\lambda_k$ .

В выражении (2.31)  $f$  – коэффициент трения скольжения конуса иглы с почвой. Во время проколов почвы иглой абсолютная влажность этой почвы по литературным данным [54, 55] находится в пределах от 10% до 16%. В соответствии с другими данными [48 с. 40, рис. 1.4, б] коэффициент трения качения стали по такой почве при приведенной влажности находится в пределах от 0,5 до 0,6. На основании изложенного будем считать, что формула (2.31) может быть нами использована при  $f \approx 0,55$ .

По формуле (2.31) определяется сила  $G$ , необходимая для заглубления в почву конуса высотой  $\lambda_k$ . Это означает, что при  $\lambda_k = h_k$ , где  $h_k$  – необходимая глубина заглубления иглы в почву (6 см), формула (2.31)

позволяет получать силу  $G$  при полном заглублении конуса. Если же  $\lambda < \lambda_k = h_k$ , то по формуле (2.31) находится сила  $G$  при глубине  $\lambda$ , которая меньше  $h_k$ .

Принимаем такую математическую модель (2.31) для определения силы  $G$  сопротивления заглублению конусной иглы, мы считаем, что сила  $G$  возрастает при возрастании глубин  $\lambda$  и  $\lambda_k$  и удвоенного тангенса угла  $\alpha_k$  при вершине конуса ( $2\text{tg}\alpha_k$ ), причем зависимость эта близка к линейной.

Из (2.31) следует, что коэффициент  $\kappa_{\text{п}}$  равняется:

$$\hat{e}_i \approx \frac{G}{f\lambda 2 \text{tg} \alpha_k}. \quad (2.32)$$

Хотя формула (2.31) получена с учетом результатов теоретического анализа [см. рис. 2.19 и 2.20 и формулы (2.27), (2.28) и (2.29)], она лишь частично является теоретической, а в другом она экспериментальная. По формуле (2.32) нами ниже будут проведены расчеты с использованием опытных данных для определения значений коэффициента  $\kappa_{\text{п}}$ . Таким образом, выражения (2.31) и (2.32) являются теоретически-экспериментальными зависимостями.

Определение значений коэффициентов  $\kappa_{\text{п}}$  производится при полной глубине  $\lambda_k$  по опытным данным. При таких исследованиях на почвах различной твердости  $p$  по формуле (2.18) сначала определяются эти показатели, а потом проводятся опыты с целью получения диаграмм, аналогичных с полученными при помощи прибора (рис. 3.2, 3.3).

В этих диаграммах нас интересует только та ее часть, которая находится на глубине  $\lambda_k$ . На рис. 2.21 представлена лишь эта часть диаграммы.

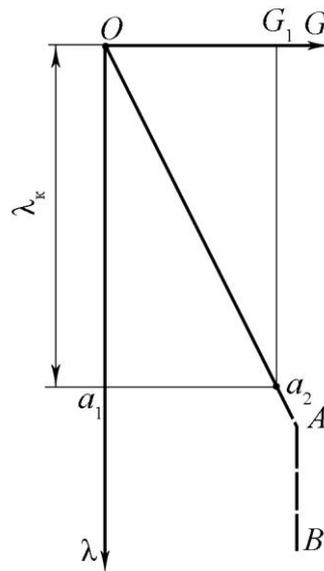


Рисунок 2.21 – Пример диаграммы измерения силы  $G$  при прокалывании почвы иглой бороны

Глубине  $\lambda_k$  на диаграмме отвечает сила  $G_1$ , отложенная на горизонтальной оси. Эта сила равняется жесткости  $\kappa_{пр}$  пружины в Н/м, помноженной на отрезок  $a_1a_2$  диаграммы, изображающий на ней деформацию пружины в см. Коэффициент трения  $f$ , как уже отмечалось, равняется 0,55. Угол  $\alpha_k$  определяется по конусу иглы. Тогда подставляя эти данные в формулу (2.32) и учитывая, что  $2f = 2 \cdot 0,55 = 1,1$ , находим значение коэффициента  $\kappa_n$ , который характеризует данную почву с его твердостью  $p$ :

$$\hat{e}_i \approx \frac{G_1}{1,1\lambda_k \operatorname{tg} \alpha_k}. \quad (2.33)$$

Таким образом определяют опытное значение коэффициента, с помощью которого по зависимости (2.31) определяется сила  $G$ , необходимая для прокола почвы. Значения коэффициента  $\kappa_n$  находят с помощью прибора, представленного на рис. 3.2 и 3.3.

Сначала мы построили опытные зависимости силы  $G_1$  от деформации почвы  $\lambda_k$  в пределах  $\lambda_k$  от 0 до  $h_k$ , т.е. нами были получены зависимости силы

$G$  от различных факторов по результатам опытов, проведенных в полевых условиях при значениях  $\lambda_k$ , что равняются  $0, 0,25h_k, 0,50h_k, 0,75h_k$  и  $1,0h_k$ . Зависимости силы  $G$  от  $\lambda_k$  были получены с помощью прибора (рис. 3.2, 3.3) при угле  $\beta=0$  и при  $\beta=15^\circ$ . Было определено влияние угла  $\beta$  на силу  $G$ . Вместе с опытным определением силы  $G$  будет определяться и твердость почвы на глубине от 0 до 8 см с помощью устройства, представленного на рис. 3.2 и плунжера, приведенного на рис. 2.16, а.

Имея диаграмму зависимости силы  $G$  от глубины  $\lambda_k$  можно определить работу, затраченную иглой на один прокол глубиной 6 см, которую обозначим  $W_0$ .

Необходимые расчеты значений коэффициентов по выражению (2.32) приводятся в п. 3.4 III главы, а результаты опытов – в п. 4.3 IV главы. Зависимость силы, необходимой для разрушения почвенной корки одной иглой от влияющих факторов, определялась опытным путем с использованием упомянутого прибора (рис. 2.20). При этом получена зависимость, представленная на рис. 2.22. На этом графике по горизонтальной оси отложена сила  $G$ , необходимая для заглубления иглы в почву через корку, а по вертикальной оси вниз отложена глубина  $\lambda$  проникновения нижнего конца в почву. Из полученного графика видно, что эту зависимость можно аппроксимировать формулой типа  $G = k\sqrt{\lambda}$ , где  $k$  – коэффициент, установленный по результатам опытных данных.

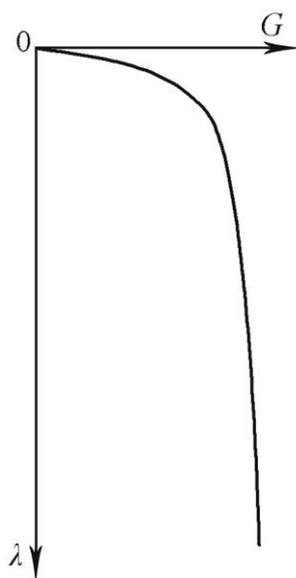


Рисунок 2.22 – Зависимость силы  $G$ , разрушающей почвенную корку, от глубины  $\lambda$  заглубления в почву нижнего конца иглы

С учетом формулы (2.31), согласно которой сила  $G$  пропорциональна коэффициенту трения  $f$  и тангенсу угла  $\alpha_k$  сила  $G$  будет равняться:

$$G = 2\kappa_{пк} f \operatorname{tg} \alpha_k \sqrt{\lambda}, \quad (2.34)$$

где  $\kappa_{пк}$  – коэффициент, учитывающий твердость почвы в исходном состоянии, а  $f$  и  $\operatorname{tg} \alpha_k$  – те же величины, что и в формуле (2.31). Коэффициент  $\kappa_{пк}$ , учитывающий твердость почвенной корки, определяется опытным путем.

## 2.6. Определение работы, затрачиваемой на прокалывание почвы иглами игольчатой бороны

Работа, затрачиваемая на прокалывание почвы игольчатой бороной, может быть определена как результат числа нанесенных этой почве проколов на работу, затрачиваемую на прокалывание одного отверстия в почве.

На рис. 2.23 представлена схема участка поля, на котором посеяна широкорядная культура. На схеме показаны три ряда растений, междурядья и

защищенные полосы. Ширина междурядья обозначена  $B_m$ , она состоит из двух защищенных полос шириной  $a_n$ , где не должно быть прокалывания, и ширины части междурядья, что обрабатывается (прокалывается).

Расчеты проводим при следующих допущениях: а) почва однородная по своему составу; б) все иглы опускаются в почву на одинаковую глубину.

Обозначим через  $W$  работу, затрачиваемую на прокалывание почвы иглами за определенный промежуток времени. Эту работу представим в виде результата:

$$W = W_0 m_r, \quad (2.35)$$

где  $W_0$  – работа, затрачиваемая на выполнение одного прокола;  $m_r$  – число проколов, сделанных за заданный промежуток времени.

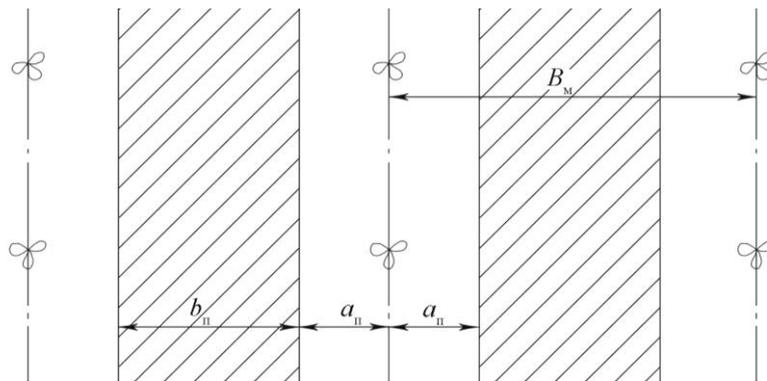


Рисунок 2.23 – Схема участка поля, где посеяна широкорядная культура игде в промежутке между рядами выполняется рыхление почвы (эти участки заштрихованы):  $a_n$  – защитная полоса;  $b_n$  – зона действия игл бороны,  $B_m$  – ширина междурядья

Определим сначала величину  $W_0$ .

Для этого обратимся к рис. 2.24, на котором представлена графическая зависимость силы  $G$  давления плунжера твердомера на почву от глубины  $\lambda$  его заглубления (диаграмма смятия почвы). На этой диаграмме  $\lambda$  – это глубина заглубления плунжера в почву, а  $G$  – сила сжатия пружины, давящей на плунжер.

Диаграмма аппроксимируется двумя прямыми линиями  $OA$  и  $AB$ , что характеризуют две фазы деформации почвы. Во время первой фазы (линия  $OA$ ) сила сопротивления почвы возрастает пропорционально линейной деформации  $\lambda$ . Во время другой фазы (линия  $AB$ ) при возрастании деформации  $\lambda$  сопротивление почвы практически не изменяется, т.е. почва «течет» (деформируется) под действием постоянного давления на него.

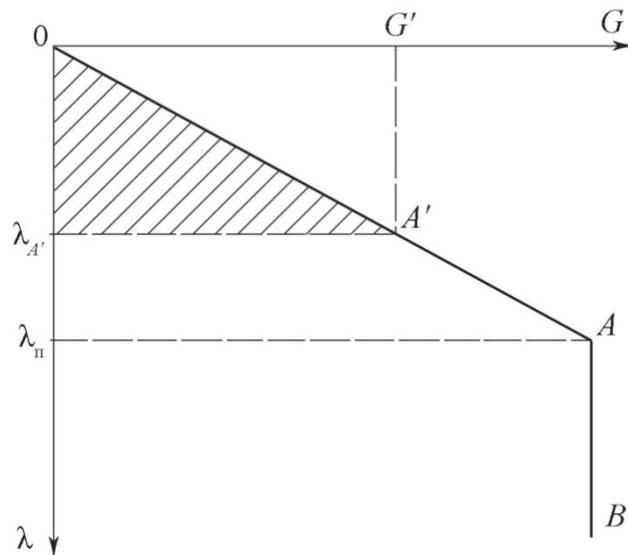


Рисунок 2.24 – Графическая зависимость глубины  $\lambda$  заглабления иглы в почву от силы  $G$  давления на иглу (диаграмма смятия почвы)

Будем считать, что проколы почвы производятся во время первой фазы, при которой глубина заглабления плунжера мала (т.е. меньше расстояния  $O\lambda_{п}$  на диаграмме). Тогда работа  $W_0$  затрачиваемая на один прокол почвы, равняется [55] результату линейно возрастающей силы  $G$  на глубину  $\lambda$ , деленному на 2, т.е.  $G\lambda/2$ , так, например работа на прокол силой  $G'$  на глубину  $O\lambda_{A'}$  до точки  $A'$  (рис. 2.24) равняется  $G'\lambda_{A'}/2$ , т.е. равняется площади треугольника  $OA'A'$  в выбранном масштабе (заштрихована на рис. 2.24). Данная зависимость справедлива при изменении силы  $G$  и глубины  $\lambda$  от точки  $O$  до точки  $A$  по прямой линии, вследствие чего можно представить

зависимость работы  $W_0$  на выполнение иглой одного прокола от факторов, что влияют следующим образом:

$$W_0 = \frac{G\lambda}{2}, \quad (2.36)$$

где  $\lambda$  – глубина прокола почвы иглой с силой  $G$ .

Для определения числа  $m_r$  учитываем, что за один оборот диска игольчатой бороны наносится число  $n_r$  проколов (в нашем случае равняется 12). Число проколов  $n_r$ , которое осуществляет секция за один оборот, равняется  $n_r m_d$ , где  $m_d$  – число дисков в секции (в нашем случае  $m_d = 5$ ). Число оборотов диска на гоне длиной  $L_r$  равняется  $L_r/L_k$ , где  $L_k$  – длина контура одного диска, определяется по формуле (2.37), если угол  $\alpha$  подставить в нее в рад. Тогда

$$\frac{L_r}{L_k} = \frac{L_r}{2n_r r_{др} \sin \frac{\pi}{n_r}}. \quad (2.37)$$

Число  $m_r$  проколов, которые сделает секция за весь промежуток времени, будет равняться

$$m_r = n_r m_d \frac{L_r}{2n_r r_{др} \sin \frac{\pi}{n_r}} = \frac{L_r m_d}{2r_{др} \sin \frac{\pi}{n_r}}. \quad (2.38)$$

Подставляя значения  $W_0$  по (2.36) и  $m_r$  по (2.38) в равенства (2.35), находим  $W$ :

$$W = \frac{G\lambda}{2} \cdot \frac{L_r m_d}{2r_{др} \sin \frac{\pi}{n_r}} = \frac{GL_r m_d \lambda}{4r_{др} \sin \frac{\pi}{n_r}}, \text{ Дж}. \quad (2.39)$$

Так вычисляется работа, затрачиваемая на прокалывание почвы игольчатой бороной на гоне длиной  $L_r$ . С формулы видно, что работа  $W$  тем больше, чем больше число дисков, число игл на диске, сила давления игл на почву и глубина  $\lambda$  прокола.

Если длину гона  $L_T$  помножить на ширину междурядья  $B_M$ , что равняется  $b_{\Pi} + 2a_{\Pi}$ , то получим обработанную площадь  $F_{\Pi}$ :

$$F_{\Pi} = B_M L_T = L_T (b_{\Pi} + 2a_{\Pi}), \text{ м}^2 \quad (2.40)$$

Площадь, обработанная за 1 секунду,  $F_c$  будет равняться:

$$F_c = \frac{F_{\Pi}}{t} = \frac{L_T (b_{\Pi} + 2a_{\Pi})}{t}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (2.41)$$

где  $t$  – время работы агрегата, с

Если работу  $W$  в Дж поделить на время  $t$  работы игольчатой бороны во время движения по гону в с, то получим потребляемую мощность  $N_M$ .

Время  $t$  равняется  $L_T/v_M$ , где  $v_M$  – скорость движения агрегата. Тогда

$$N_M = \frac{Gm_d \lambda v_M}{4r_{др} \sin \frac{\pi}{n_T}}, \text{ Вт} \quad (2.42)$$

Таким образом, по представленным в данной главе исследованиям можно сделать следующие выводы:

1) В результате анализа существующих конструкций игольчатых борон, осуществляющих движение по почве в продольно-вертикальной плоскости, разработаны однодисковые игольчатые бороны, подтвержденные патентами на полезную модель № 77789 от 25.02.2013 г. и № 82771 от 12.08.2013 г.

2) Теоретическими исследованиями перемещения дисков борон с иглами по почве в продольно-вертикальной плоскости установлен характер движения дисков и точек игл, а также контуров, что описаны концами игл [формулы (2.4), (2.5), (2.6) и (2.7)]. Анализом характера перемещения по почве дисков с иглами установлено, что во время движения любого диска, его ось не связана с осями других дисков, центр диска не будет двигаться по прямой; его движение будет складываться с ряда колебаний вверх и вниз. Для прямолинейного движения центра диска без колебаний вниз и вверх нужно, чтобы оси всех дисков секции были связаны с одним держателем и

двигались вместе с ним. Угол  $\beta$  между направлением вектора скорости  $v_k$  конца иглы, которая опускается, и вертикалью определяется по формуле (2.11) и тем он меньше, чем ближе конец этой иглы, что поворачивается вниз к горизонтали  $C_v C_{v1} C_{v2}$ , а при опускании конца иглы на эту горизонталь данный угол  $\beta$  равняется нулю, т.е. игла при ее опускании на горизонталь располагается вертикально.

3) Результат работы бороны зависит от степени синхронности действия игл разных дисков на почву. Если нижние иглы опускаются в почву одновременно, то произойдет одновременный прокол этими иглами почвы; если же иглы разных дисков не опускаются в почву одновременно, то будет поочередное проникновение игл разных дисков в почву, причем возникновение этих проколов может иметь случайный характер и зависеть от положения игл одного диска относительно другого перед проколом. Угол прокола почвы, т.е. угол поворота диска с иглами для заглубления одной иглы в почву и выхода из него при равномерном движении центра диска в два раза больший угла поворота диска для опускания конца иглы и его заглубления в почву на полную глубину.

4) Проанализировав плоскопараллельное движение игл игольчатой бороны в продольно-вертикальной плоскости, были получены дифференциальные уравнения (2.13) этого движения. Прокол почвы иглами происходит при одновременном действии  $P_\delta$  и  $G$ , что определено по формуле (2.15). Анализом данных равенств получена зависимость (2.23) для определения необходимой силы  $P_\delta$ , обеспечивающей движение центра диска с иглами. Эта сила  $P_\delta$  зависит от силы  $Q$  сопротивления почвы при заглублении игл и угла  $\psi$  поворота иглы во время вращения. По формуле (2.23) построен график зависимости силы  $P_\delta$  от пути движения центра  $C$  иглы и проведен анализ полученных зависимостей.

Также проведен анализ воздействия иглы бороны на почву с использованием компьютера и построены графики зависимости силы  $P_\delta$  от влияния факторов. Из построенных графиков следует, что в начале прокола

почвы иглой и в конце прокола сила  $P_0$  равняется нулю; максимальное значение силы  $P_0$  достигается в средней части пути движения центра С каждой иглы, которая прокалывает почву.

5) Согласно полученным данным сила  $Q$  пропорциональна глубине  $\lambda_k$  заглубления конуса иглы в почву. В момент касания концом иглы почвы, можно считать, что глубина  $\lambda_k$  равняется 0, сила  $Q$  также равняется нулю. В других случаях сила  $Q$  равняется  $k\lambda_k$ , где  $k$  – опытный коэффициент.

6) Предложена математическая модель (2.31), позволяющая определить силу, которая необходима для заглубления иглы в почву. Эта сила  $G$  тем больше, чем больше угол конусности иглы  $\alpha_k$ , твердость  $p$  почвы и коэффициент трения  $f$  иглы с почвой.

7) Работа, затрачиваемая на прокалывании почвы иглами игольчатой бороны, возрастает с увеличением числа дисков с иглами в машине, силы давления игл на почву, глубины заглубления игл в почву и длины гона и с уменьшением радиуса диска и угла между иглами в диске. Мощность, что потребляется при работе игольчатой бороны возрастает с увеличением скорости движения машины, числа дисков с иглами, силы давления игл на почву и уменьшением радиуса диска.

8) При проектировании игольчатых борон с целью минимизации разрушающей силы необходимо обеспечить глубину заглубления игл в почву на величину, предусмотренную технологией обработки. Для этого конструкция бороны должна предполагать ее установку на заданную глубину и достижения этой глубины в ходе выполнения операции. Кроме этого, материал иглы должен иметь достаточную прочность и износостойким, чтобы в процессе работы сохранялась начальная (выходная) конусность игл.

## ГЛАВА 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1. Общие положения

Вследствие того, что твердость по отношению к контролю увеличивается значительно быстрее, чем плотность (300...800% в сравнении с 15..20%), то при исследовании явлений деформации предпочтение целесообразно отдавать этому показателю. Изменение в твердости почвы при деформации распространяется на большую глубину, чем изменение плотности. Это подтверждается характером возрастания обеих величин в слое 20...30 см. Если по показателю плотности деформация в этом слое начинает спадать в сравнении с вышеизложенным, то твердость, напротив, продолжает увеличиваться.

Обработка первоначально уплотненной почвы сопровождается созданием глыб даже в состоянии физической спелости, причем, с увеличением проходов и массы трактора способность исследуемой почвы к крошению ухудшается. Одновременно с этим происходит увеличение затрат энергии на обработку. Для того, чтобы получить приблизительно равные показатели крошения (около 90...100% комков размером меньше 30 мм) для почвы, уплотненной при давлении 1,2 и 0,4 кг/см<sup>2</sup>, необходимо усилие разрушения соответственно 0,009 и 0,001 кг/см<sup>3</sup>. Стоит отметить, что крошение сопровождается не только образованием глыб, но и поверхностным рыхлением слоя, который обрабатывается до плотности 0,9...1,0 г/см<sup>3</sup>, что увеличивает потери продуктивной влаги, содержащейся в почве.

Потенциал прочности почвы состоит из сопротивления разрыву, сдвигу и раздавливанию. При уплотнении и крошении почвы сначала разрывается (на это затрачивается очень не большая – не более 10...30%) часть потенциала мощности, потом наступает сдвиг и раздавливание. Наиболее грубое и энергетически емкое воздействие на почву соответствует

раздавливанию. При этом происходит глубокое разрушение внутренних почвенных сил связности, деформируется наиболее тонкая часть порового пространства, пропадают структурные связи в макро- и даже микроагрегатах почвы. После раздавливания в почве тормозятся процессы восстановления ценной структуры и пор. Интенсивно раздавленная почва склонна к созданию сменной бесструктурной массы, при крошении которой возникают глыбы, это мешает проникновению в почву воздуха и влаги. Исходя из этого, можно допустить только такое воздействие на почву, которое направлено на преодоление только разрыва и сдвига. Суммарно этот показатель можно приравнять до уровня допустимой нагрузки на почву. При влажности 20...26% массы почвы и нормальной выходной плотности (1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>) уровень допустимого давления изменяется в пределах 0,45...0,88 кгс/см<sup>2</sup>. При увеличении влажности он опускается до 0,22, при снижении – увеличивается до 1,3...2,3 кгс/см<sup>2</sup>.

Способность почвы к обновлению своих выходных параметров плотности в процессе объемных изменений не должна нарушаться. Установлено, что умеренно уплотненная почва хорошо обрабатывается после нескольких циклов обезвлаживания-высушивания. Уплотненная осенью почва (чернозем) способна разуплотняться до выходного значения до весны следующего года, если в процессе уплотнения не была достигнута величина плотности ориентировочно 1,3 г/см<sup>3</sup>. Если выходное уплотнение составляло 1,35...1,4 г/см<sup>3</sup>, то зимне-весенний период практически не влияет на эти показатели, а его последствия отражаются на протяжении двух лет на основных агрофизических свойствах.

То есть, черноземы ни в коем случае нельзя уплотнять выше 1,3 г/см<sup>3</sup>. Выходное удельное давление в зависимости от влажности и выходной плотности находится в интервале 0,5 (при влажности 26...28%) – 1 кгс/см<sup>2</sup> (20...24%) и лишь на почвах с влажностью существенно более низкой, чем физическая спелость, допустимо некоторое превышение этого показателя. Недостижение этого положения может привести к сильным изменениям

чернозема, при которых он будет более склонен к воздействию ходовых систем МТА.

Основным показателем, характеризующим оценку качества рыхления почвы, является крошение. Поэтому, определение этого показателя – трудоемкая операция, требующая больших затрат ручного труда и времени на обработку данных. К тому же при оценке крошения почвы не устанавливается изменение степени разрыхления почвы в срезе обрабатываемого пласта, что вызвало бы интерес при исследовании различных параметров орудий, кроме глубокорыхлителя и игольчатых борон.

Установлено, что размер агрегатов, характеризующих крошение почвы, влияет на такой показатель как твердость почвы. Твердость является комплексным показателем состава почвы и отображает такие характеристики уплотненной почвы, как плотность, влажность и др. К тому же измерение твердости почвы методически является очень простым. Однако известные для этого методики и технические средства имеют свои недостатки и требуют соответствующей доработки.

Исследования проводили на разработанных приборах и установках в лабораториях и полевых условиях с целью подтверждения и дополнения сделанных теоретических допущений и получения необходимых экспериментальных данных с помощью которых будут обоснованы обоснования параметры и режимы работы исследуемых рабочих органов.

### **3.2 Исследования твердости почвы**

**Методика измерения твердости почвы.** Исследования проводились с помощью устройства для измерения твердости (рис. 3.1), предназначенного для измерений послойно на глубину до 38 см при определении агротехнических показателей с/х машин. Твердомер предназначен для работы в поле и помещениях при температуре окружающего воздуха от +4°C до +40°C, относительной влажности от 45% до 80% и атмосферного давления 84...107 кПа (630...680 мм рт. ст.).

Основные технические характеристики твердомера приведены в табл.

### 3.1. Функциональные возможности твердомера:

- установка нуля на электронном блоке индикации;
- заглублиение плунжера в почву электромеханическим приводом (шуруповертом);
- запись силы сопротивления почвы при заглублиении плунжера через каждые 0,42с непрерывной цепочкой;
- работа в поле от резервного питания;
- работа в лабораторных условиях от резервного питания и от сети 220V.



Рисунок 3.1– Внешний вид твердомера

Принцип действия твердомера основан на преобразовании силы сопротивления почвы плоскому плунжеру, заглубляемому в почву, в электрический сигнал. Этот сигнал возникает в тензометрическом датчике и в дальнейшем изображается на табло электронного блока индикации и накопления в независимой памяти электронного блока.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики твердомера

	Наименование показателей	Значения
1	Тип устройства	Переносной
2	Способ удержания в контакте с почвой	За счет массы тела оператора
3	Количество обслуживающего персонала	2
4	Габаритные размеры, мм: высота длина ширина	890 360 480
5	Масса, кг: корпус электро-механический привод(шуруповерт) электронный блок индикации общая масса	8,00 1,66 0,63 10,3
6	Способ питания	Резервное питание
7	Способ обработки накопленной информации	При помощи ПК в Microsoft Excel
8	Диапазон глубин измерения твердости, см	0...40

Твердомер состоит из таких основных частей (рис. 3.1): корпуса 1, электромеханического привода 2, резьбовой пары (винт-гайка) 3, силового тензометрического датчика с кабелем 4, подвижной штанги с плунжером 5, электронного блока индикации и накопления информации 6. Корпус твердомера имеет трубчатый стояк для монтажа элементов устройства и

платформу для установки его на поверхность почвы и размещения на ней оператора с твердомером

В электронном блоке индикации и накопления информации измеряется сила тензопреобразователей и вычисляется сила сопротивления заглублению в почву плунжера. Шуруповерт в качестве электромеханического привода при включении кнопки на ручке вращает резьбовую штангу, от которой вращательное движение преобразуется в поступательное движение тензодатчика со штангой и плунжером. Движение штанги с плунжером ограничивается с обоих концов при помощи концевых выключателей, разъединяющих электродвигатель шуруповерта от питания (аккумулятора). Электронный блок индикации выключается кнопкой на клавиатуре лицевой панели. Шуруповерт выключается кнопкой под ручкой. Направление вращения изменяется кнопкой в виде задвижки.

Электронный блок после выполнения цикла замеров твердости почвы подключается к ПК кабелем. На компьютере при этом заполняются данные измерений в таблице. По полученным данным строятся графические зависимости в координатах:

по оси  $x$  – глубина заглубления в см;

по оси  $y$  – твердость почвы в  $\text{кг/см}^2$  или в  $\text{МПа}$ .

Условия проведения исследований: температура окружающей среды  $+11^\circ\text{C}$ ; относительная влажность 81% и атмосферное давление – 92 кПа.

**Методика измерения.** Определение твердости почвы осуществляли с помощью твердомера Ревякина. Схема с измененной формой плунжера (то есть с конусом) представлена на рис. 3.2. Прибор состоит из рукоятки 1, пружины 2, штанги 3 и деформатора (конусного плунжера) 5. Нижний конец пружины 2 жестко связан со штангой 3 (упирается в жестко связанный со штангой упор 4). При надавливании рукояткой 1 на пружину 2, давление передается через пружину на штангу 3, а через нее на деформатор 5, представляющий собой конус иглы. При такой конструкции давление сжатия пружины равняется давлению деформатора (конуса) 5 на почву. Штанга 3 и

конус (деформатор) 5 движется по вертикали в направляющей 6. Верхнее положение рукоятки 1 совпадает с линией  $O-O$ , а деформация пружины по вертикали обозначена  $y$ . Это схема обычного твердомера (таких конструкций много). Таким образом, твердомер на схеме (рис. 3.2) отличается от существующих приборов формой деформатора.

Твердомер Ревякина отличается от других приборов тем, что запись пути  $\lambda$  движения деформатора (плунжера) происходит по вертикали (в направлении  $\lambda$  на рис. 3.3), а регистрация деформации сжатия пружины происходит по горизонтали (перпендикулярно направлению пути  $\lambda$ ). Схема регистрирующей части этого твердомера приведена на рис. 3.3. На диаграмме, которую получаем в таком приборе (рис. 3.3), путь деформации почвы откладывается вниз по вертикали (рис. 3.3, линия  $\lambda$ ), а деформация сжатия пружины изображается по горизонтали (рис. 3.3, линия  $ab$ , параллельно оси  $Oy_1$ ). В таком приборе изображение деформации почвы при условии, что почва «течет», то есть продолжает деформироваться под действием постоянного давления на него, приведена на рис. 3.3 в виде вертикальной прямой  $AB$ . Как было отмечено раньше, точка  $A$  этой прямой расположена значительно ниже глубины  $\lambda$ , на которую опускается кончик иглы бороны в случае заглубления в почву. Соответственно, зависимость силы  $G$  давления на конусную часть иглы от глубины  $\lambda$  ее заглубления в почву близка к линейной и находится в пределах глубины заглубления иглы до точки  $A$  на диаграммах (рис. 3.2 и рис. 3.3), полученных с помощью твердомеров.

Представленные на рис. 2.12, *а* деформаторы необходимы для определения твердости почвы, а деформаторы на рис. 2.12, *б* и рис. 3.2, 3.3 для определения сопротивления почвы заглублению в нее иглы. Для лучшего пояснения диаграмм, отметим, что горизонтальный отрезок  $ab$  на рис. 3.3 представляет собой в определенном масштабе силу, действующую на почву вертикально вниз в точке  $a$ .

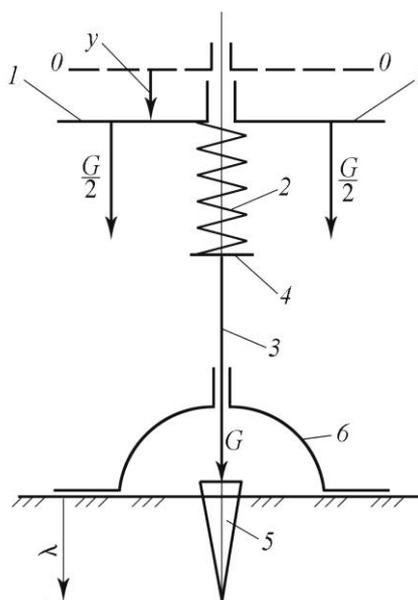


Рисунок 3.2 – Схема твердомера почвы деформатором конусного типа: 1 – рукоятка, 2 – пружина, 3 – штанга, 4 – упор, 5 – деформатор, 6 – направляющая

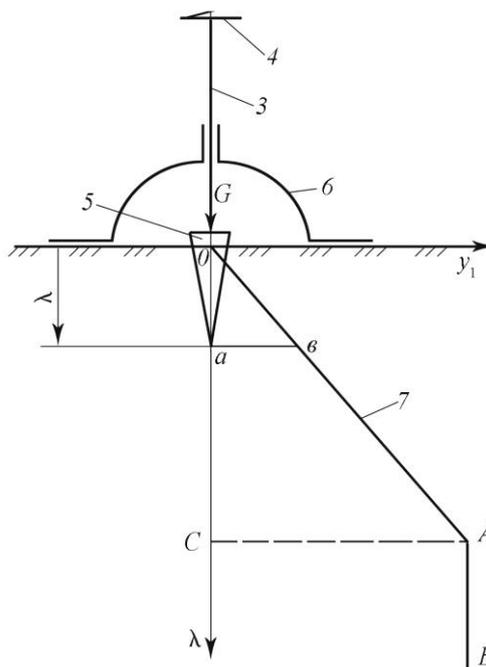


Рисунок 3.3 – Схема регистрирующей части твердомерачувствительной конструкции Ревякина: 3 – штанга, 4 – упор, 5 – деформатор, 6 – направляющая, 7 – линия деформации почвы иглой, AB – линия изменения давления

Также горизонтальный отрезок  $s_A$  на диаграмме представляет собой силу, действующую на почву вертикально вниз в точке  $s$  на глубине  $0$ с диаграммы.

Таблица 3.2 – Определение коэффициента  $k_{II}$

Номер опыта	Глубина проникновения конуса (см)	Твердость почвы, МПа	Значение коэффициента $k_{II}$	Среднее значение коэффициента $k_{II}$
1	2	0,03		
	4	0,17		
	6	0,34		
	8	0,55		
2	2	0,025		
	4	0,11		
	6	0,3		
	8	0,5		
3	2	0,02		
	4	0,095		
	6	0,29		
	8	0,48		
4	2	0,025		
	4	0,12		
	6	0,3		
	8	0,49		

С целью обработки данных табл. 3.2 полученных по результатам экспериментальных исследований [148], использовались методы комплексного статистического исследования, включающие в себя методы статистики, дисперсного и регрессивного анализа.

**Результаты исследований влияния формы плунжера на усилия промина почвы.** Для определения твердости почвы выбирали участки

характерные для данного поля. Опыты проводили по специально разработанной программе, изложенной выше. Экспериментальные исследования проводили на опытном поле Украинского института прогнозирования и испытаний техники и технологий для сельскохозяйственного производства им. Л. Погорелого. Опыты проводили на участках, предназначенных для посева сахарной свеклы. Способ обработки почвы традиционный, осенняя глубокая вспашка, весеннее лущение и закрытие влаги. Опыты проводили на участках длиной 50...75 м.

Исходные условия имели характеристику, приведенную в таблице 3.3.

Таблица 3.3– Характеристика исходного материала

Условия работы:	
Тип почвы	
Влажность почвы в слое от 0 до 15 см, %	19,5-27,2
Твердость почвы в слое от 0 до 15 см; МПА	0,29-1,28
Засоренность сорняками в зоне обработки, шт/м <sup>2</sup>	18
Высота сорняков, см	5,6
Дата проведения исследований	16.08.2014

По результатам эксперимента определялось усилие сопротивления проникновения плунжера (иглы) в почву, возникающего в зависимости от их конфигурации (геометрических характеристик), характеристик почвы (влажность, плотность). Опыты проводили в 15 повторностях.

Исследования по определению твердости почвы проводились с помощью специального устройства (рис. 3.1).

Первая серия опытов посвящена исследованию влияния формы плунжера на значение твердости почвы. Для этой серии опытов использовали плунжеры с площадью поперечного сечения 1,01 см<sup>2</sup> цилиндрической

формы, плунжеры конической формы с двойным углом при вершине  $10^\circ$ ,  $14^\circ$  и  $18^\circ$  и также комбинированный коническо-цилиндрический плунжер с углом при вершине  $14^\circ$  (рис. 3.4). Анализ полученных результатов показал, что распределение значений твердости, полученной при условии использования одного плунжера, не существенное.

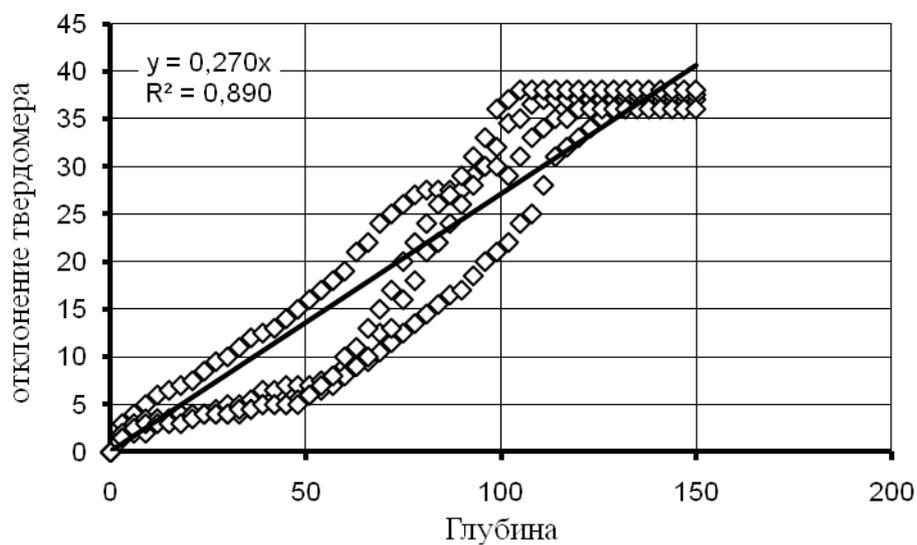
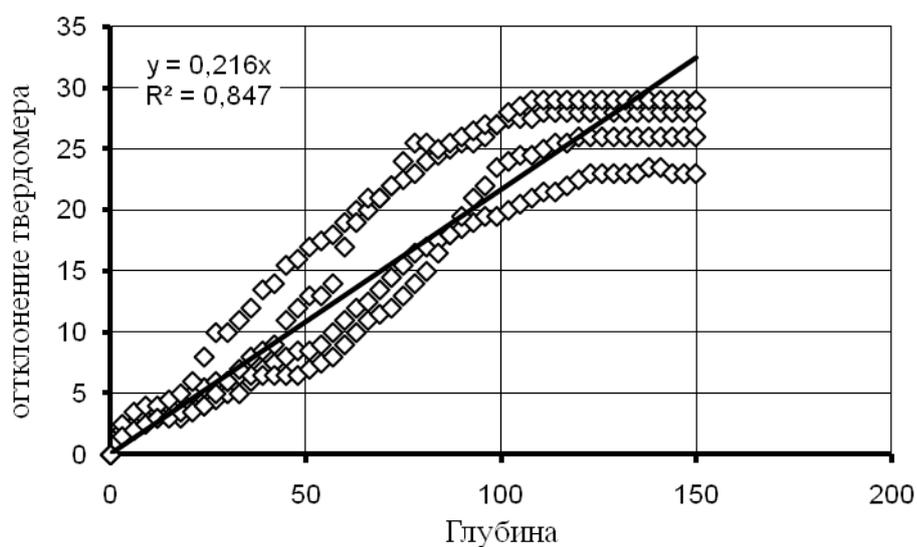


Рисунок 3.4 – Плунжеры для определения твердости почвы цилиндрической и конической форм с двойным углом при вершине  $10^\circ$ ,  $14^\circ$  и  $18^\circ$

Значения твердости почвы получены по результатам исследований плунжеров различной формы отличаются (рис. 3.5-3.6).

Оценка однородности результатов проводилась путем нормирования данных, которая заключалась в определении стандартного отклонения от среднего значения и пересчета данных по этой шкале. Величины, превышавшие два стандартных отклонения, считались такими, что не принадлежат общей совокупности в результате действия на них других

факторов. Проверка подчинения распределения экспериментальных данных нормальному закону проводилась по критериям Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат [39].



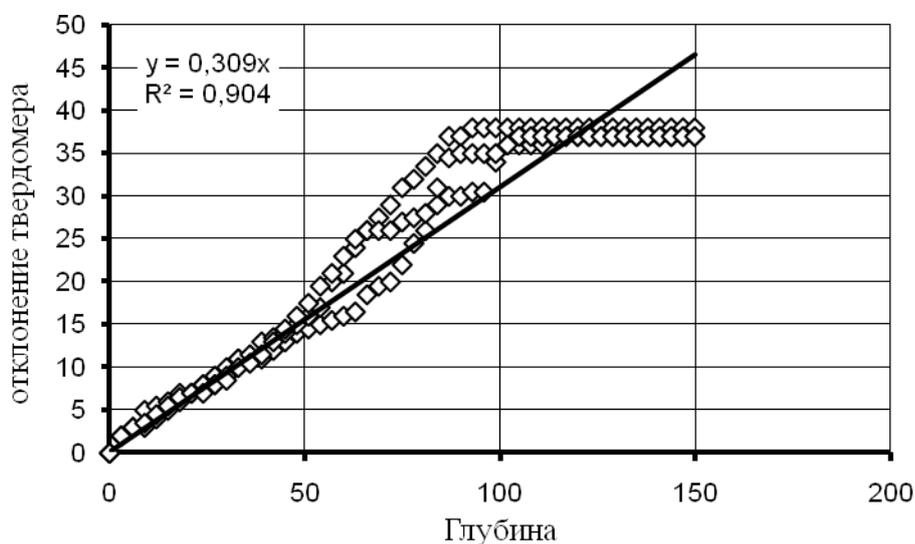
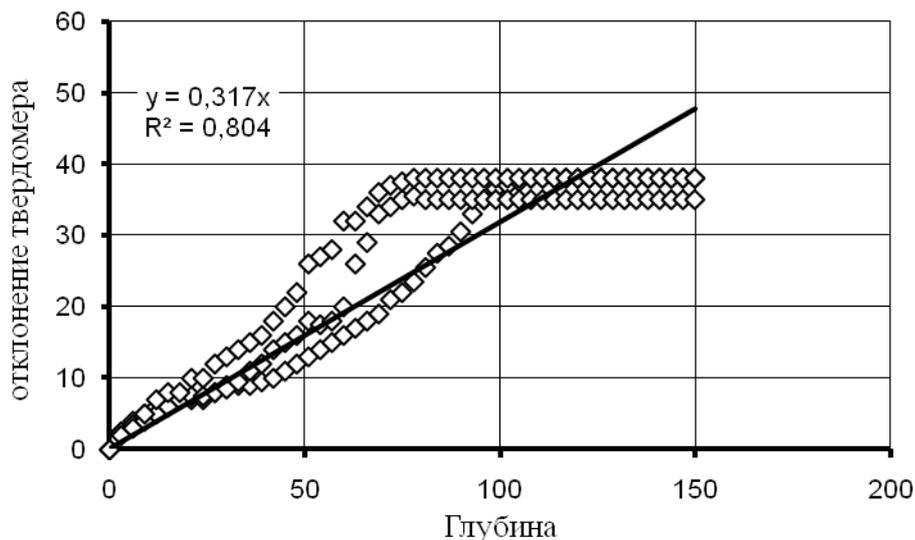


Рисунок 3.5 – Диаграмма твердости почвы в зависимости от площади поперечного сечения плунжера: конической формы с двойным углом при вершине  $10^\circ$ –(а),  $14^\circ$ –(б) и  $18^\circ$ –(в), а также комбинированный коническо-цилиндрический плунжер с двойным углом при вершине  $14^\circ$ –(г)

Получены уравнения регрессии, которые устанавливают значения силы от деформации почвы для разных значений конусности плунжера:  $y = 0,2163x$ ;  $y = 0,2708x$ ;  $y = 0,3177x$ ;  $y = 3099x$ . Анализируя эти уравнения и построенные по ним зависимости (рис. 3.4-3.6), делаем вывод, что увеличение угла приводит к возрастанию силы сопротивления, действующей

на почву и одновременно ее разрушающей. При условии малого значения угла конусности меньше будет и значение усилия, под действием которого игла проникает в почву и разрушает ее.

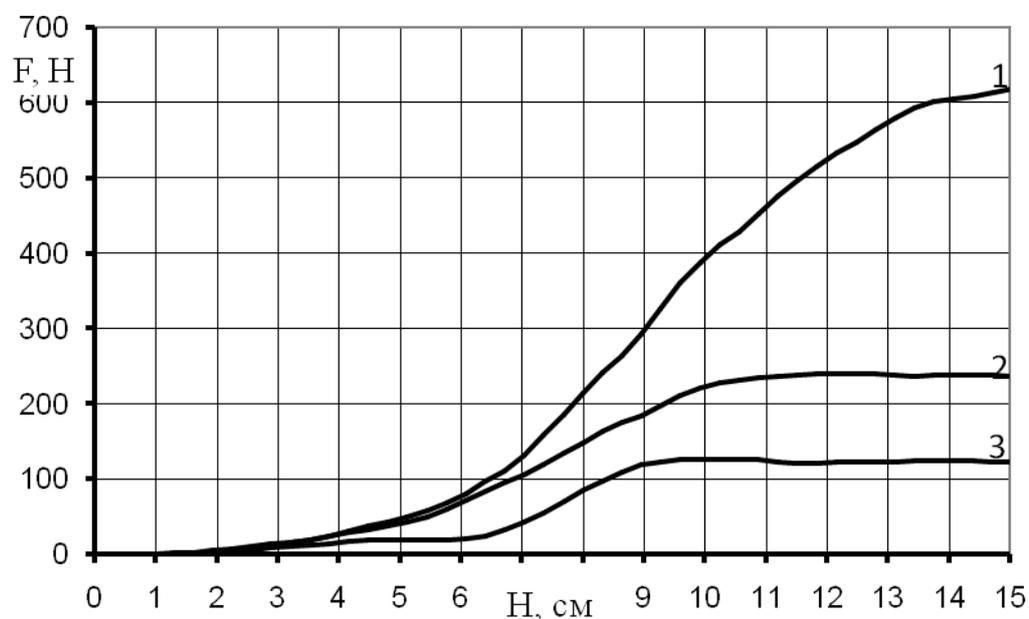


Рисунок 3.6 – Диаграмма твердости почвы, определенной плунжером конической формы с двойным углом при вершине: 1 – 18°, 2 – 14°, 3 – 10°

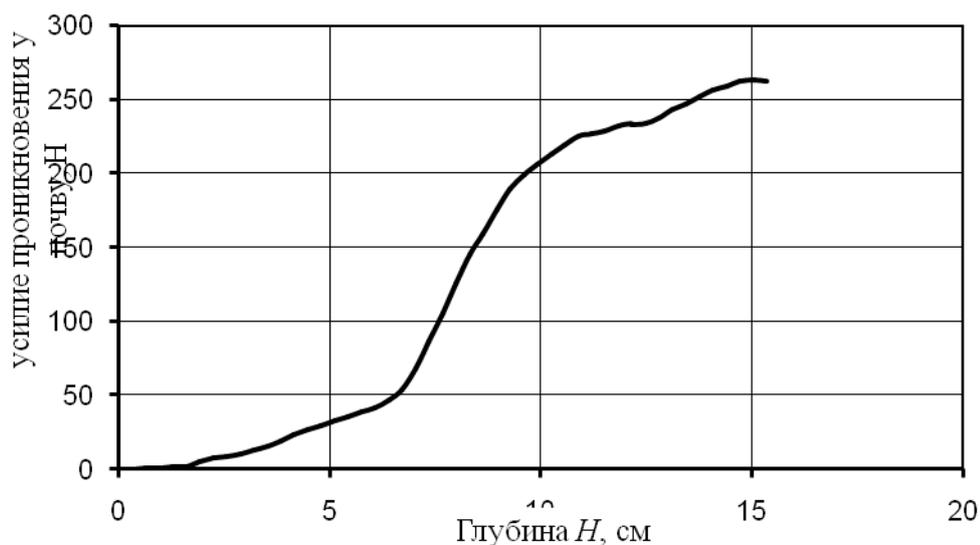


Рисунок 3.7 – Диаграмма твердости почвы, определенной коническим плунжером с площадью поперечного сечения – 1,01 см<sup>2</sup>

Используя методы математической статистики, вычислим среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, ошибку опыта и его точность для каждого плунжера. Проанализировав полученные результаты, выясняем, что увеличение угла при вершине плунжера приводит к увеличению усилия для проникновения плунжера в почву. Так для плунжера цилиндрической формы усилия на глубине 1,6 см, 3,2, 4,8, 6,4 и 8,0 см составляют соответственно 10,99Н, 23,35, 85,15, 211,7 и 203,46Н; для плунжера конической формы с углом при вершине  $10^\circ$ : 1,17Н, 11,18, 19,03, 23,93, 84,37Н; с углом при вершине  $14^\circ$ : 2,35Н, 15,89, 38,26, 83,77, и 148,71Н; с углом при вершине  $18^\circ$ : 0,78Н, 15,70, 42,18, 96,92 и 213,46Н; комбинированный с углом при вершине  $30^\circ$ : 1,9Н, 12,55, 29,23, 46,49 и 125,76Н. Установлено, что наименьшее усилие проникновения иглы в почву на глубине 3,2 см на 42% меньше аналогичного показателя плунжера с углом  $14^\circ$  и  $18^\circ$ ; на глубине 4,8 см – на 103% меньше, чем с углом  $14^\circ$ , и на 121%, чем с углом при вершине  $18^\circ$ ; на глубине 8 см – 75%, чем с углом  $14^\circ$  и на 152%, чем с углом  $18^\circ$ .

На основе анализа полученных зависимостей установлено, что показатели твердости почвы не зависят от площади поперечного сечения плунжера. При условии увеличения точности измерений для почвы с меньшей твердостью целесообразно устанавливать плунжер с большей площадью поперечного сечения.

Наилучшие показатели значений усилия проникновения в почву имеет плунжер с двойным углом при вершине  $10^\circ$ . Поэтому из соображений обеспечения надежности, долговечности, износостойкости конструкции, а также стабильности выполнения технологического процесса предпочтение было дано плунжеру с углом при вершине  $14^\circ$ .

### 3.3. Исследований по определению коэффициента, характеризующего твердость почвы

**Методика измерения твердости почвы.** Исследования проводились с помощью устройства для измерения твердости (рис. 3.1), предназначенного для измерений послойно на глубину до 38 см при определении агротехнических показателей сельскохозяйственных машин. Твердомер предназначен для работы в поле и помещениях при температуре окружающего воздуха от +4°C до +40°C, относительной влажности от 45% до 80% и атмосферного давления 84...107 кПа (630...680 мм рт. ст.).

Основные технические характеристики твердомера приведены в табл. 3.4.

Принцип действия твердомера основан на преобразовании силы сопротивления почвы плоскому плунжеру, заглубляемому в почву, в электрический сигнал. Этот сигнал возникает в тензометрическом датчике и в дальнейшем изображается на табло электронного блока индикации и накопления в независимой памяти электронного блока.

Таблица 3.4 – Основные технические характеристики твердомера

	Наименование показателей	Значения
1	Тип устройства	Переносной
2	Способ удержания в контакте с почвой	За счет массы тела оператора
3	Количество обслуживающего персонала	2
4	Габаритные размеры, мм: высота длина ширина	 890 360 480

5	Масса, кг: корпус электро-механический привод(шуруповерт) электронный блок индикации общая масса	8,00 1,66 0,63 10,3
6	Способ питания	Резервное питание
7	Способ обработки накопленной информации	При помощи ПК в Microsoft Excel
8	Диапазон глубин измерения твердости, см	0...40

**Результаты исследований по определению коэффициента, характеризующего твердость почвы.** Значение коэффициента  $k_{п}$  определяли на глубине  $\lambda_k(0...8 \text{ см})$  по опытным данным. По условиям проведения таких опытов на почвах с разными показателями твердости  $p$  по выражению (2.14) определяли твердость почвы, а потом проводили опыты с целью получения диаграмм, похожих на диаграммы, полученные с помощью прибора на рис. 2.17 и его регистрирующей части на рис. 2.18.

В результате получены диаграммы (рис. 3.9). Глубине  $\lambda_k$  на диаграмме соответствует сила  $G_1$ , отложенная на вертикальной оси. Эта сила равняется жесткости  $k_{пр}$  пружины в Н/см, помноженной на отрезок  $a_1a_2$  диаграммы, изображающей на ней деформацию пружины в см (рис. 2.20). Коэффициент трения  $f$  приняли 0,55. Угол  $\alpha_k$  в наших опытах составлял  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$  и  $9^\circ$ . Пользуясь выражением (2.22) и учитывая, что  $2f = 2 \cdot 0,55 = 1,1$ , нашли значение коэффициента  $k_{п}$ , который характеризует данную почву с ее твердостью  $p$ .

Вместе с опытным определением силы  $G$  определяли и твердость почвы на глубине от 0 до 8 см с помощью прибора, представленного на рис. 3.8, а и плунжера, приведенного на рис. 3.8, б.

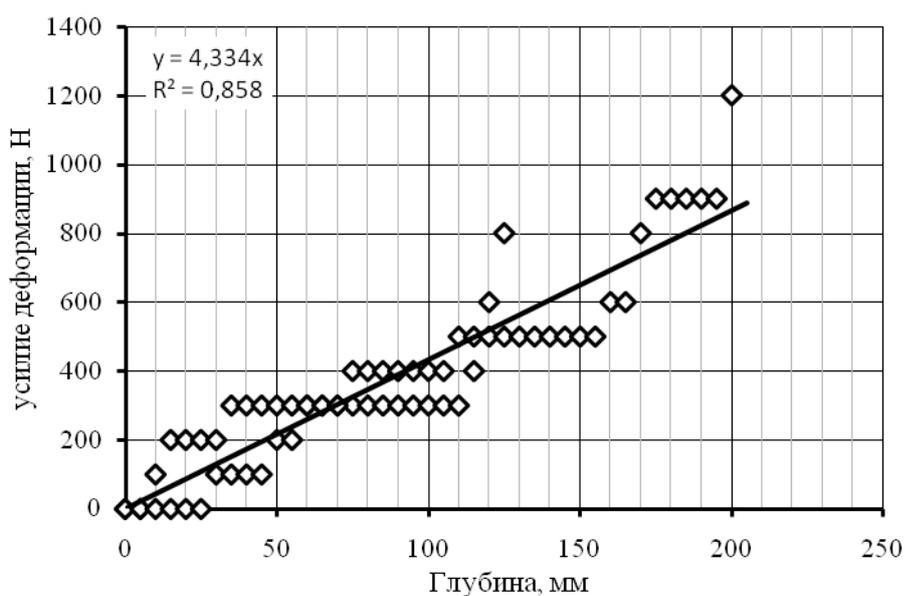


a)

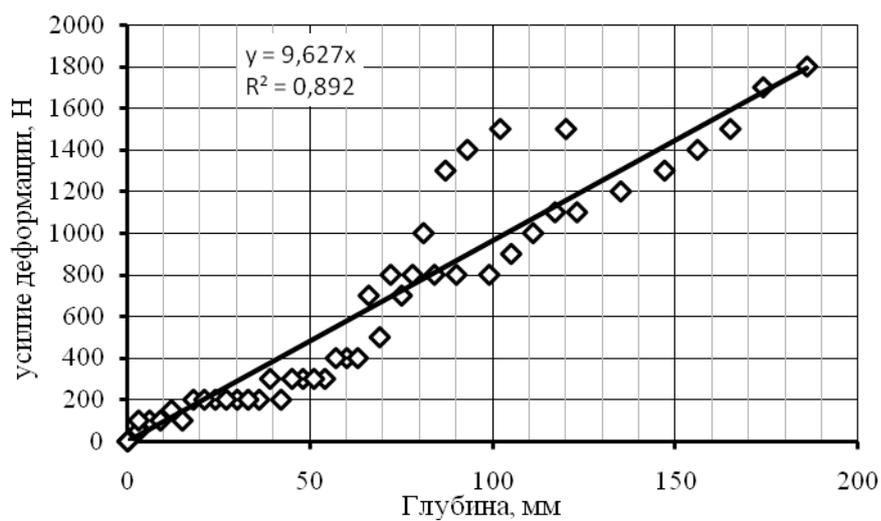
б)

Рисунок 3.8 – Прибор для определения зависимости силы  $G$  от деформации почвы  $\lambda_k$  на глубине от 0 до 8 см (а) и варианты плунжеров (б) с углом конусности: 1 –  $3^\circ$ , 2 –  $5^\circ$ , 3 –  $7^\circ$ , 4 –  $9^\circ$ , 5 – плунжер для определения твердости почвы

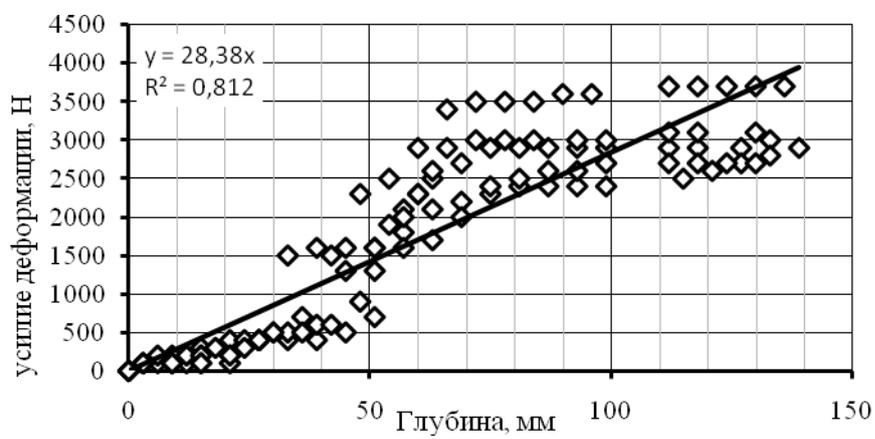
Нами построены опытные зависимости силы  $G$  от деформации почвы  $\lambda_k$  в пределах  $\lambda_k$  от 0 до  $h_k$  (рис. 3.9). Установленные значения коэффициента  $k_{\text{п}}$  позволяют благодаря выражению (2.21) определить необходимую для прокалывания почвы силу  $G$ .



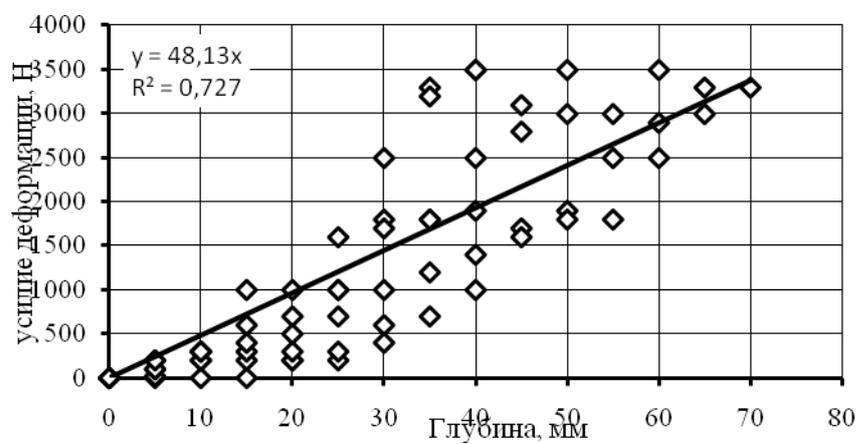
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9– Зависимость силы от деформации почвы для разных значений конусности плунжера:  $a - 3^{\circ}$ ;  $b - 5^{\circ}$ ;  $c - 7^{\circ}$ ;  $d - 9^{\circ}$

При исследовании экспериментальные данные проверялись на однородность и подчинение их распределению нормального закона. От результата последней проверки зависит целесообразность использования параметрических методов исследования.

Оценка однородности результатов проводилась путем нормирования опытных данных. Она заключалась в определении стандартного отклонения от среднего значения и перерасчета данных по этой шкале. Величины, превышающие два стандартных отклонения, считались такими, что не подлежат общей совокупности в результате действия на них других факторов. Проверка подчинения распределения экспериментальных данных нормальному закону проводилась по критериям Колмогорова омега-квадрат и хи-квадрат.

Получено уравнение регрессии, устанавливающие значение силы при различных значениях конусности плунжера:  $y = 4,6979x$ ;  $y = 9,6278x$ ;  $y = 28,383x$ ;  $y = 48,137x$ . Анализируя эти уравнения и построенные по ним зависимости (рис. 3.9), можно сделать вывод, что увеличение угла приводит к возрастанию силы сопротивления, действующей на почву и разрушающей ее. При условии малого значения угла конусности усилие будет меньше. При малых углах конус иглы будет меньше, а сама игла длиннее и острее, что может привести к ее поломке и абразивному износу. В тоже время, при малой конусности и толщине иглы почва может быть недостаточно проколотой, плохо измельченной и разрыхленной. На основе проведенных исследований можно рекомендовать следующие значения основных параметров игл:

а) конусность  $2\text{tg}\alpha_k$  должна быть в пределах от 0,17 до 0,25, откуда следует, что угол  $\alpha_k$  должен быть в пределах от  $5^{\circ}$  до  $7^{\circ}$ ;

б) высота  $h_k$  конусной части иглы, равняется  $r_{ц} \operatorname{ctg} \alpha_k$  (здесь  $r_{ц}$  – радиус цилиндрической части иглы, который должен быть 13...14 мм).

### **3.4. Определение тягового сопротивления экспериментальной секции игольчатой бороны**

**Методика исследований.** Бороны игольчатые предназначены для весеннего и осеннего поверхностного рыхления почвы на глубину 4...6 см с целью закрытия влаги, заделки семян, уничтожения сорняков, а также для выравнивания микрорельефа, созданного предыдущей обработкой.

Желание уменьшить тяговое и удельное сопротивление сельскохозяйственных машин требует постоянного исследования более усовершенствованных с точки зрения энергоемкости рабочих органов и технологий проведения полевых работ.

Все факторы, которые влияют на тяговое сопротивление машины, можно классифицировать следующим образом: природно-климатические (тип и состав почвы, рельеф, каменистость, метеорологические условия); конструкционные (тип, форма и количество рабочих органов; материал, из которого они изготовлены и технологии изготовления; вес машины, тип и конструкция ходового аппарата); эксплуатационные (техническое состояние машины, правильность регулировок, степень изношенности рабочих органов).

Тяговое сопротивление является величиной, которая постоянно изменяется в процессе работы. В качестве силоизмерительного элемента использовали тензометрические пластины. Регистрация измерительных параметров осуществлялась на жесткий диск ПК, размещенного в тракторе. Устройство размещали на прицепной рамке для каждой секции отдельно.

Исследования процесса обработки почвы экспериментальной и серийной секциями игольчатой бороны проводили на опытной установке (рис. 3.10), включающей в себя основную раму 1, на которой установлены экспериментальная 2 и серийная 3 секции. Экспериментальная секция

состоит из ряда игольчатых дисков 4 (рис. 3.10), оси которых жестко связаны друг с другом. Каждый диск имеет ступицу 5, ось 6, втулку 7 и иглы 8, жестко связанные со ступицей. Игла 8 представляет собой радиально закрепленный на диске прямолинейный стержень, форма которого в средней части близка к цилиндрической; в концевой части каждая игла выполнена в виде конуса и заострена. Для повышения жесткости иглы в средней ее части могут быть ребра жесткости. При движении дисков с иглами конец каждой иглы описывает в воздухе циклоиду.

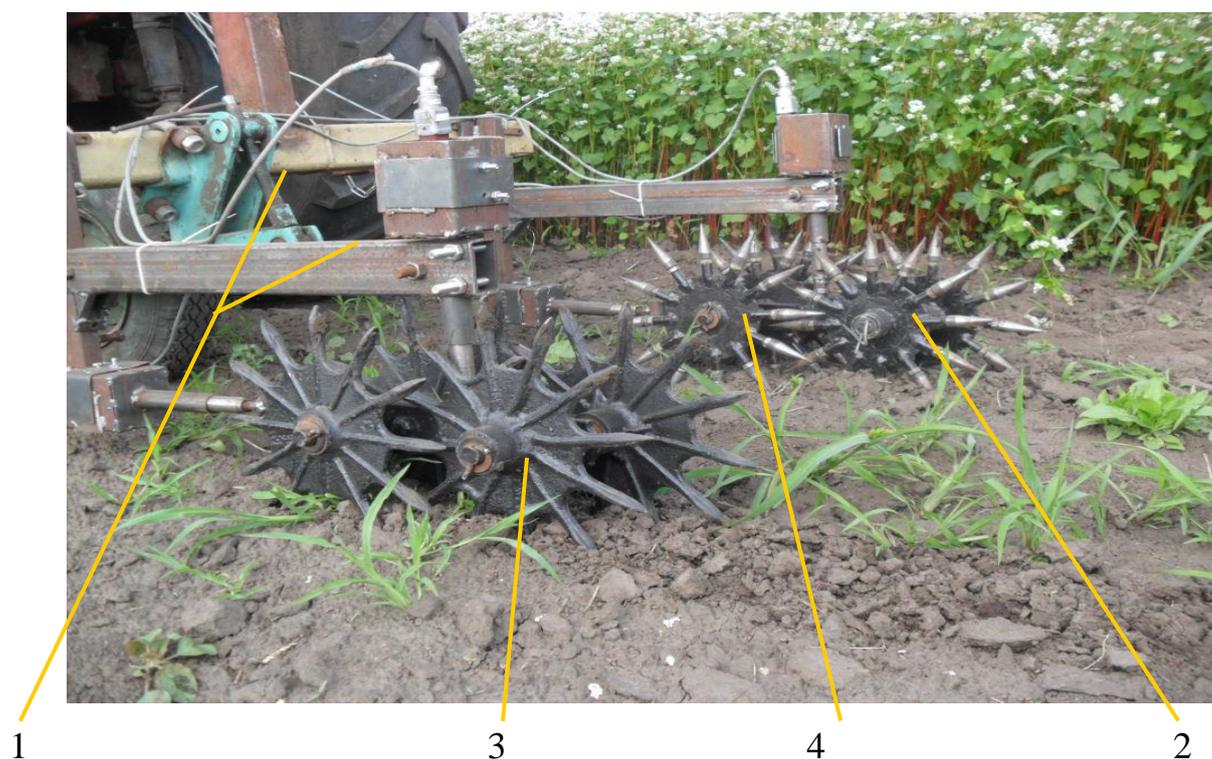


Рисунок 3.10 – Экспериментальная установка для эксплуатационно-технологической и энергетической оценки секции игольчатой бороны: 1– рама; 2– экспериментальная секция ; 3– серийна секция; 4– диск с иглами

Во время движения экспериментальной установки диск с иглами вращается вокруг своей оси, закрепленной на раме 1. Аналогично на отдельной оси закреплена секция серийного культиватора, которая также вращается. Экспериментальная установка обеспечивает движение секций на одинаковой высоте от поверхности почвы.

Методика проведения исследований включала выбор участка с характерным для данного поля покрытием. Тяговое сопротивление секций серийной и экспериментальной борон, установленных на общие рамы, определяли при условии установки на экспериментальной секции игл с различным углом конуса ( $5^\circ$ ,  $7^\circ$  и  $9^\circ$ ). Агрегатирование осуществляли трактором МТЗ-80. Схема опыта: выполнение технологического процесса агрегатом с целью поверхностного рыхления почвы, закрытия влаги, заделки семян, уничтожения сорняков, а также для выравнивания микрорельефа, созданного предыдущей обработкой. Количество повторностей – три.

Минимальная длина пути агрегата составляла 40 м. Ее определяли из условий, чтобы допустимая погрешность не превышала 2%, а надежность равнялась 0,95.

В экспериментальных исследованиях использовался плоскостной способ, обеспечивающий определение результирующей силы, действующей между трактором и орудием в одной плоскости (продольно-вертикальной). Метод тензонометрических рамок представляет собой одну из схем динамометрического трактора. При этом специальная пластина размещена на рамке, к которой крепится экспериментальная секция и имеет только одну степень свободы: в продольном или вертикальном направлении. Эта степень ограничивается силоизмерительным тензозвеном. Тензометрическое оборудование включало тензорезисторы КФ-4,5, два сопротивления по 100 Ом каждое, реохорд проволочный, графопостроитель 4 303/1, батарею 10В, соединительные провода.

Определяли зависимость горизонтальной и вертикальной составляющих тягового сопротивления от глубины обработки, скорости движения агрегата и угла заострения иглы (трехфакторный эксперимент). В табл. 3.5 скорость движения установлена на трех уровнях (градациях).

Опыты проводили в трехкратной повторности.

## Результаты экспериментальных исследований по определению эксплуатационно-технологических и энергетических показателей игольчатой бороны

Программа экспериментальных исследований предполагала проведение тарирования датчиков, установленных на экспериментальной установке. На рис. 3.11 приведен общий вид установки для тарирования экспериментальной секции игольчатой бороны.



Рисунок 3.11 – Общий вид установки для тарирования

На рис. 3.12 представлены тарировальные кривые, которые отражают зависимость показателей прибора от значений измеряемой величины (горизонтальные и вертикальные составляющие силы сопротивления серийной – *a*) и экспериментальной – *б*) секции игольчатой бороны.

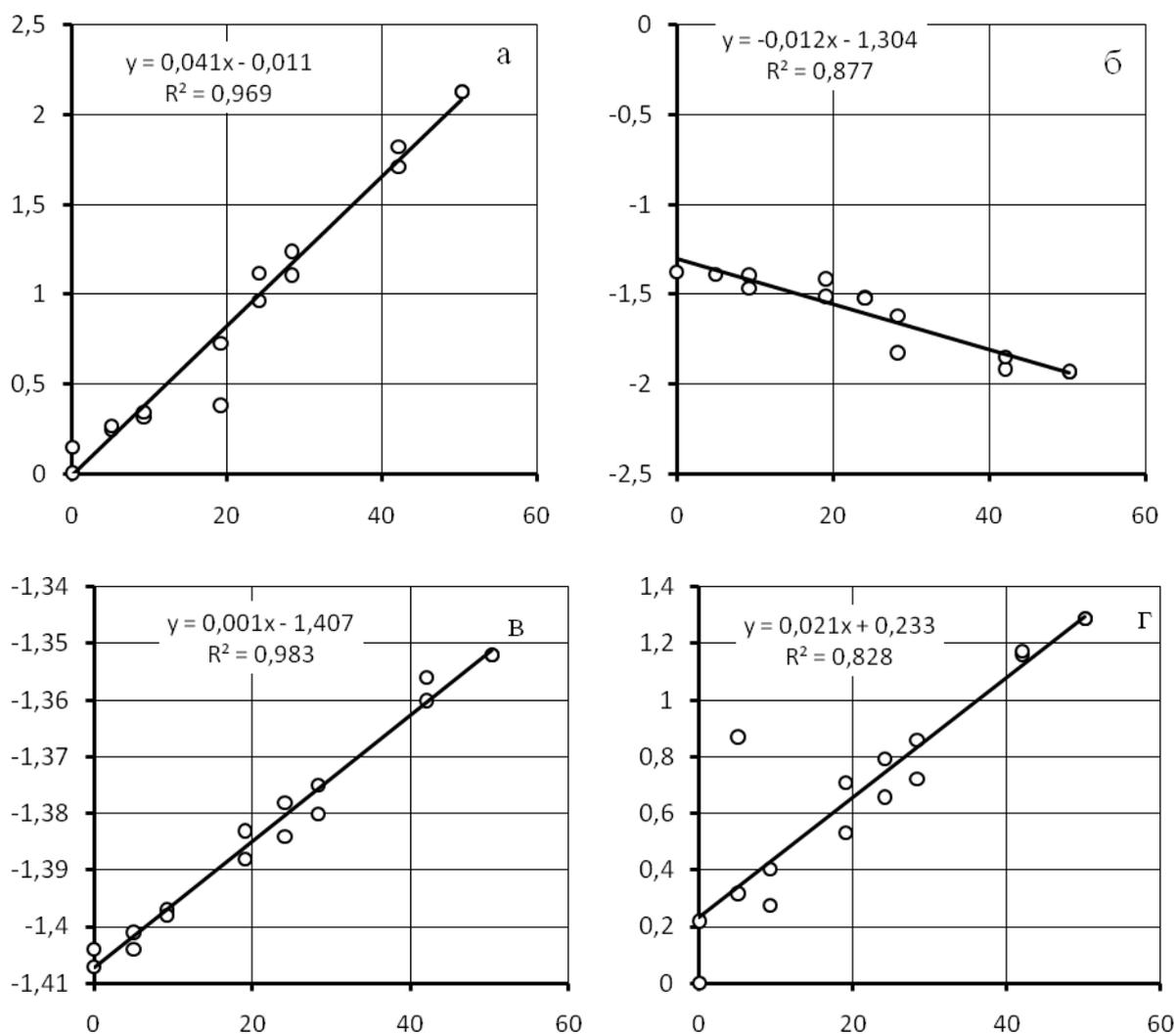


Рисунок 3.12 – Тарировальные кривые горизонтальной и вертикальной составляющих силы сопротивления экспериментальной – а, б и серийной – в, г секций игольчатой бороны.

Исследования по определению тягового сопротивления проведены на трех скоростях 1,9 м/с, 2,77 и 3,05 м/с. Результаты исследований приведены в приложениях А, В. Погрешность измерения оценивали перед началом опытов – по предельной погрешности, после проведения опытов – по наибольшей статистической погрешности. Условия испытаний приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Условия испытаний

Показатель	Значения показателя		
Состав агрегата	Серийная + секция экспериментальной игольчатой бороны		
	Секция УСМК-5,4	секция экспериментальной игольчатой бороны	
Вид работы	Поверхностная обработка почвы	Поверхностная обработка почвы	
Условия работы:			
Тип почвы			
Влажность почвы в слое от 0 до 15 см, %	19,5-27,2	19,5-27,2	
Твердость почвы в слое от 0 до 15 см; МПА	0,29-1,28	0,29-1,28	
Засоренность сорняками в зоне обработки, шт/м <sup>2</sup>	18	18	
Высота сорняков, см	5,6	5,6	
Режим работы:			
рабочая скорость, км/ч	1,9; 2,77; 3,05	1,9; 2,77; 3,05	
глубина обработки, см	4; 6; 8	4; 6; 8	
Срок выполнения работ	03.07.2014		
Показатели качества выполнения технологического процесса: подрезание (уничтожение) сорняков, % качество рыхления почвы (размеры фракций до 25 мм), % ила с углом заострения:			
		97,9	98,5
		88,4	
	5 <sup>0</sup>		88,2
7 <sup>0</sup>		90,5	
9 <sup>0</sup>		93,5	

В результате исследований установлено, что увеличение глубины и скорости обработки почвы приводит к возрастанию результирующего тягового сопротивления для всех игл.

Отмечено, что экспериментальная секция игольчатой бороны удовлетворительно выполняет рабочий процесс в условиях, которые имели

место при проведении исследований и были типичными для поверхностной обработки почвы.

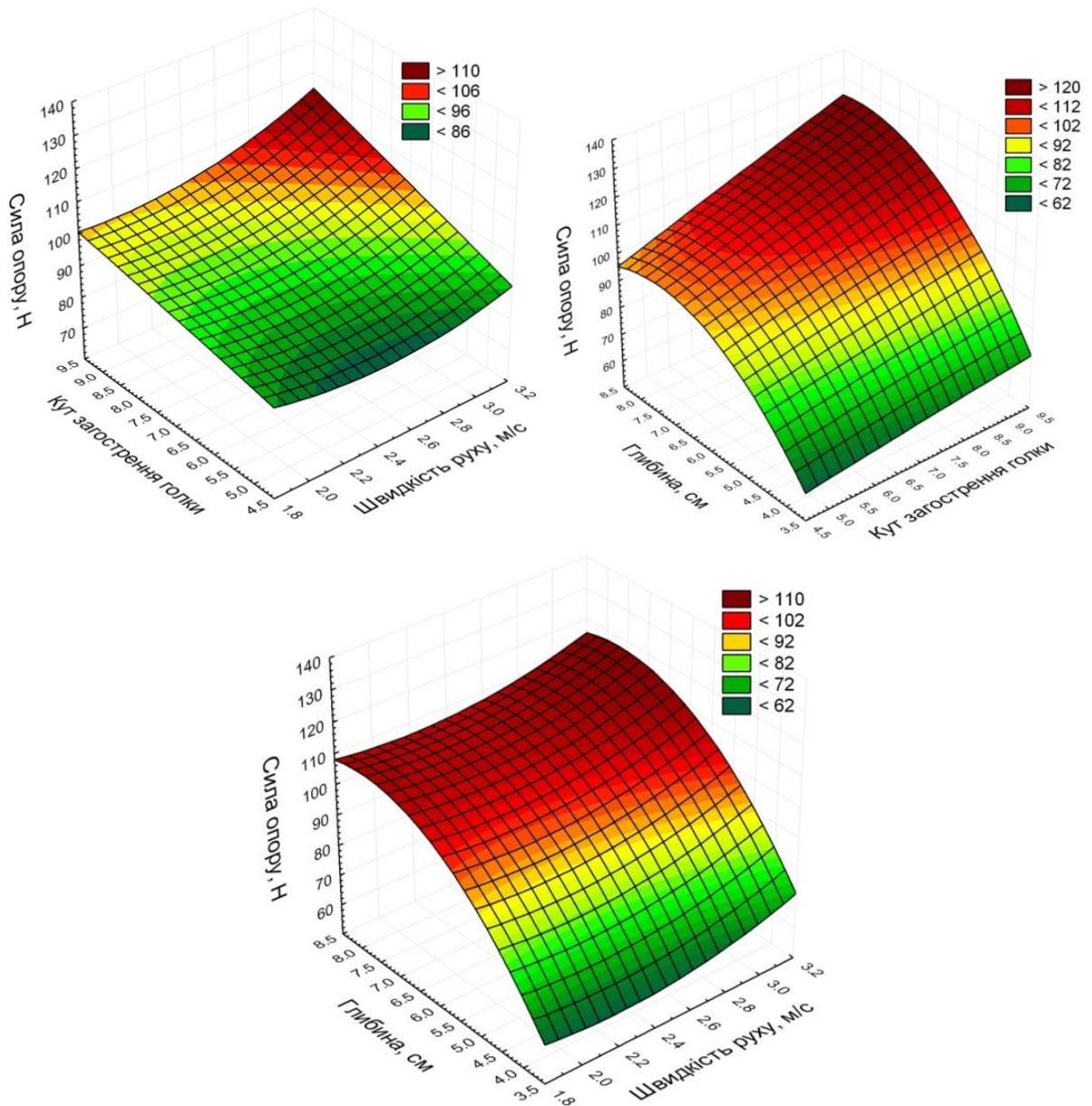
Результирующая сила сопротивления экспериментальной секции, борона которой состояла из дисков с иглами разных углов заострения ( $5^\circ$ ;  $7^\circ$ ;  $9^\circ$ ), на всех режимах испытаний (скоростях 1,9...3,05 м/с; глубине обработки 4...8 см) была меньше аналога.

В сравнении с серийной секцией УСМК-5,4 результирующее тяговое сопротивление экспериментальной секции было меньшим для игл с углом заострения  $5^\circ$  на 30%, а для игл с углом  $7^\circ$  на 17%. Для игл с углом заострения  $9^\circ$  значение результирующего тягового сопротивления равняется тяговому сопротивлению серийной секции с отклонением  $\pm 2\%$ .

Установлено, что с увеличением глубины обработки почвы интенсивность возрастания сил сопротивления выше на 24%, чем при меньшей глубине обработки почвы. При увеличении средней скорости секции от 1,9 м/с до 3,05 м/с возрастает результирующая сила тягового сопротивления секции. Графические результаты расчетов приведены на рисунках 3.13-3.15.

Анализ приведенных двумерных сечений показывает, что с увеличением скорости движения и глубины обработки почвы значение результирующей силы сопротивления для серийной и экспериментальной секции возрастает. Установлено, что увеличение скорости от 1,9 м/с до 3,05 м/с приводит к возрастанию результирующей силы тягового сопротивления для секции на глубине 4 см с углом заострения иглы:  $5^\circ$  на 16%,  $7^\circ$  – на 11%,  $9^\circ$  – на 6%; на глубине 6 см;  $5^\circ$  на 7%,  $7^\circ$  на 7%,  $9^\circ$  – 14%; на глубине 8 см;  $5^\circ$  на 5%,  $7^\circ$  – 12%;  $9^\circ$  – 24% соответственно. Увеличение глубины обработки почвы от 4 до 8 см приводит к возрастанию результирующей силы тягового сопротивления для секции с углом заострения иглы  $5^\circ$  на 33-47%,  $7^\circ$  – 45-47%,  $9^\circ$  – 37-61%. В среднем увеличение скорости движения приводит к возрастанию тягового сопротивления на 5...24%, а глубина обработки почвы на 37...61%. В сравнении с серийной секцией тяговое сопротивление

экспериментальной было меньше для игл с углом заострения  $5^\circ$  на 2...30%, 7° – 4-17%.



$$Y(\text{опора}) = -81,48 + 3,83 \cdot \alpha(\text{кут}) + 39,84 \cdot h(\text{глибина}) + 4,66 \cdot v(\text{швидкість}) - 2,58 \cdot h^2(\text{глибина}^2)$$

$$R^2 = 0.8978$$

Рисунок 3.13 – Зависимость результирующей силы сопротивления экспериментальной секции игольчатой борны от скорости движения и угла заострения иглы (а); глубины заглабления и угла заострения иглы (б); глубины заглабления и скорости движения (в)

Для игл с углом заострения  $9^\circ$  значение результирующего тягового сопротивления приблизительно равнялось тяговому сопротивлению серийной секции УСМК-5,4.

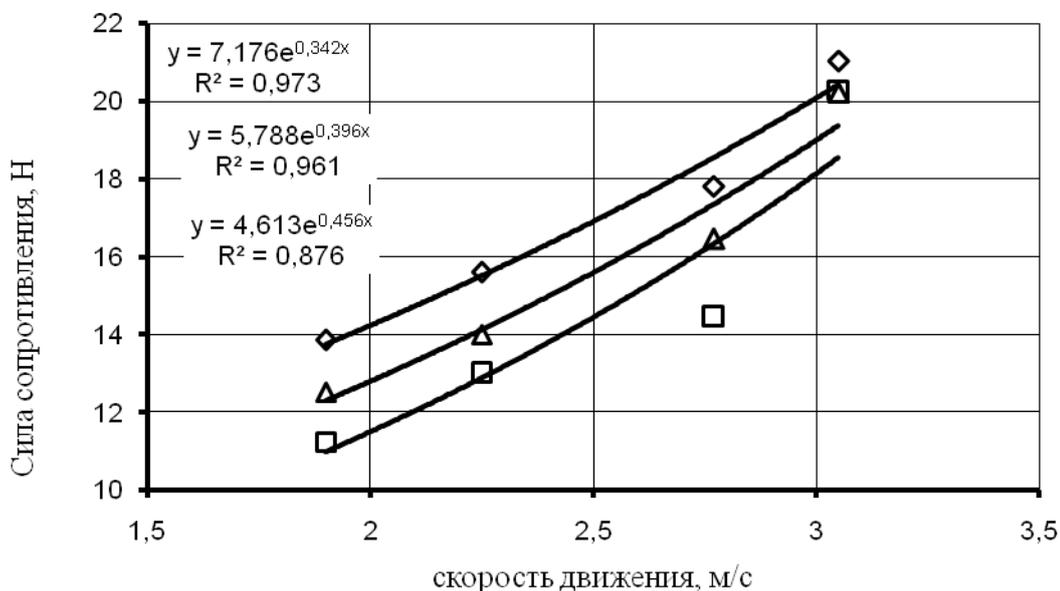


Рисунок 3.14 – Сравнительная характеристика горизонтального нагружения: 1) серийная секция; 2) экспериментальная секция с иглами  $5^\circ$ ; 3) экспериментальная секция с иглами  $9^\circ$

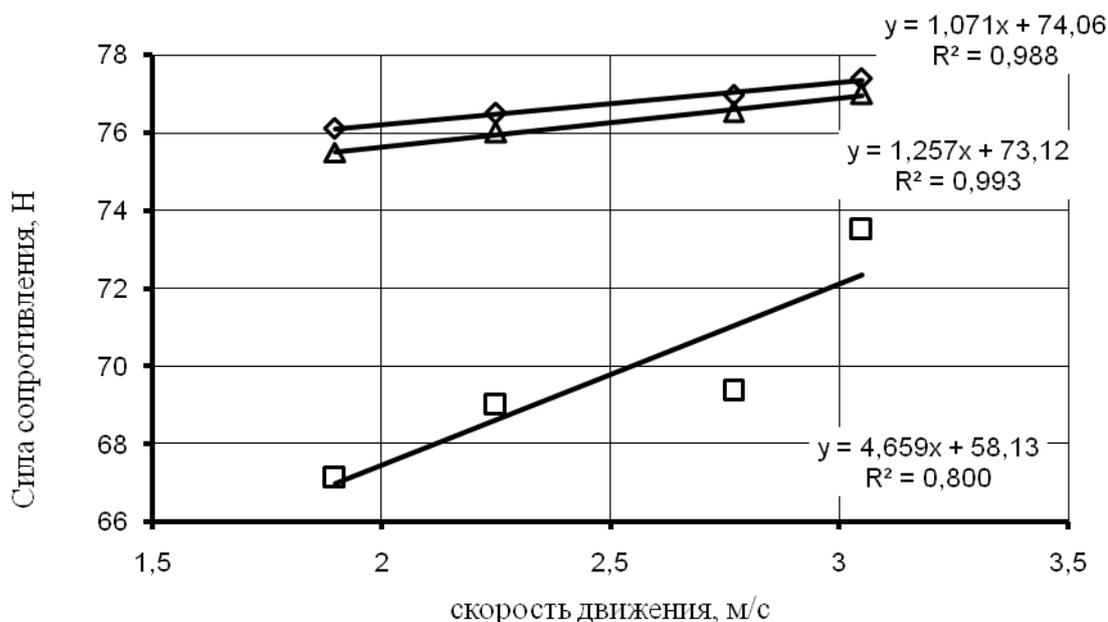


Рисунок 3.15 – Сравнительная характеристика вертикального нагружения: 1) серийная секция; 2) экспериментальная секция с иглами  $5^\circ$ ; 3) экспериментальная секция с иглами  $9^\circ$

Получено уравнения регрессии, которые устанавливают значения усилия сопротивления от следующих факторов: угол заострения иглы, скорость и глубина заострения иглы:

$$Y = -81,48 + 3,83 \cdot \alpha + 39,84 \cdot h + 4,66 \cdot v - 2,58 \cdot h^2.$$

Анализируя уравнения регрессии и построенные по ним зависимости (рис. 3.13), делаем вывод, что увеличение угла приводит к возрастанию силы сопротивления, действующей на почву и разрушающей ее. При условии малого значения угла конусности меньше будет и значение усилия, под действием которого игла заглубляется в почву. Иглы с малой конусностью и толщиной более предрасположены к поломкам и абразивному износу. Почва при работе таких игл будет недостаточно проколотой, плохо измельченной и разрыхленной. Глубина заглубления игл в почву является важным фактором, влияющим на значение силы сопротивления.

Установлено, что по показателям качества рыхления почвы все рабочие органы экспериментальной установки удовлетворительно выполняют технологический процесс и отвечают требованиям ТУ (не меньше 80%). Увеличение угла заострения иглы приводит к повышению качества рыхления: для иглы с углом заострения 5° этот показатель составляет 88,2%, 7° – 90,5%, 9° – соответственно 93,5%.

После реализации запланированных исследований и расчета коэффициентов уравнения регрессии получены линейные модели параметров энергетической оценки (тягового сопротивления) серийной и экспериментальной секций игольчатой бороны. Полученные уравнения и их графическая интерпретация (рис. 3.14-3.15) показали, что с увеличением скорости движения и угла заострения тяговое сопротивление возрастает.

Оптимальным и допустимым режимом работы агрегата с экспериментальной секцией, обоснованным по критерию минимума затрат энергии и качества выполнения технологического процесса является режим, при котором поступательная скорость составляет 2,77...3,05 м/с, а угол заострения силы - 7°.

Использование игольчатой бороны при поверхностном рыхлении почвы при рекомендованных режимах показал, что качество рыхления почвы (размеры фракций до 25 мм), составляет 90,5% для иглы с углом заострения  $7^\circ$ , а тяговое сопротивление уменьшается на 4...17%.

При энергетических исследованиях процесса поверхностного рыхления почвы экспериментальной секцией (вычисление горизонтальной и вертикальной составляющей силы тягового сопротивления, а также расчет ее результирующего значения), проверка результатов некоторых сомнительных параллельных наблюдений проводилась по критерию Романовского. Целесообразность проведения регрессивного анализа проверяли по критерию Стьюдента [39]. При исследовании экспериментальные данные проверяли на однородность и подчинение их нормальному закону. От результата последней проверки зависит целесообразность использования параметричных методов исследования.

Оценка однородности результатов проводилась путем нормирования опытных данных. При этом производились определение стандартного отклонения от среднего значения и перерасчет данных по этой шкале. Величины, превышающие два стандартных отклонения, считались такими, что не относятся к общей совокупности в результате действия на них других факторов. Проверка подчинения распределению экспериментальных данных нормальному закону проводилась по критериям Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат [39]. Корреляционный анализ проведен для экспериментальной установки с иглой, угол заострения которой  $9^\circ$  на глубинах 4,6 и 8 см при скорости движения трактора 1,9 м/с (рис. 3.16-3.21).

Проанализировав полученные зависимости, устанавливаем, что для горизонтальной и вертикальной составляющей тягового сопротивления увеличение глубины обработки почвы приводит к повышению стационарности исследуемого процесса. Про это говорит затухание корреляционной функции при возрастании времени. В случае заглубления секции экспериментальной бороны на глубину наблюдаются периодические

составляющие. Этот фактор свидетельствует о том, что при работе в данном режиме в системе «трактор – экспериментальная установка» могут возникнуть резонансные явления. С увеличением кинематического коэффициента наблюдается растягивание спектра дисперсии. Эти явления характерны как для горизонтальных, так и для вертикальных составляющих тягового сопротивления.

Исследуемый процесс является более стационарным, о чем свидетельствует затухание корреляционной функции при увеличении времени. Время корреляционной связи процесса в обоих режимах работы одинаковый. При работе орудия с пассивными рабочими органами на кривой корреляционной функции наблюдаются периодические составляющие. Этот факт свидетельствует о том, что при работе в данном режиме в системе «трактор – орудие» могут происходить резонансные явления.

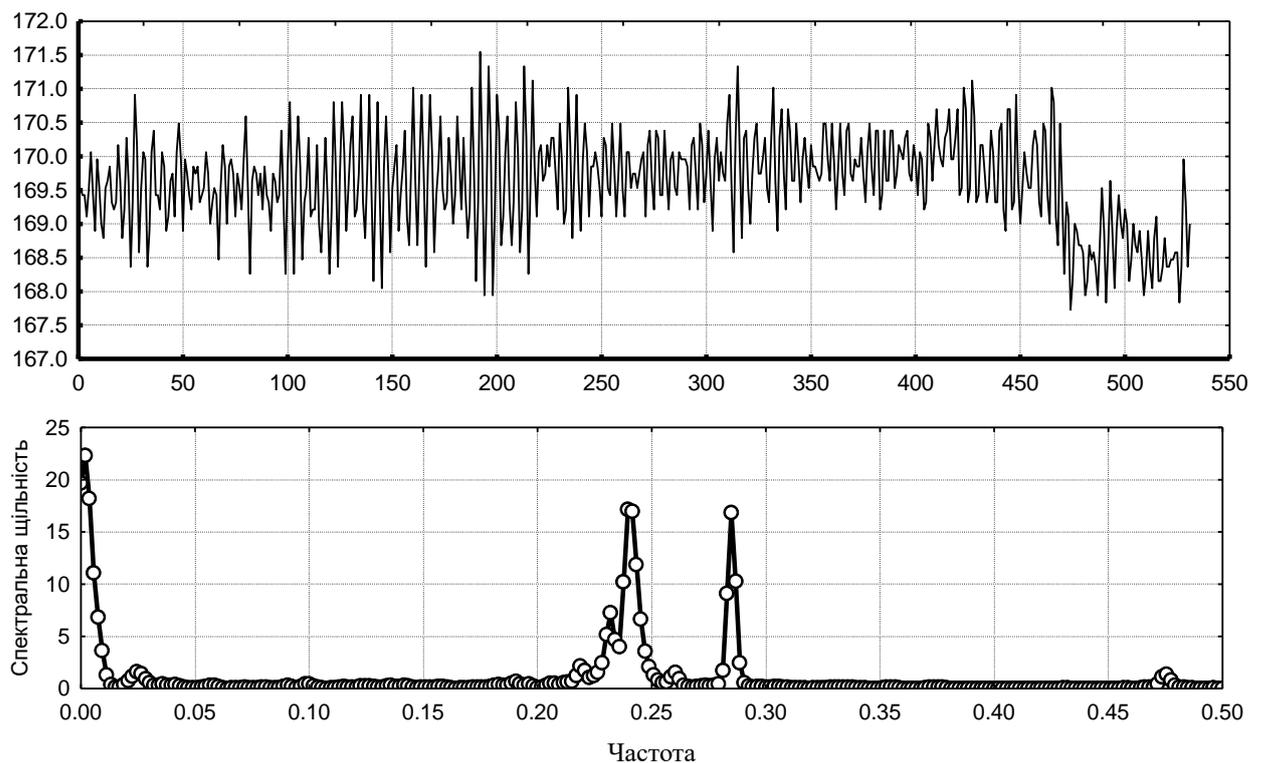


Рисунок 3.6 – Нормированная корреляционная функция *a)* и спектральная плотность *б)* вертикальной составляющей тягового сопротивления секции сиглой  $9^0$  на глубине 4 см при скорости движения 1,9 м/с

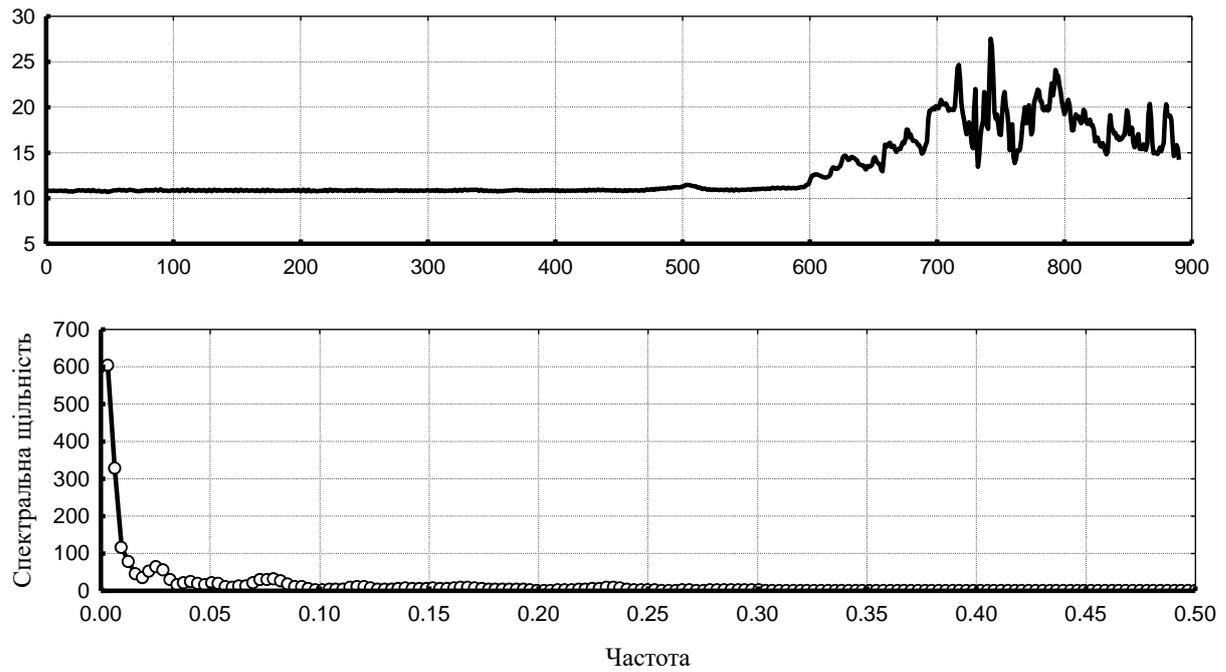


Рисунок 3.17 – Нормированная корреляционная функция *а)* и спектральная плотность *б)* горизонтальной составляющей тягового сопротивления секции сиглой  $9^0$  на глубине 4 см при скорости движения 1,9 м/с

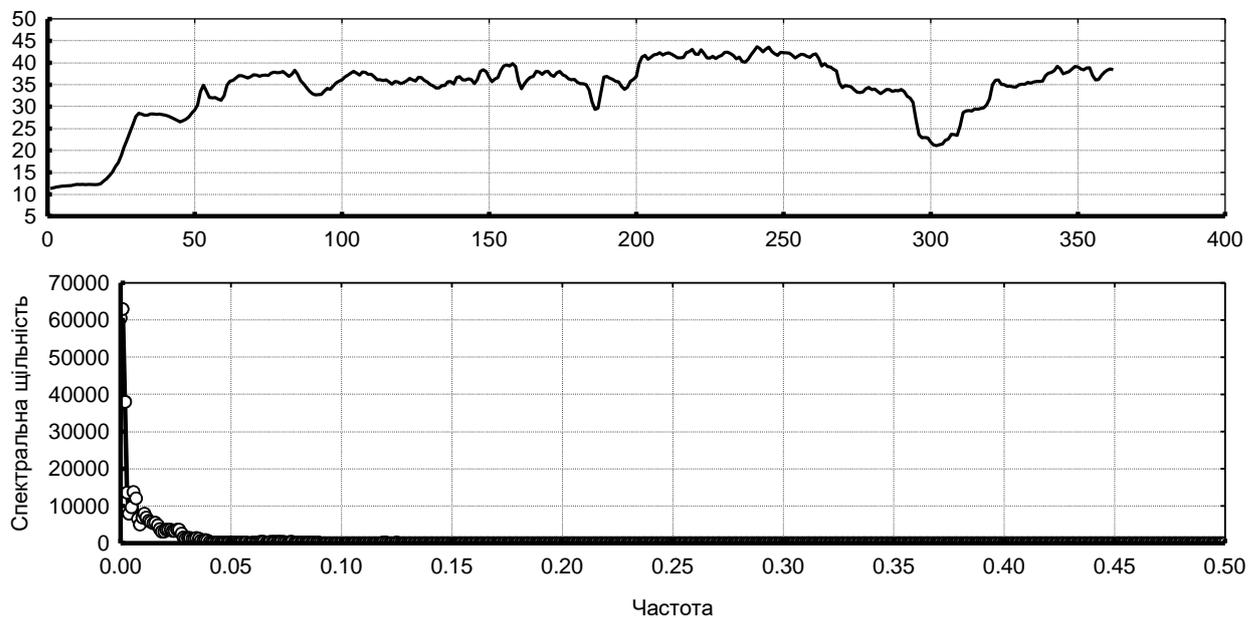


Рисунок 3.18 – Нормированная корреляционная функция *а)* и спектральная плотность *б)* горизонтальной составляющей тягового сопротивления секции сиглой  $9^0$  на глубине 6 см при скорости движения 1,9 м/с

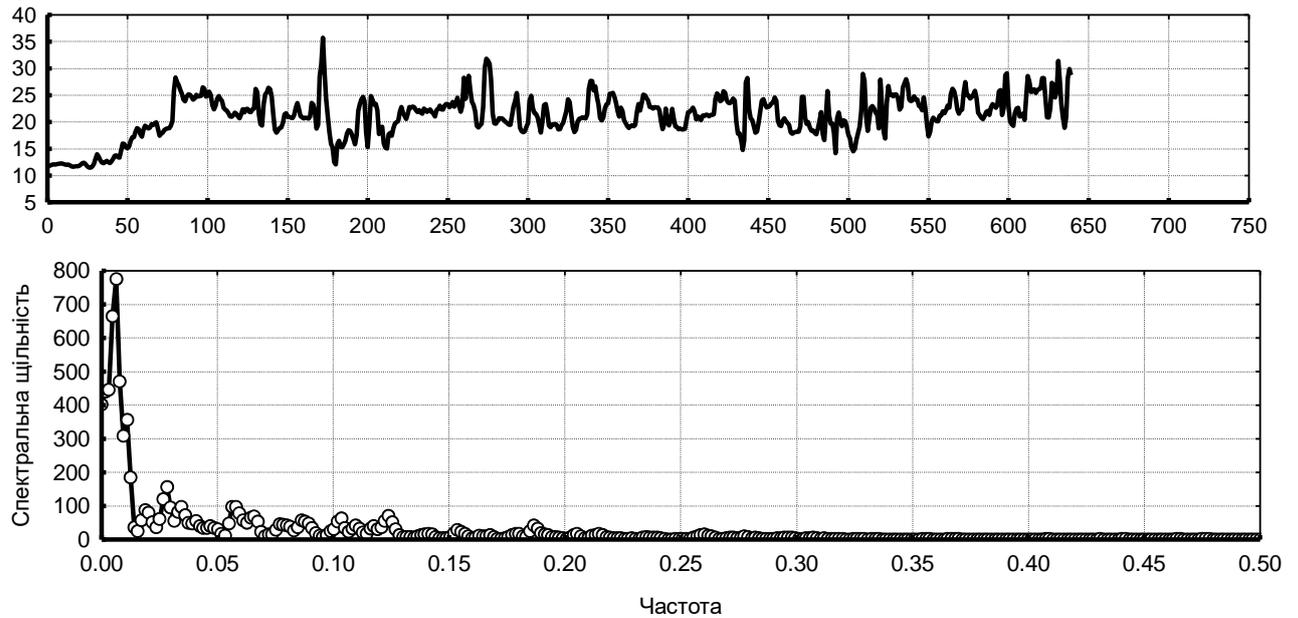


Рисунок 3.19 – Нормированная корреляционная функция *a)* и спектральная плотность *б)* вертикальной составляющей тягового сопротивления секции сиглой  $9^0$  на глубине  $\delta$  см при скорости движения 1,9 м/с

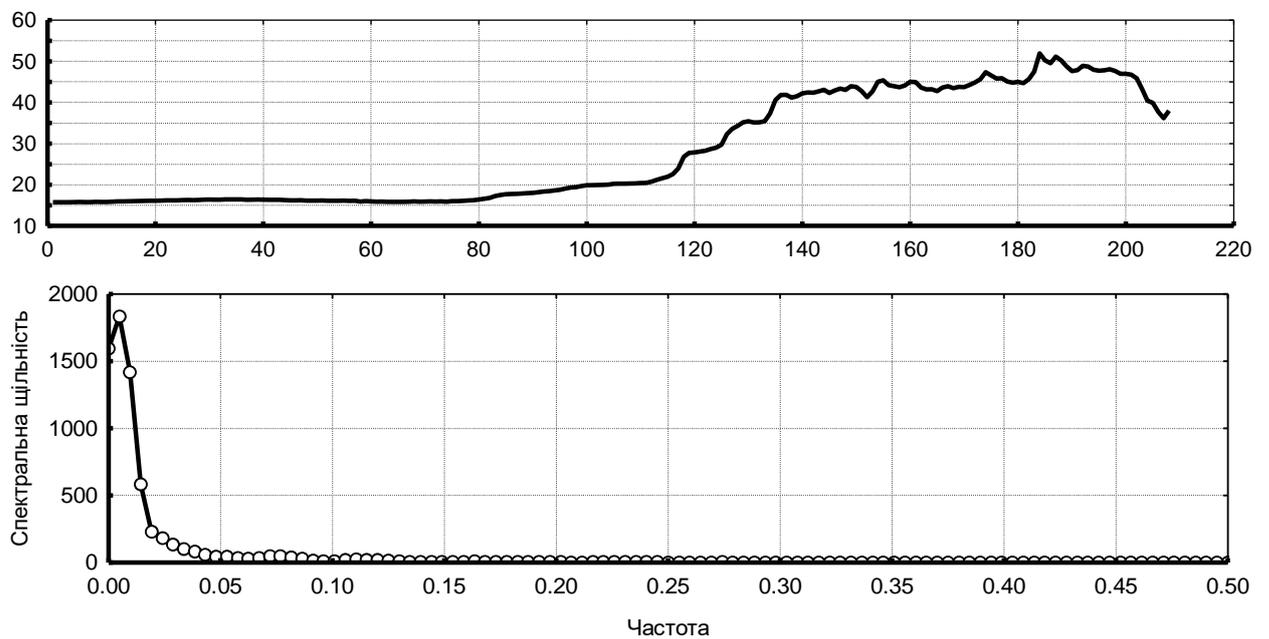


Рисунок 3.20 – Нормированная корреляционная функция *a)* и спектральная плотность *б)* горизонтальной составляющей тягового сопротивления секции сиглой  $9^0$  на глубине  $\delta$  см при скорости движения 1,9 м/с

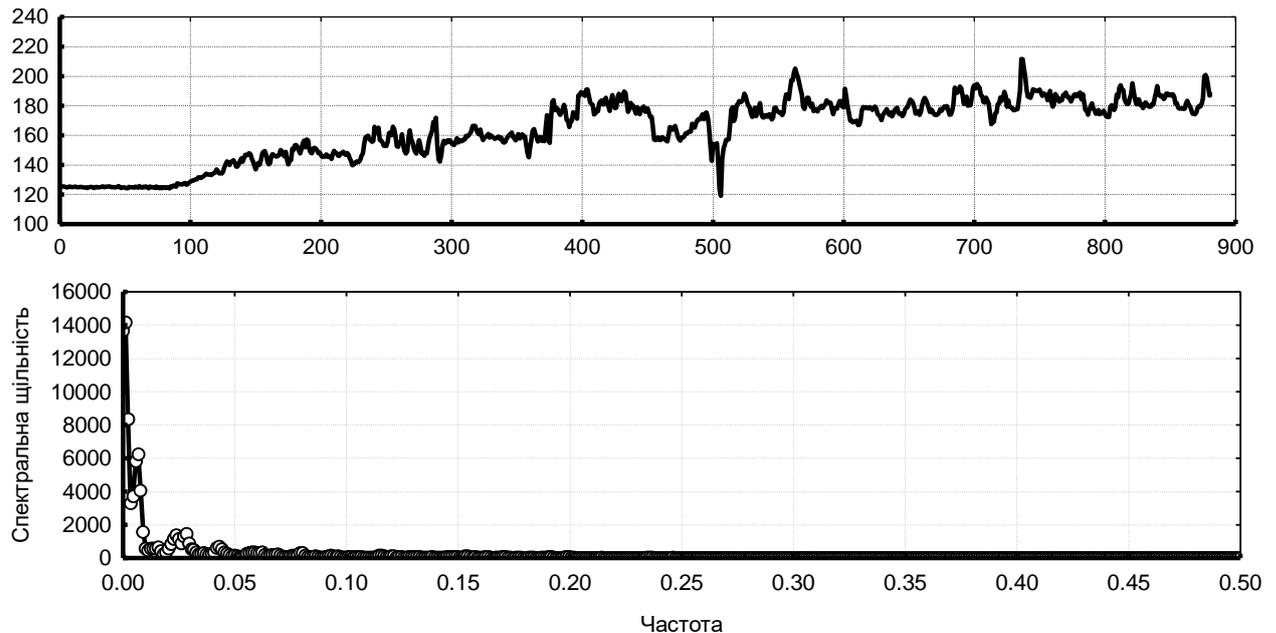


Рисунок 3.21 – Нормированная корреляционная функция *а)* и спектральная плотность *б)* вертикальной составляющей тягового сопротивления секции иглой  $9^{\circ}$  на глубине 8 см при скорости движения 1,9 м/с

При увеличении кинематического коэффициента наблюдается некоторое растягивание спектра дисперсии в сторону больших частот.

### 3.5. Исследования по определению показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы экспериментальной секцией игольчатой бороны

**Методика исследований.** Исследования процесса обработки почвы игольчатой бороной проводили на экспериментальной установке (рис. 3.10), включившую в себя экспериментальную и серийную секции. В качестве серийной использовали секцию УСМК-5,4. Экспериментальную секцию укомплектовывали сначала диском с иглами, имеющими угол заострения  $9^{\circ}$  и  $5^{\circ}$ . Взятие проб осуществляли в слое почвы на глубине – 0...5 и 5...10 и 10...20 см. Определение показателей качества почвы осуществляли совместно с лабораторией научных исследований физико-химических характеристик качества сельскохозяйственной продукции Украинского научно-исследовательского института испытаний и прогнозирования

техники и технологий для сельскохозяйственного производства имени Леонида Погорелого на опытных участках проекта АгроОлимп. Определение показателей качества почвы осуществляли в соответствии с ДСТУ ISO 11465-2001 «Качество почвы. Определение сухого вещества и влажности по массе» и ДСТУ ISO11272-2001 «Качество почвы. Определение плотности структуры по сухой массе». Опыты проведены в трехкратной повторности.

**Результаты исследований по определению показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы экспериментальной секцией игольчатой бороны**

В отобранных образцах проб определялись влажность и плотность почвы. Результаты исследований по определению показателей качества обработки почвы (рис. 3.23) экспериментальной секцией игольчатой бороны в сравнении с серийной приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Значения влажности и плотности почвы

Слой почвы	До прохождения		После прохождения							
			Состав агрегата				Состав агрегата			
			Секция с иглой 9°		УСМК-5,4		Секция с иглой 5°		УСМК-5,4	
Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>									
0-5	14,4	1,28	19,3	0,88	13,9	0,96	15,6	0,98	14,5	1,08
	12,7	1,35	12,5	1,03	13,0	1,10	14,9	1,18	15,4	1,19
	16,1	1,42	14,1	0,98	15,2	1,14	16,5	1,11	16,6	1,14
5-10	19,6	1,34	14,6	1,09	19,3	1,08	18,3	1,04	17,4	1,04
	19,5	1,34	18,4	1,14	19,7	1,17	16,0	1,17	16,4	1,11
	19,0	1,27	19,5	1,11	18,3	1,17	18,0	1,18	18,0	1,14

10-20	20,4	1,41	19,8	1,33	20,1	1,28	16,4	1,33	17,8	1,33
	20,3	1,24	20,1	1,27	20,2	1,33	18,1	1,37	17,9	1,37
	20,4	1,22	20,7	1,34	19,7	1,31	18,5	1,31	17,9	1,14



а)

б)

Рисунок 3.23–Наполнение (а) и опорожнение (б) пробоотборника с почвой во время проведения экспериментальных исследований

Отмечено, что экспериментальная секция удовлетворительно выполняет технологический процесс при условиях исследований, которые были типичными для поверхностной обработки почвы. Подрезание сорняков в зоне обработки было 98,5%; качество рыхления почвы для игл с углом заострения 5° составляло 88,2%; для игл с углом 7° – 90,5%, а для игл с углом 9° – 93,5%.

Анализ результатов исследований показал, что средняя плотность почвы в слое 0...5 см для секции с иглами 9° составляла 0,96 г/см<sup>3</sup>; секции с иглами 5° – 1,09, а УСМК 5,4 соответственно 1,06 г/см<sup>3</sup>. В слое почвы 5...10 см эти показатели соответственно составляли: 1,11 г/см<sup>3</sup> – для иглы с углом 9°; 1,13 – 5° и 1,10 г/см<sup>3</sup> для УСМК 5,4. В слое 10...20 см плотность почвы

существенно не изменилась. В сравнении с начальным состоянием, средняя плотность которого составляла  $1,35 \text{ г/см}^3$ , после воздействия на почву секции с углом  $9^\circ$  ее плотность уменьшилась на 29% в слое 0...5см и на 16% в слое 5...10см; обработка почвы секцией з иглами  $5^\circ$  изменил ее плотность на 19% в слое 0...5см и на 14% в слое 5...10см. Использование серийной секции привело к снижению плотности почвы на 21% в слое 0...5см и на 16% в слое 5...10см.

## ГЛАВА 4

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИГОЛЬЧАТОЙ БОРОНЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

#### 4.1. Исходные данные для расчета

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработана и изготовлена экспериментальная игольчатая борона с секцией, имеющей сменные иглы с углами заострения 5°, 7° и 9°. Расчет экономической эффективности от эксплуатации этого орудия проведен в соответствии с «Методикой определения экономической эффективности новых и модернизированных с/х машин» [187]. Расчет проведен на фоне сравнения однотипных характеристик базовой машины – культиватора УСМК-5,4 и экспериментальной игольчатой бороны с иглами различного угла заострения.

Основным источником экономического эффекта является улучшение показателей качества обработки почвы (см. п. 3.5). Расчет экономической эффективности проведен в средних ценах на конец 2014 года.

Исходные данные для проведения расчетов приведены в табл. 4.2.

Показатели технического уровня и условия испытаний приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Показатели технического уровня

Показатель	Значения показателя		
	по ТЗ		при лабораторно-полевых испытаниях
1	2	3	4
Производительность за 1 час,		Секция УСМК-5,4	Секция экспериментальной бороны

га/ч: основного времени эксплуатационного времени 1	2,16-4,86 1,2-3,9 2	2,16 1,15 3	2,16 1,15 4
Удельный расход топлива за час сменного времени, кг/га Основные показатели качества выполнения рабочего процесса глубина обработки почвы, см подрезание сорняков, % повреждение культурных растений, % Качество рыхления почвы (размеры фракций до 25 мм), % игласуглом заострения: 5° 7° 9° Масса машины сухая конструкционная для выполнения основной работы, кг игласуглом заострения: 5° 7° 9° Ширина захвата, м Габаритные размеры в рабочем положении, мм: длина ширина высота Удельная суммарная оперативная трудоемкость технологического процесса, чел-ч/ч Удельная материалоемкость, кг-ч/га игласуглом заострения: 5° 7°	Данные отсутствуют Т 3...6 100 0...3 Не менее 80 923 5,4 1940 6445 1540 Данные отсутствуют Т	5,12 3,7 97,9 0 88,4 920 5,4 1940 6420 1540 0,03 425,9	4,35 До 8 98,5 0 88,2 90,5 93,5 890 905 920 5,4 1940 6420 1540 0,05 412,0 419,0 425,9

9 <sup>0</sup>			
----------------	--	--	--

#### 4.2. Результаты расчетов

Результаты расчетов эффективности использования игольчатой бороны приведены в табл. 4.2. Проведенный технико-экономический анализ указывает, что использование игольчатой бороны дает потребителю экономию прямых эксплуатационных затрат 11,89 грн/га, или в расчете на весь годовой объем работ – 5451,0 грн.

Таблица 4.2– Эффективность применения секции экспериментальной игольчатой бороны

Показатель	Варианты для сравнения	
	Секция УСМК-5,4	Секция экспериментальной игольчатой бороны
Базовая цена машины, грн.	63438	65400
Производительность, га/ч: за 1 час менного времени	2,16	2,16
за 1 час эксплуатационного времени	1,15	1,15
Заработная плата, грн./га	16,71	16,71
Амортизационные отчисления на реновацию, грн./га	83,91	86,50
Отчисления на все виды ремонта и ТО, грн./га	42,0	42,4
Затраты на ТСМ, грн./га	99,20	84,32
Прямые эксплуатационные затраты, грн./га	241,82	229,93
Годовой экономический эффект, грн.		5451,0

Проведенные расчеты свидетельствуют об эффективности внедрения обоснованных нами параметров и режимов эксплуатации игольчатой бороны.

Годовой экономический эффект по эксплуатации игольчатой бороны иглами, угол заострения которых  $7^{\circ}$ , составил 5,451 тыс. грн.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Усовершенствованы технологические процессы поверхностной обработки почвы боронами со сменными углами, угол заострения которых определяется состоянием обрабатываемой среды. Доказано непосредственное влияние параметров игольчатой бороны на эксплуатационно-экономические показатели использования орудия.

Теоретическими исследованиями перемещения дисков бороны с иглами по почве в продольно-вертикальной плоскости установлен характер движения дисков и игл борон, скорости их точек, а также траектории концов игл. Установлено, что центр диска, ось которого не связана с осями дисков, совершает вертикальные колебания во время движения. Прямолинейное движение центра диска происходит в следствие соединения в одном держателе всех осей дисков секции, которые двигаются вместе с ним. Аналитически установлено, что угол  $\beta$  между направлением вектора скорости  $v_k$  конца иглы и вертикалью, определяемый по выражению (2.11), тем меньше, чем ближе конец этой иглы к уровню, определяемому глубиной  $h_0$  обработки почвы.

Установлено, что эффективность работы бороны зависит от степени синхронности действия игл дисков секций на почву. Отмечено, что при равномерном движении центров дисков, оси которых связаны между собой, значение угла прокалывания почвы вдвое меньше угла поворота диска, при котором игла проходит путь от погружения на полную глубину и выхода из почвы.

В результате теоретических исследований установлено, что плоскопараллельное движение диска бороны с иглами по почве происходит под действием горизонтально приложенной в центре диска движущей силы  $P_0$ , а углубление – вертикально приложенной силы веса  $G$ . Получена зависимость (2.22), позволяющая определить силу, необходимую для заглубления иглы в почву, которая возрастает с увеличением угла

конусности  $\alpha_k$ , твердости  $p$  почвы и коэффициента трения  $f$  иглы с почвой. Установлено, что работа, которая тратится на прокалывание почвы иглами секций, растет с увеличением количества дисков, силы их давления на почву, глубины заглубления игл, а также зависит от радиусов дисков и угла между иглами в диске.

По результатам экспериментальных исследований получены уравнения для определения силы заглубления плунжера в зависимости от его конусности с учетом деформации почвы и установлено, что увеличение угла приводит к росту силы сопротивления, которая действует на почву и одновременно осуществляет ее разрушение. Наименьшее усилие заглубления конусного плунжера в почву на глубину 30 мм у игл с углом конусности  $10^\circ$ , а наибольшее –  $18^\circ$  и составляет соответственно 84, 37 Н и 125, 76 Н.

По результатам полевых испытаний экспериментальной секции игольчатой бороны установлено, что ее тяговое сопротивление, по сравнению с серийной секцией УСМК-5,4, было меньше для игл с углом  $10^\circ$  на 30%, а с углом  $14^\circ$  на 17%. Для игл с углом конусности  $18^\circ$  значение тягового сопротивления равно сопротивлению серийной секции с отклонением  $\pm 2\%$ . Установлено, что увеличение скорости движения приводит к росту тягового сопротивления на 5-24%, а глубины обработки почвы на 37-61%.

В результате проведения многофакторного эксперимента получены уравнения регрессии (рис. 3.13) усилия сопротивления от угла заострения игл ( $10^\circ \dots 18^\circ$ ), скорости движения секции игольчатой бороны (2,77...3,05 м/с), глубины заглубления иглы (35...85 мм). Установлено, что с уменьшением глубины проникновения игл и угла их заострения сила сопротивления уменьшается. При этом рациональной скоростью перемещения орудия является скорость в пределах 2,4...2,8 м/сек.

Установлено, что показатели качества выполнения рыхления почвы игольчатой бороной составляли: подрезание сорняков в зоне обработки –

98,5%; содержание фракций размерами до 25 мм для игл с углом  $14^{\circ}$  – 90,5%, что соответствует агротехническим требованиям.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований рекомендованы следующие значения основных конструктивных параметров игл: угол конусности  $2\alpha_k$  в пределах от  $10^{\circ}$  до  $14^{\circ}$ , радиус цилиндрической части иглы составляет 13...14 мм.

Годовой экономический эффект от эксплуатации усовершенствованной игольчатой бороны составил 5,451 тыс. грн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атаманюк О. Розробка подрібнювачів - розподілювачів рослинних решток нагальна проблема сучасного рослинництва // Техніка АПК. – 2007. – № 8 – 9. – С. 23 – 24.
2. Адамчук, В. В. Теория центробежных рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений [Текст] : монография / В. В. Адамчук. – К. : Аграрна наука, 2010. – 178 с.
3. Адамчук В.В., Шейченко В.О. Кукурудзяна альтернатива // газета Урядовий кур'єр / від 11 липня 2014р.
4. Бабук В.Б. Тракторы и сельхозмашины Англии, США, Канады. – М.: Сельхозиздат, 1959. – 312с.
5. Барабашкин В.П. Молотковые и роторные дробилки. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 132с.
6. Беляев Н.М. Почвообрабатывающие машины с активными рабочими органами // Механизация и электрификация соц.сел.хоз-ва. 1978. - №2. - С.54-57.
7. Босой Е.С. Режущие аппараты для работы на повышенных скоростях // Тракторы и сельхозмашины. – 1961. – №8. – С. 32–35.
8. Босой Е.С. Скорость резания стеблей сельскохозяйственных культур // Сельхозмашина. – 1953. – №4. – С. 19–22
9. Булгаков, В. М. Аналітичне дослідження руху машинного агрегату[Текст]/
- 10.В. М. Булгаков, М. Г. Березовий, О. О. Сипливец // Механізація сільськогосподарського виробництва : зб. наук. праць / Нац. аграр. ун - ту. – К. : НАУ, 1999. – Т. V. – С. 321– 326.
- 11.Буряков А.Т., Кузьмин М.В. Справочник по механизации полеводства. – М.: Колос, 1971. – 351с.

- 12.Василенко И.Ф. Экспериментальная теория режущих аппаратов жатвенных машин. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин. Под редакцией В.П. Горячкина. Том IV. М. – Л.: Сельхозгиз, 1936. – 583с.
- 13.Василенко И.Ф. Теория режущих аппаратов жатвенных машин // Труды ВИСХОМ. – М.: ОНТИ, Сборник 5. – 1937. – С. 7 – 14.
- 14.Василенко П.М. Элементы математической обработки результатов экспериментальных исследований. – М.: ВИМ, 1958. – 57с.
- 15.Василенко П.М., Погорелый Л.В. Основы научных исследований. Механизация сельского хозяйства. – К.: Вища школа, 1985. – 266с.
- 16.Василенко П.М. Основи аналітичних методів землеробської механіки. – К.: Видавництво НАУ, 1998. – 29с.
- 17.Вентцель Е. С., Овчаров М. Н. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
- 18.Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос, 1967. – 160с.
- 19.Ветохин В. И. Системные и физико-механические основы проектирования рыхлителей почвы [Текст] : дис...док. техн. наук 05.05.11 / В. И. Ветохин ; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ОАО «Научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения им. В. П. Горячкина» ОАО «ВИСХОМ». – Киев; Москва. – 2010. – 284 с.
- 20.Веселовський І.В., Манько Ю.П., Козубський О.Б Довідник по бур`янам. – К.: Урожай, 1994. – 145 с.
- 21.Ветохин В.И. Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины: Теория, расчет, результаты испытаний: монография / В.И. Ветохин, И.М. Панов, В.А. Шимонин, В.А. Юзбашев. – К.: Феникс, 2009. – 264 с.

- 22.Воронежский В.И., Евтушенко Н.Е., Коберниченко И.А. Механизация возделывания и уборки кукурузы. – М.: ЦИНТИАМ, 1963. – 137с.
- 23.Войтюк П. Д. Передумови майбутнього врожаю цукрових буряків: якість насіння, виконання передпосівного обробітку ґрунту та сівби // Пропозиція. – 2005. – № 4. – с. 34-36
- 24.Воробьев С. А. Севообороты интенсивного земледелия. - М.: Колос, 1979. - 368 с.
- 25.Вильямс В. Р. Почвоведение, земледелие с основами почвоведения. – 5-е изд. перераб. и доп. – М., 1947. – 456 с.
- 26.Гапоненко В.С. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини – К.: Урожай, 1982. – 312 с.
- 27.Гевко, Б.М. Функциональные возможности шнековых механизмов [Текст] / Б. М. Гевко // Тракторы и сельхозмашины, 1987. – № 2. – С. 43 – 44.
28. Гернет М.М. Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1973. – 462с.
- 29.Гордієнко В. П., Геркіял О. М., Опришко В. П. Землеробство. - К.: Вища шк., 1991. - 267 с.
- 30.Говоров, О. Ф. Обґрунтування параметрів подрібнювача рослинних решток з вертикальною віссю обертання [Текст] дис... канд. техн. наук : 05.05.11 / ННЦ «ІМЕСГ». – Київ, 2011. –208 с.
- 31.Горанский В.А. Динамический анализ молотковой кормодробилки // Сельхозмашина. – 1952. – № 10. – С. 17–20.
- 32.Горячкин В.П. Уривок з теорії різання. Про ножниці // Сільсько-Господарська машина. – 1930.– № 1–2. – С. 1–4.
- 33.Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3-х томах. – М.: Колос, 1968. – том III. – 384 с.

- 34.Гудзь В. П., Примак І. Д., Будьонний Ю. В. Землеробство: Підручник. - К.: Урожай, 1996. - 384 с.
- 35.Гудзь В. П., Тлумачний словник із загального землеробства. - К.: Аграрна наука, 2004. - 220 с.
- 36.Гуков, Я. С. Ресурси и приоритеты агроинженерной науки [Текст] / Я. С. Гуков, В. М. Дринча; НААН Украины, ННЦ "ИМЭСХ". – К. : Феникс, 2012. – 536с.
- 37.Гуков Я.С. Механіко–технологічне обґрунтування засобів для механізації обробітку ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур в Україні: Дис... доктора техн. наук / ІМЕСГ УААН. – Глеваха, 1998. – 386 с. з дод.
- 38.Гулейчик А.И. Машины для возделывания и уборки кукурудзы. – М.: Высшая школа, 1981. – 224с.
- 39.Гутьяр Е.М. К теории резания стеблей // Сельхозмашина. – 1931. – №7.– С. 12–13.
- 40.Долгов И.А., Васильев Г.К. Математические методы в земледельческой механике. – М.: Машиностроение, 1967. – 202 с.
- 41.Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351с.
- 42.Довідник по регулюванню сільськогосподарських машин: Довідник/ В.І.Кочев, и др..-К.: «Урожай» 1985.
- 43.Дубровин В.А. Обоснование технологического процесса и параметров плуга для двухъярусной вспашки под сахарную свеклу: дис. канд. техн. наук / УНИИМЭСХ. – Глеваха, 1987. – 233 с. с прил.
44. Dehondt lance sa nouvelle arracheuse de lin//Le courrier cauchois. Vendredi 27 juin 2008. – P. 5 –6.

45. Эксплуатация тракторов, почвообрабатывающих и посевных машин: Справочник/ Б.А. Землянский, и др..- М.: Росагропромиздат, 1991.
46. Заблонський К.И. Детали машин. – К.: Вища школа, 1985. – 520с.
47. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Машини для заготівлі кормів. – Харків: ОКО, 2003. – Том II (частина 1). – 360 с.
48. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1 (частина 1). Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. – Харків. ОКО. – 2001. – 444 с.
49. Заславський Д.С. Основы расчета механизированных процессов в растениеводстве. – М.: Колос, 1973. – 319с.
50. Ivanyshyn V. Optimization of machine and tractor aggregates structures in tilling and sowing energy saving technologies / V. Ivanyshyn, V. Pogorilyy, V. Sheychenko, L. Shustik // Proceedings of the 5-th Research and Development Conference of Central- and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering. – Kiev: National Agricultural University of Ukraine, 20-24 June 2007. - Part 2. - pp. 150-160.
51. Ивашко А.А. Вопросы теории резания органических материалов лезвием // Тракторы и сельхозмашины. – 1958. – №2. – С. 34 – 37.
52. Иофинов С.А., Лышко Г.П. Эксплуатация машинно - тракторного парка. – М.: Колос, 1984. – 351с.
53. Ишлинский Ю.А. Задача о скорости косыбы злаков // Сельхозмашина. – 1937. – № 5 – 6. – С. 9 – 10.
54. Качинский Н.А. Структура почвы. – М.: Изд-во МГУ. 1963
55. Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Изд. 3-е допол. И перераб. – М.: Колос, 1994. – 751 с.
56. Карпенко А. Н., Халанский В.М. Сельскохозяйственные машины. – М.: Агропромиздат, 1989. – 528 с.
57. Карпенко А.Н. Экспериментальная теория режущих аппаратов

- уборочных машин. Теория конструкции и производство сельскохозяйственных машин. Под редакцией В.П. Горячкина. Том II. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 572с.
58. Карпенко М.І. Стійкість руху ножа ротаційної косарки в горизонтальній і вертикальній площинах // Вісник сільськогосподарської науки. – 1980. – №9. – С.65 – 66.
59. Карпенко М.І. Обґрунтування подачі, довжини і точки підвісуножів ротаційного апарата // Вісник сільськогосподарської науки. – 1981. – №1. – С.47 – 49.
60. Карпенко М.І. К методике определения энергии резания растений ротационным копром с шарнирно подвешенным ножом // Механизация и электрификации сельского хозяйства. УНИИМЭСХ. – К.: Урожай. – 1981. – Вып. 50. – С. 36 – 40.
61. Кравчук В., Хайліс Г., Шевчук В./ О качении дисков игольчатой бороны при перемещении по поверхности почвы // Научно-технический журнал Техніка і технологія АПК. – 2011. - № 10.
62. Кравчук, В.І. Теоретичні основи адаптації сільськогосподарських машин [Текст]: монографія. – К: НАУ, 2005. – 208с.
63. Кравчук В.І. Адаптація сільськогосподарських машин в системах керованих технологій землеробства: дис..докт.техн.наук/ Київ – 2005. – 375с. з додат.
64. Климанов А.В. Определение энергоемкости резания в силосоуборочных комбайнах // Тракторы и сельхозмашины. – 1964. – №3. – С. 33 – 34.
65. Комаристов В.Ю., Дунай М.Ф. Сільськогосподарські машини. – К.: Вища школа, 1987. – 486с.
66. Kovalev M. Current situation and future on flax production in Russia: plant cultivation and fiber production M. Kovalev, I. Uscnapovki // Proceedings

- of 6 international Symposium «Materials made of Rencwable Resources» 6-7 September 2007. – Erfurt, Germany, 2007. – P. 91.
67. Комаров Л.И. К Определению основных параметров измельчающего аппарата роторного типа // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1963. №6. – С. 22–24.
68. Крамаренко Л.П. Сопротивление растений резанию // Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин.– М. – Л.: Сельхозгиз. – 1936. – С. 234–251.
69. Кушнарєв С.А. Обоснование энергосберегающего технологического процесса обработки почвы и параметров упругих рабочих органов для условий южной степной зоны Украины: Дис... канд.техн. наук / ИМЭСХ УААН. – Глеваха, 1998. – 194 с.
70. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для Вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 543 с.
71. Лєтошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины. – М. – Л.: Сельхозиз, 1940. – 562с.
72. Ловейкин, В.С. Методы математического моделирования в формировании обобщенных критериев определения режимов движения и оценки механизмов, машин, роботов – манипуляторов [Текст] /
73. В. С. Ловейкин, Ю. В. Човнюк // Механізація сільськогосподарського виробництва : зб. наук. праць / Нац. аграр. ун -т. – К. : НАУ, 2000. – Т.VIII. – С. 33 – 40.
74. Лурье, А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов [Текст] / А. Б. Лурье. – М.: Колос, 1981. – 382 с.: ил.
75. Лур'є А.Б., Громбчевский С.О. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 527с.

76. Листопад Г. Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: Колос, 1976. – 752 с.
77. Машины для обработки грунта та сівби/Пос. за ред.. В.І.Кравчук, Ю.Ф. Мельник// – Дослідницьке. – 2008. – С.288.
78. Мальцев Т. С. Вопросы земледелия. - М.: Сельхозгиз, 1955. - 430 с.
79. Мазитов Н. Теория реактивных рабочих органов почвообрабатывающих машин. – Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2011. – 280 с.
80. Мельников В.С., Алешкин В.В., Роцин П.М. Планирование экспериментов в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 187с.
81. Методика определения физико - механических свойств сельскохозяйственных растений. – М.: ОНТИ ВАСХНИЛ, 1960 – 227с.
82. Методика определения экономической эффективности тракторов и сельскохозяйственной техники[Текст].– М.: МСХ, Россия, – 1998. – Ч. 1, 2. – 98с.
83. Мовнин М.С., Израелит А.Б. Теоретическая механика. – Л.: Судостроение, 1971. – 344с.
84. Насонов В.А. Обоснование процесса высева и параметров дозирующих рабочих органов широкозахватной зерновой сеялки с централизованной высевающей системой: Дис... канд. техн. наук / УНИИМЭСХ. – Глеваха, 1984. – 281 с. с прил.
85. Назаренко І.І., Польчина С. М., Нікорич В. А. Ґрунтознавство: Підручник. - Чернівці, 2003. - 400 с.
86. Новиков Ю.Ф. Теория и расчет ротационного режущего аппарата с рубящими рабочими органами //Сельхозмашина. – 1957. – №8.– С.1 – 5.
87. Овсинский И. Е. Новая система земледелия. - М., 1999. - 105 с.

88. Особов В.И., Васильев Г.К. Сеноуборочные машины и комплексы. – М.: Машиностроение, 1983. – 304с.
89. Основи сільського господарства: Навч. посіб. / Б.М.Польський, М.І.Стеблянко, Р.Д.Чмир, В.С.Яворський. – К.: Вища шк., 1991. – 296 с.
90. Панов И.М., Мелихов В.В. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М., 1963. - 31 с.
91. Петров В.А., Зубенко В.Ф. Буряківництво. - М.: Колос, 1981. - 302с
92. Примак І. Д., Гудзь В. П., Рошко В. Г. та ін. Механічний обробіток ґрунту в землеробстві. - Біла Церква, 2002. - 320 с.
93. Погорелец А.Н., Карпенко М.И. Влияние параметров и режимов работы ротора косилки на отклонение ножа // Совершенствование организации и технологии ремонта сельскохозяйственных машин. – К.:РИОУСХА, 1982. – С. 159 – 163.
94. Погорелый Л.В. Повышение эксплуатационно - технологической эффективности сельскохозяйственной техники. – К.: Техника, 1992. – 360с.
95. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытаний сельскохозяйственных машин. – К.: Техника, 1992. – 312с.
96. Ревуть І. Б., Фізика ґрунтів, Л., 1964
97. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
98. Резник Н.Е. Пути повышения износостойкости и долговечности сельскохозяйственных машин // Тракторы и сельхозмашины. – 1967. – № . – С. 29 – 31.
99. Рогатинський, Р.М., Дудін О.В. Модель контактної взаємодії вантажу із поверхнями скребкового конвеєра із вібруючим жолобом[Текст]/ Р. М. Рогатинський, О. В. Дудін // Вібрації в техніці та технологіях, 2005. – № 3(41). – С.85 – 89.

100. Російсько–український технічний словник [Текст]/ уклад.Д. Коновалюк.–Луцьк.:Візор, 1993 .–1047 с.
101. Рустамов С.И. Физико - механические свойства растений и совершенствование режущих аппаратов уборочных машин. – К.: Вища школа, 1981. – 172с.
102. Сабликов М.В. О критической величине угла заземления // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1963. – №2. – С. 44. Сільськогосподарські машини Д. Г. Войтюк, Г. Р. Гаврилюк 2004 р. 448 с.
103. Сердюк М.М. «Організація і технологія механізованих робіт у рослинництві» Навч. посіб.-К.: Вид. А.С.К.,2006.
104. Сакун Б.Л. Способы снижения расхода энергии на основную обработку почвы. // Сб.науч.тр. / МИНСП. Вып. 1. - М., 1978. - С.8-11.
105. Сизов О.А. К вопросу определения удельной работы резанием. – М.: МИИСП, ТОМ V. – 1970. – 436с.
106. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
107. Сидорчук, О. В. Наукові принципи управління проектами систем машин адаптивного рільництва [Текст] / О.В. Сидорчук // Агромех-2004: матер. Міжнар. наук.- прак. конф. ЛДАУ. – Львів: ДАУ, 2004. – С.3 – 8.
108. Хайлис. Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин. – К.: Изд-во УСХА. 1992. – 235 с.
109. ХайлисГ., ШевчукВ., ТолстушкоН./К расчету сил, действующих на иглы игольчатой бороны // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.23, м.Луцьк, 2012.
110. Хайліс Г., Шевчук В.В., Шевчук В.Г./Про вплив ряду факторів на зусилля, необхідного для занурення в ґрунт голок голкової борони// Техніка і технологія АПК. – 2012. – № 12.

111. Хайлис Г., Шевчук В., Толстушко Н. / Особенности плоскопараллельного движения дисков игольчатой бороны по почве// Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.23, м.Луцьк, 2012.
112. Хайлис Г., Шевчук В.В., Шевчук В.Г./ Об определении твердости почвы и ее сопротивление при проколе иглами бороны // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.24, м.Луцьк, 2012.
113. Хайлис Г., Шевчук В./Определение работы, затрачиваемой при прокалывании почвы иглами игольчатой бороны // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сіл. госп-ва України: Зб. наук. пр. / Укр. наук.-досл. ін-т прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. вир-ва ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2012. – Вип. 16 (30). –Кн. 1. – 500 с..
114. Хайлис Г., Василюк В., Шевчук В. / Определение направления прокола почвы иглами игольчатой бороны // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.24, м.Луцьк, 2012.
115. Хайлис Г., Ковалев Н., Талах Л., Шевчук В. / О прокалывании почвы иглами игольчатой бороны // Достижения науки и техники АПК, № 1 – 2014.
116. Хайлис Г., Ковалев Н., Толстушко Н., Шевчук В. / Анализ работы игл игольчатой бороны при их качении по почве// Тракторы и сельхозмашины, 2014.
117. Хайлис Г., Талах Л., Шевчук В. / Прокалывание почвы конусными иглами игольчатой бороны // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.27, м.Луцьк, 2014.
118. Хайлис Г. Обработка экспериментальных данных исследования та їх аналіз // Техніка АПК. – 2007. – С. 15 – 18.
119. Хоменко М.С., Перспективы использования почвообрабатывающих машин с пассивными и активными рабочими

- органами. // Механізація і електрифікація соц.сел.хоз-ва. 1987. - №5. - С.26-28.
120. Храпач Е.И. обоснование схемы, конструктивных и кинематических параметров роторной косилки // Комплексная механизация и автоматизация процессов в животноводстве и овощеводстве. – Днепропетровск, 1970. – С.41 – 67.
121. Хорунженко В. Е. Инженерные аспекты оценки технического уровня и прогнозирования эксплуатационно-технологических показателей культиваторов и сеялок // Сборник трудов НПО ЛАН. Теория и методика создания почвообрабатывающих и посевных машин – Кировоград, 1996. – с . 39-54.
122. Тудель Н.В., Верхуша В.М. Исследование энергоемкости процесса резания толстостебельных растений // Тракторы и сельхозмашины. – 1967. – №1. – С. 25 – 31.
123. Тудель Н.В., Кузьмич Я.А. Определение энергии резания при малых ее значениях и больших скоростях // Механизация и электрификации социалистического сельского хозяйства. – 1976. – №1. – С. 42.
124. Царенко О. М., Войтюк Д. Г. та ін. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник. – К.: Мета, 2003. – 448с.
125. Шевчук В., Юхимчук С., Грушацька / Вдосконалення голчато-дискової борони культиватора // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.23, м.Луцьк, 2012.
126. Шевчук В. /Анализ качения сил игольчатой бороны по почве и действующих на них сил // Зб. наук. статей „Сільськогосподарські машини”, Вип.26, м.Луцьк, 2013.

127. Шевчук В. / О взаимодействии с почвой движущихся игл игольчатой бороны // Міжвузівський збірник „ Наукові нотатки ”, Вип. 40, м Луцьк, 2013.
128. Шевцов Е.В. Анализ работы режущих аппаратов на уборке грубостебельных культур // Научные трудыВИЭСХ. – М.: ОНТИ, 1954. – Том XIII.–С. 141–156.
129. Шейченко В.О., Хайліс Г.А., // Теорія і розрахунок апаратів для підбирання та обертання ” Монографія.-Ніжин, Видавець ПП Лисенко М.М., 2014.- 240 с.
130. Bann T., Ogawa T. Studies on the gutting every of the rotay mover. // I. Soc. Agr. Mach.. – Japan. – 1989. – №4. – S. 524–529 (англ.).
131. Randal D. Nulty P. Imakt cutting behavior of Forage Irops // Iournal of Agricultural Engineersing Research, 1990, №3, –S. 313-338 (англ.).
132. Проспект ВАТ „Красилівський машинобудівний завод” (Україна).
133. Проспект фірми „Kuhn” (Франція).
134. Проспект фірми „Maschio” (Італія).
135. Проспект фірми „Standart” (Сербія).
136. Проспект фірми „Rhino”(Італія).
137. Проспект фірми „Joskin” (Белгія).
138. Проспект фірми „Schulte”(Канада).
139. Проспект фірми „MCMS” (Польща).
140. Проспект фірми „DelMorino” (Італія).
141. Патент 44594України, 6АО1В7/ОО. Борона / Воробйов Геннадій Михайлович, БольшаковВолодимир Іванович, Горбенко Володимир Федорович, Воробйова Вікторія Геннадівна, ШемавневВолодимир Іванович, Кіряцев Леонід Олексійович; Придніпровська державнаакадемія будівництваархітектури. – № 2001063883; Заявл. 08 06 2001; Опубл. 15 02 2002, Бюл. №2. – 3с.

142. Патент 34027України, МПК А01В 19/00. Голчастийробочийорганборони/ Шмат Сергій Іванович, Мачок Юрій Вікторович, Лузан Петро Григорович,Матвеев Кузьма Дмитрович: Кіровоградськийнаціональнийтехнічний університет(Україна).–№ u200802063; Заявл. 18.02.2008; Опубл. 25.07.2008: Бюл. №14. – 5с.
143. Патент 18853 України, МПК А 01 Д 34/00. Борона / Рудь Анатолій Володимирович, Жалоба Валерій Михайлович, Михайлова Людмила Миколаївна (Україна). – № u200606518; Заявл.13.06.2006, Опубл.15.11.2006, Бюл. № 11. – 3с.
144. Патент 49305 України, МПК А01В 21/04 (2006.01). Робочий орган борони / Москалевич Вадим Юрійович, Бабицький Леонід Федорович, Куклін Володимир Олексійович, Тарасенко Володимир Іванович (Україна). – № u200911179; Заявл. 04.11.2009, Опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8. – 3с.
145. Патент 59058 України, 7 А01В29/04. Грунторозпушувальнийголчастийкоток / Сисолін Петро Васильович, Місків Вадим Зиновійович, Сало Василь Михайлович: Кіровоградськийдержавний технічнийуніверситет (Україна). – № 2002129966; Заявл. 11 12 2002, Опубл. 15 08 2003, Бюл. № 8. –3с.
146. Патент 59145 України, МПК (2011.01) А01В 21/00, А01В 23/00. Борона / Мачок Юрій Вікторович, Шмат Сергій Іванович, Сало Василь Михайлович, Лузан Петро Григорович, Лузун Олена Романівна: Кіровоградський державний технічний університет (Україна). – № u201010961; Заявл. 13.09.2010; Опубл. 10.05.2011: Бюл. № 9. – 3с.
147. Патент 76821 України, МПК(2006) А01В 21/08(2006.01) А01В 21/00. Борона дискова / Заграфов Григорій Костянтинівич, Малюжеч Володимир Олександрович: Інститут сільського господарства полісся (Україна). – № 20040806586; Заявл. 06.08.2004; Опубл. 05.09.2006: Бюл. № 9– 4с.

148. Патент  
82951 України, МПК(2006)A01B 23/00. Робочий орган дискової бороги з системою очищення / Зелинський Миколайович Здіслалович (Україна). – № а200611139; Заявл. 23.10.2006; Опубл. 26.05.2008: Бюл. № 10 – 5с.
149. Патент 84965 України, МПКА01В 49/06(2006.01).Розпушувач ґрунту/ Погорілий Віктор Васильович, Пономар Юрій Васильович, Шустік Леонід Прокопович, Датко Віктор Дмитаович, Дубровін Валерій Олександрович, Корабельський Валерій Іванович - (Україна). – № а200702725; Заявл. 15.03.2007; Опубл. 10.12.2008: Бюл. № 23 – 4с.
150. Патент 105740 України, МПКА01В 29/04(2006.01). Ротаційне ґрунтообробне Знаряддя / Бабицький Леонід Федорович, Москалевич Вадим Юрійович, Кулик (Україна). – № а201308504; Заявл. 08.07.2013; Опубл. 10.06.2014: Бюл. № 11 – 3с.

## Приложение А

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЯГОВОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ(ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ)ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИГОЛЬЧАТОЙ  
БОРОНЫ В СРАВНЕНИИ С СЕКЦИЕЙ ИГОЛЬЧАТОЙ БОРОНЫ  
УСМК-5.4**

Таблица А.1 Экспериментальные значения сил тягового сопротивления

УСМК-5,4	Глубина	Скорость			Глубина	
	<b>4</b>	<b>3,05</b>	<b>2,77</b>	<b>1,9</b>	<b>4</b>	<b>3,05</b>
Сред.знач.		21,01	17,79	13,8		77,38
Макс. знач.		43,82	39,57	22,31		111,8
Миним. знач		8,17	5,37	6,09		67,84
	<b>6</b>				<b>6</b>	
Сред.знач.		32,63	32,55	27,0		115,6
Макс. знач.		40,25	42,22	45,30		164,0
Миним. знач		26,74	22,07	19,43		70,12
	<b>8</b>				<b>8</b>	
Сред.знач.		47,67	37,31	31,63		127,4
Макс. знач.		53,1	44,89	41,0		167,5
Миним. знач		37,57	30,13	24,54		95,02

игольчатой бороны УСМК-5,4

Таблица А.2 Экспериментальные значения сил тягового сопротивления экспериментальной секции игольчатой бороны с углом заострения иглы 9 градусов

Угол 9 градусов	Глубина	Скорость			Глубина	
	<b>4</b>	<b>3,05</b>	<b>2,77</b>	<b>1,9</b>	<b>4</b>	<b>3,05</b>
Сред.знач.		20,7	16,45	15,52		77,0
Макс. знач.		29,96	28,32	13,54		143,0
Миним. знач		12,31	9,76	10,79		32,65
	<b>6</b>				<b>6</b>	

Сред.знач.		30,98	30,9	29,0		108,3
Макс. знач.		34,04	46,48	45,02		128,9
Миним. знач		28,78	11,46	17,51		70,12
	<b>8</b>				<b>8</b>	
Сред.знач.		39,93	34,52	29,22		124,7
Макс. знач.		42,31	39,83	44,10		139,3
Миним. знач		38,36	27,52	18,13		100,3

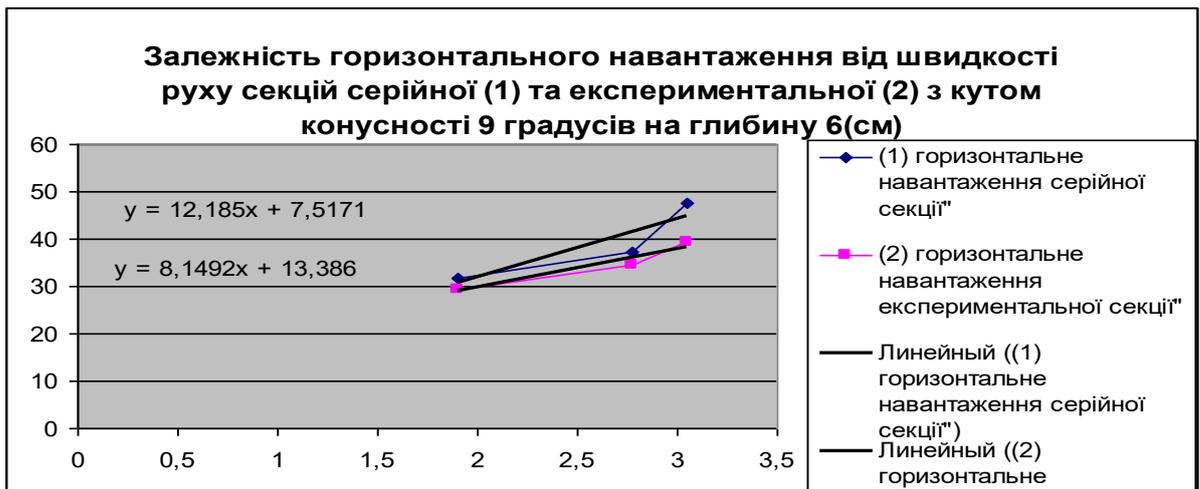
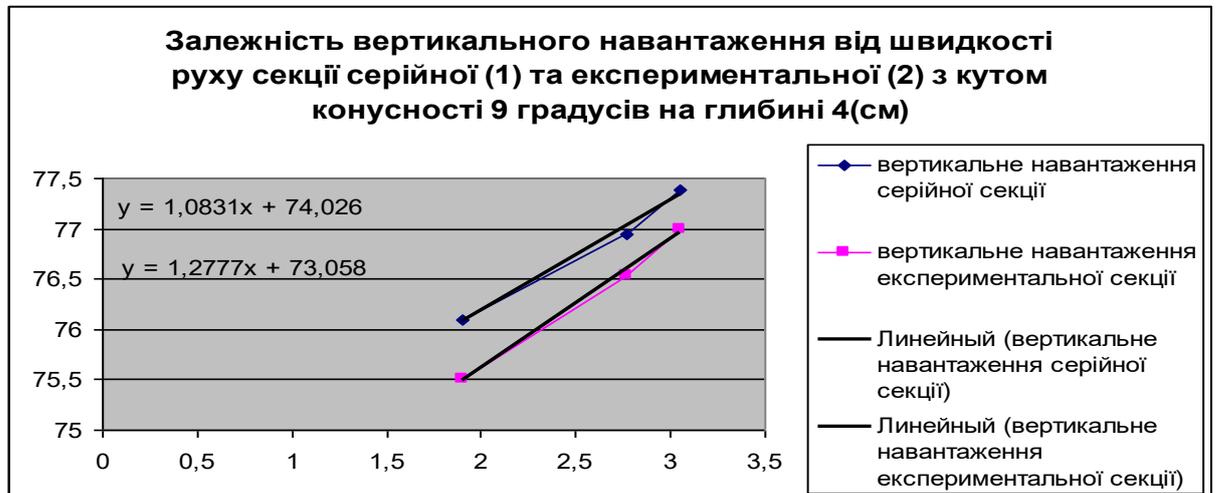
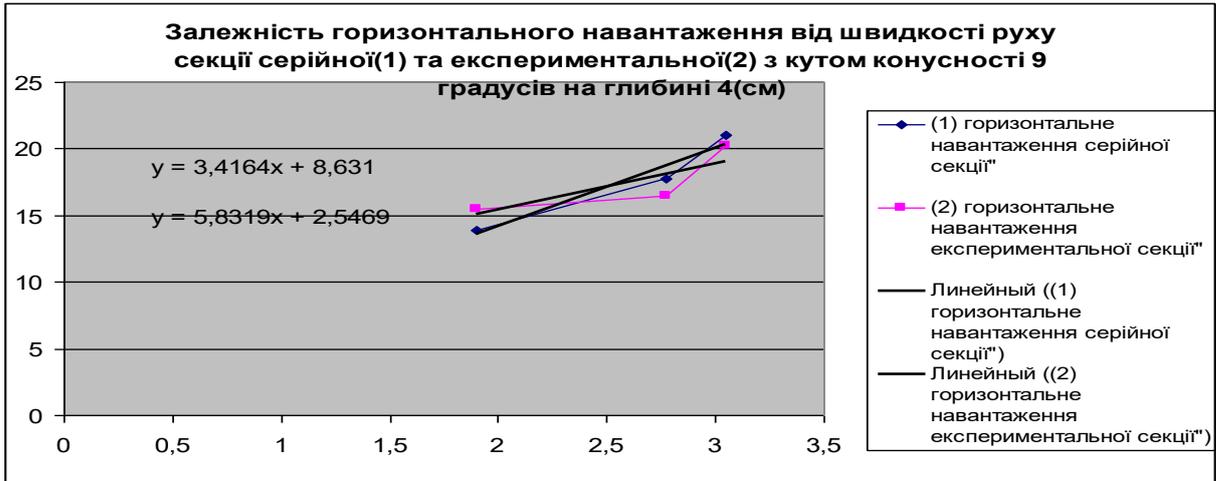
Таблица А.3 Экспериментальные значения сил тягового сопротивления экспериментальной секции игольчатой бороны с углом заострения иглы 7 градусов

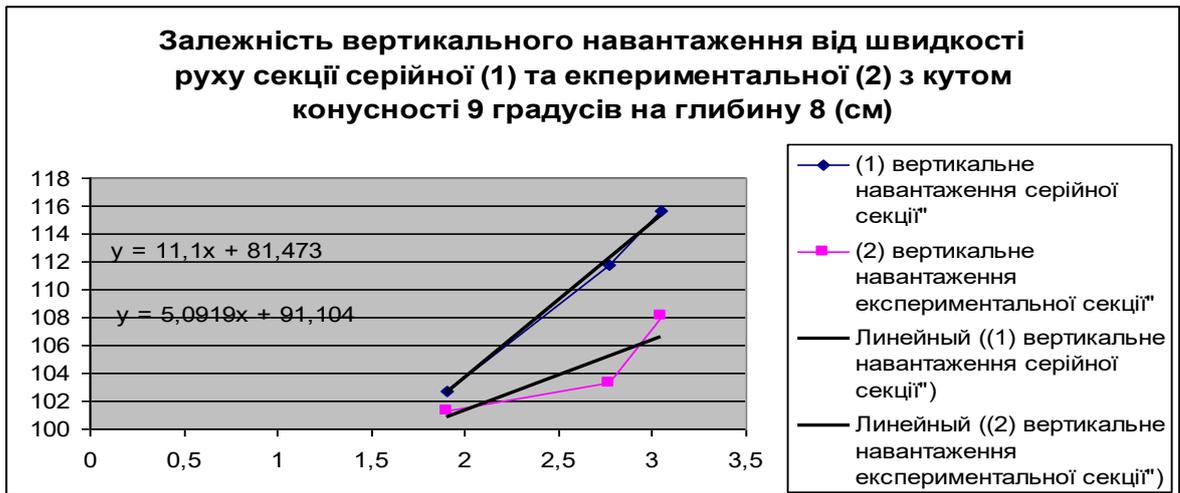
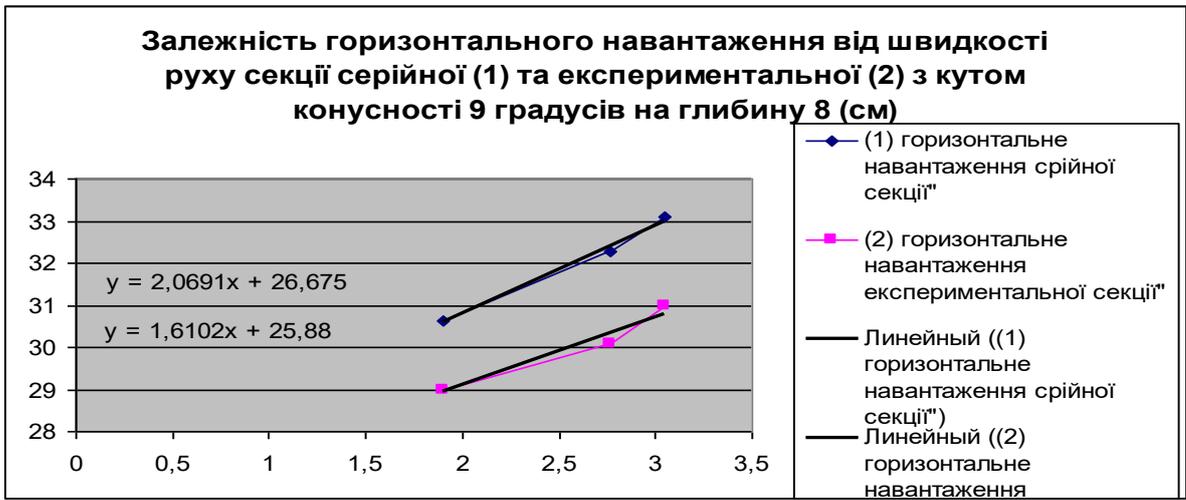
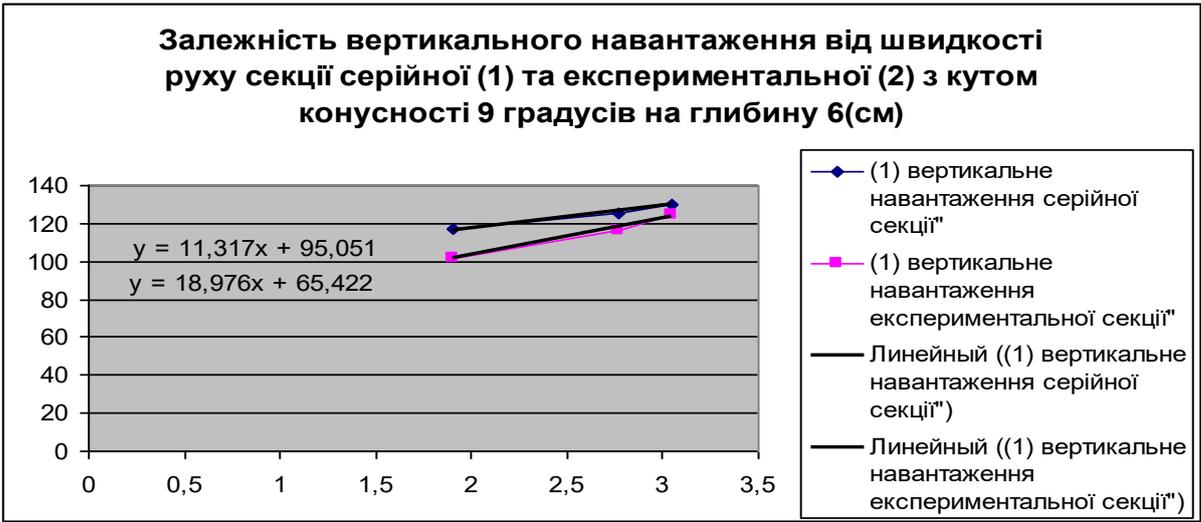
Угол 7 градусов	Глубина	Скорость			Глубина	
	<b>4</b>	<b>3,05</b>	<b>2,77</b>	<b>1,9</b>	<b>4</b>	<b>3,05</b>
Сред.знач.		20,48	16,24	13,95		76,92
Макс. знач.		23,4	16,9	20,24		90,38
Миним. знач		17,38	15,6	8,34		50,98
	<b>6</b>				<b>6</b>	
Сред.знач.		32,57	29,71	28,92		110,7
Макс. знач.		45,1	35,89	41,87		150,0
Миним. знач		19,73	23,36	21,37		75,12
	<b>8</b>				<b>8</b>	
Сред.знач.		36,22	30,87	27,78		106,5
Макс. знач.		56,61	47,19	51,74		170,3
Миним. знач		9,98	12,34	20,6		93,4

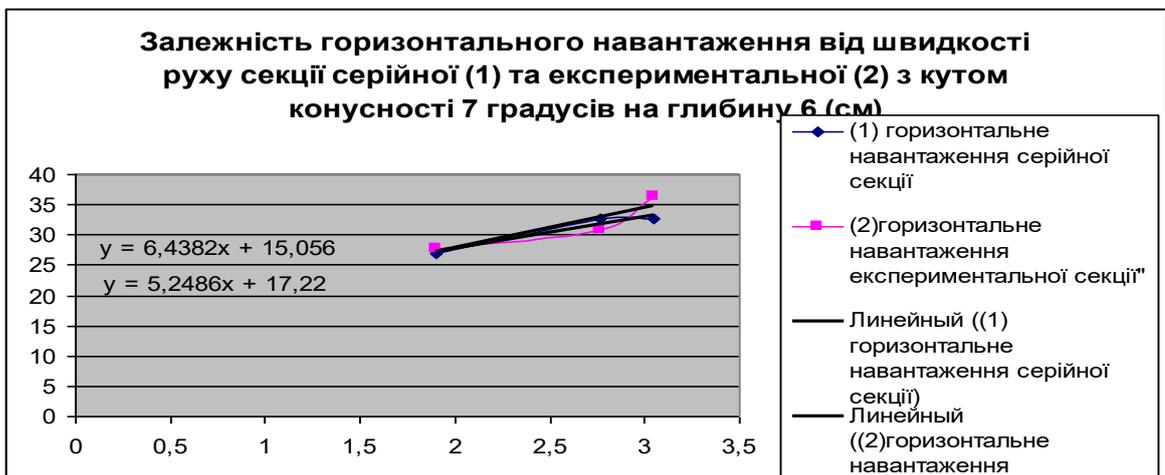
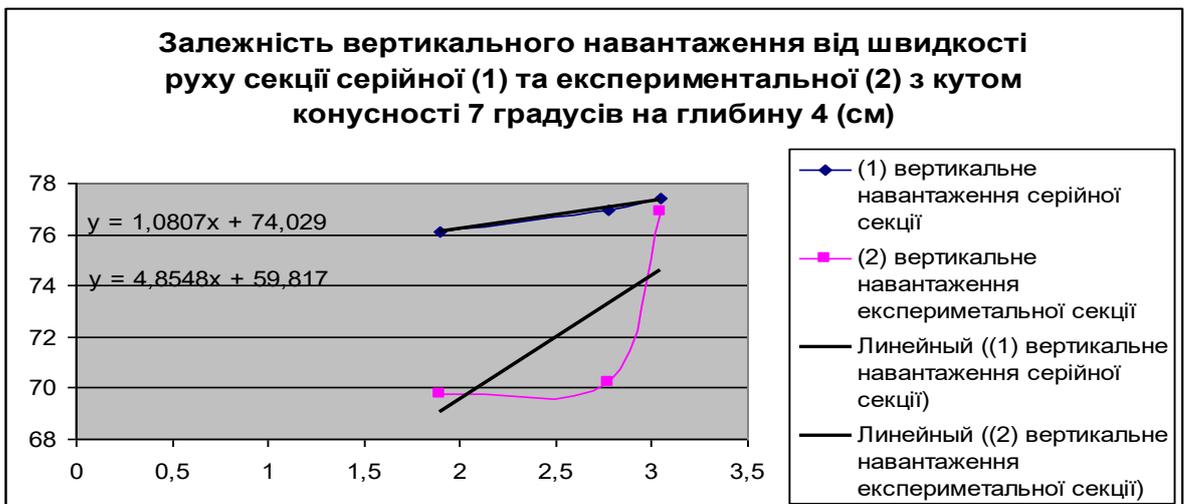
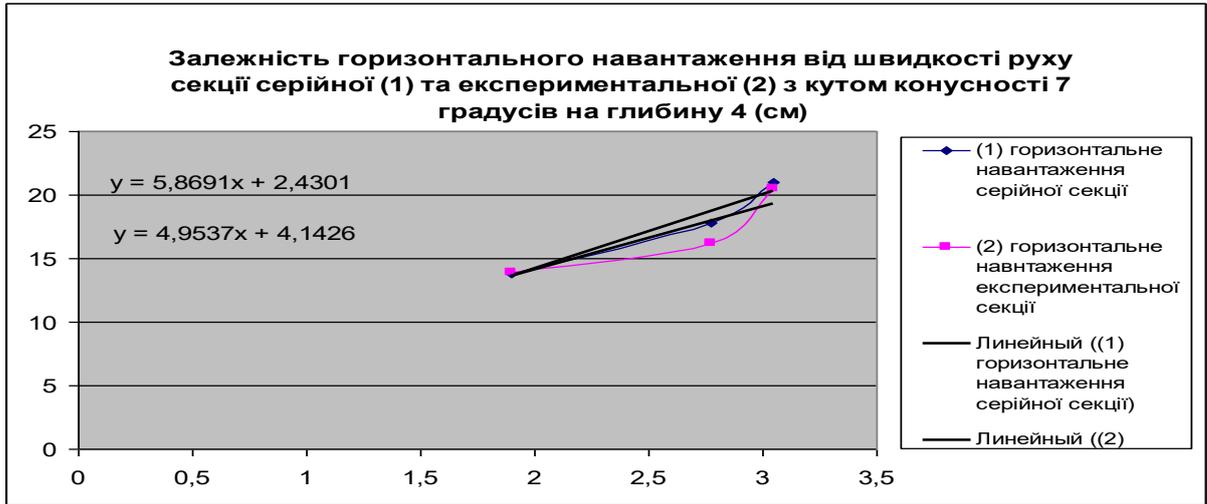
Таблица А.4 Экспериментальные значения сил тягового сопротивления экспериментальной секции игольчатой бороны с углом заострения иглы 5 градусов

Угол 5 градусов	Глубина	Скорость			Глубина	
	<b>4</b>	<b>3,05</b>	<b>2,77</b>	<b>1,9</b>	<b>4</b>	<b>3,05</b>
Сред.знач.		20,28	14,45	11,26		76,5
Макс. знач.		23,11	17,11	20,24		92,5
Миним. знач		18,37	15,86	8,34		60,0
	<b>6</b>				<b>6</b>	
Сред.знач.		30,65	28,37	25,13		89,8
Макс. знач.		36,02	41,96	26,52		89,9
Миним. знач		27,68	12,34	23,69		55,0
	<b>8</b>				<b>8</b>	
Сред.знач.		31,60	28,53	25,22		99,9
Макс. знач.		56,61	33,99	35,17		119,4
Миним. знач		3,4	22,39	20,04		70,1

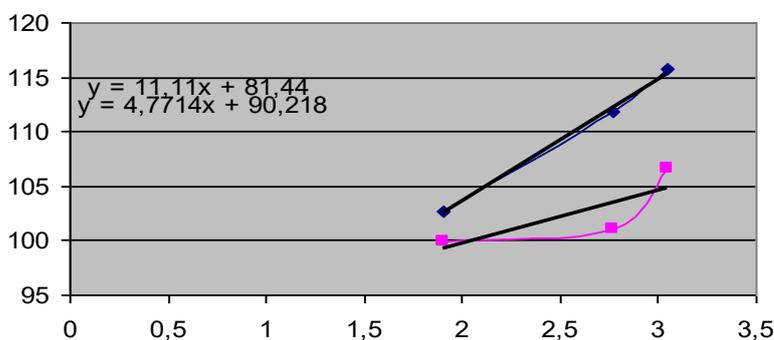
Приложение Б





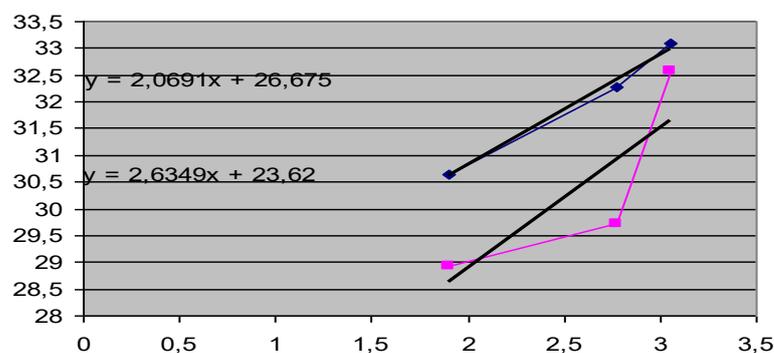


**Залежність вертикального навантаження від швидкості руху секції серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 7 градусів на глибину 6 (см)**



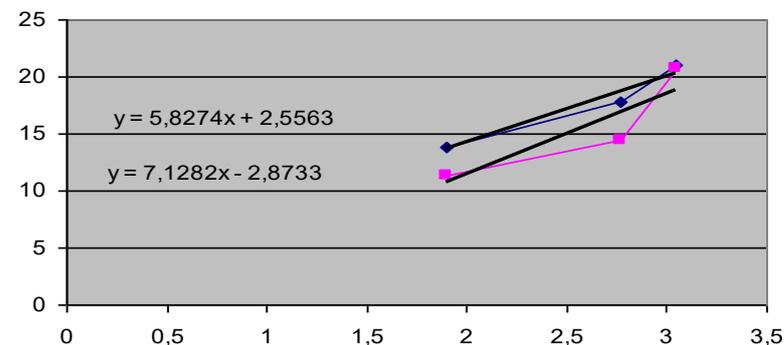
- ◆— (1) вертикальне навантаження серійної секції
- (2) вертикальне навантаження експериментальної секції
- Линейный ((1) вертикальне навантаження серійної секції)
- Линейный ((2) вертикальне навантаження експериментальної секції)

**Залежність горизонтального навантаження від швидкості руху секцій серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 7 градусів на глибину 8 (см)**



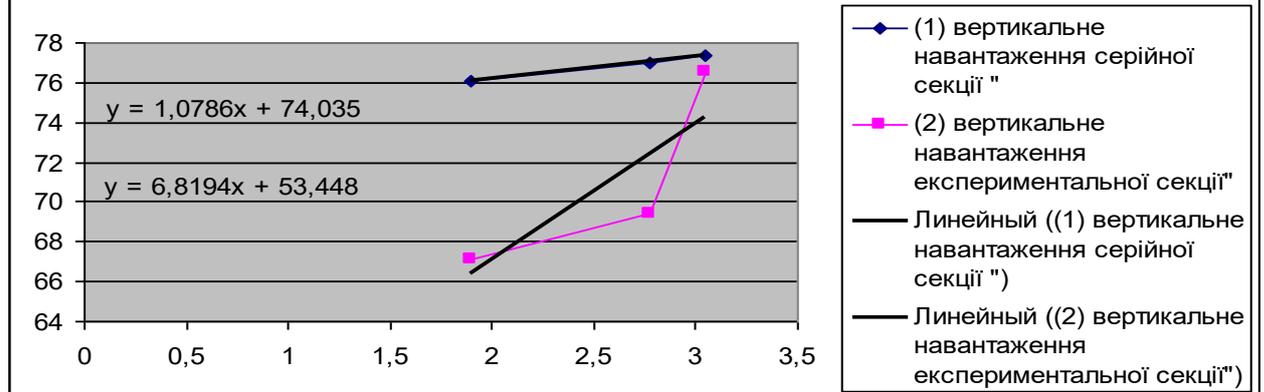
- ◆— (1) горизонтальне навантаження срийної секції"
- (2)горизонтальне навантаження експериментальної секції"
- Линейный ((1) горизонтальне навантаження срийної секції")
- Линейный ((2)горизонтальне навантаження експериментальної секції")

**Залежність горизонтального навантаження від швидкості руху секції серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 5 градусів на глибині 4 (см)**

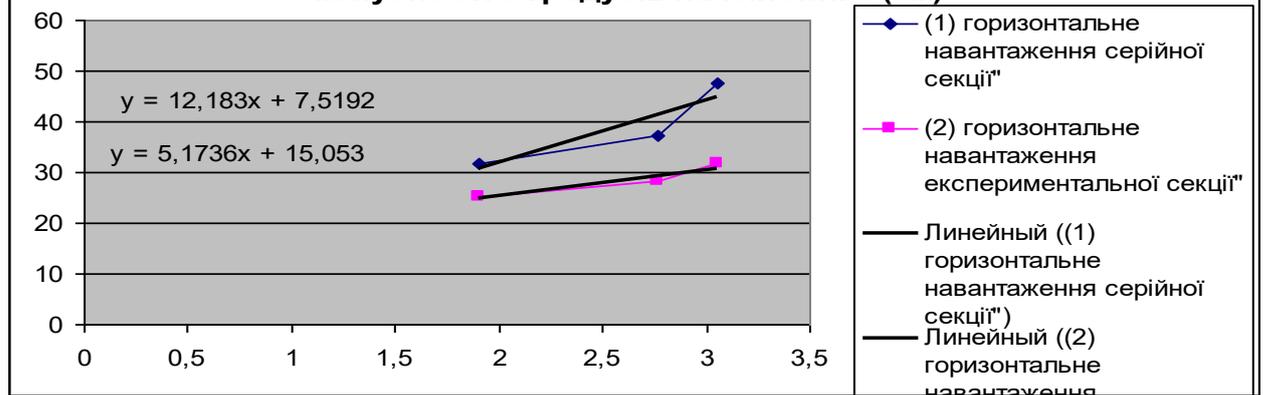


- ◆— (1)горизонтальне навантаження серійної секції"
- (2)горизонтальне навантаження експериментальної секції"
- Линейный ((1)горизонтальне навантаження серійної секції")
- Линейный ((2)горизонтальне навантаження експериментальної секції")

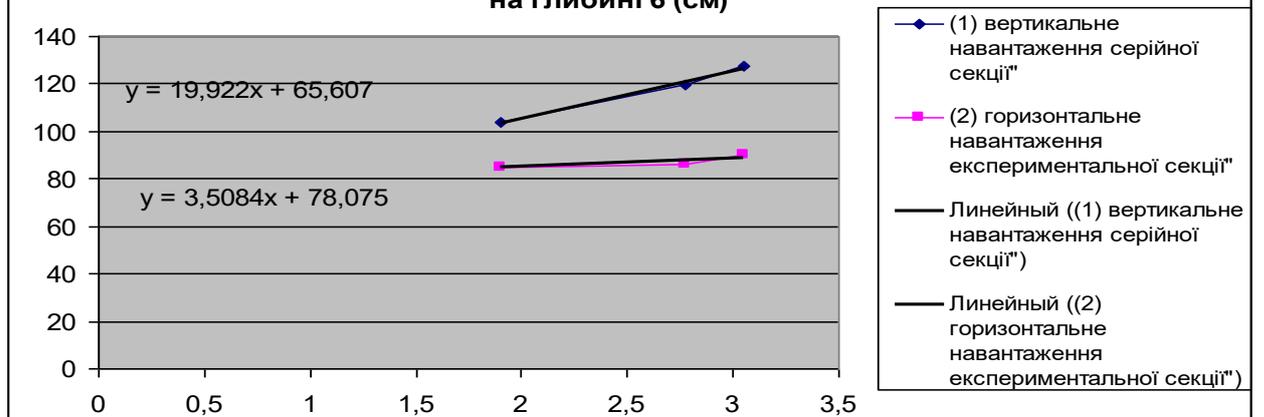
**Залежність вертикального навантаження від швидкості руху секції серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 5 градусів на глибина 4 (см)**

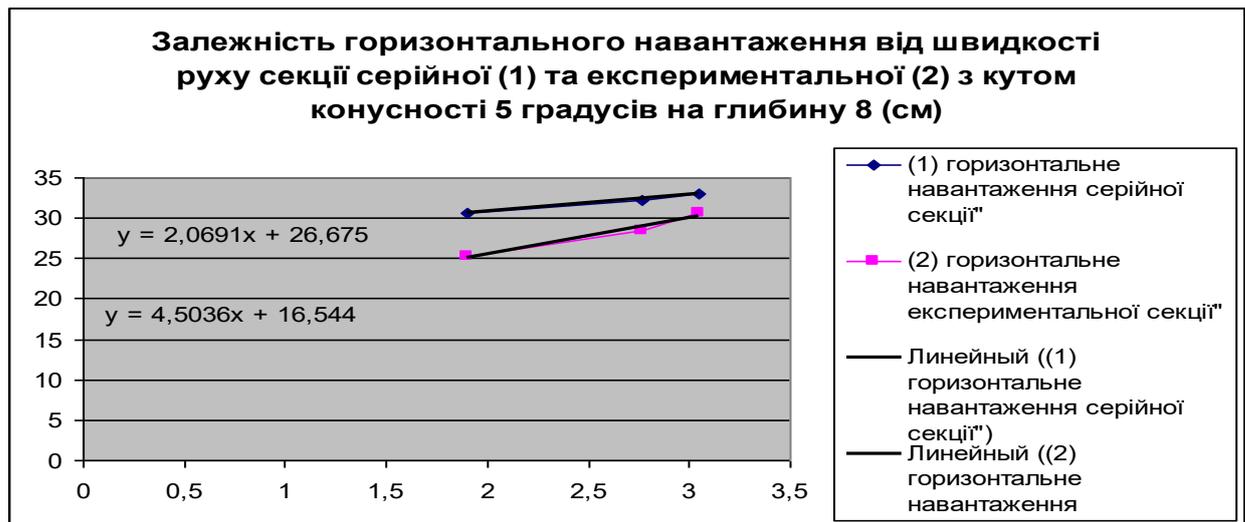


**Залежність горизонтального навантаження від швидкості руху секції серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 5 градусів на глибині 6 (см)**



**Залежність вертикального навантаження від швидкості руху секції серійної (1) та експериментальної (2) з кутом конусності 5 градусів на глибині 6 (см)**





Заглавия рисунков:

**Зависимость вертикального (горизонтального) нагружения от скорости движения секций серийной (1) и экспериментальной (2) с углом конусности 5, 7, 9 градусов на глубине 4, 6, 8 см**

Кривые:

- (1) – горизонтальное (вертикальное) нагружение серийной секции
- (2) – горизонтальное (вертикальное) нагружение экспериментальной секции

Линейный (1) горизонтальное (вертикальное) нагружение серийной секции

Линейный (2) горизонтальное (вертикальное) нагружение серийной секции

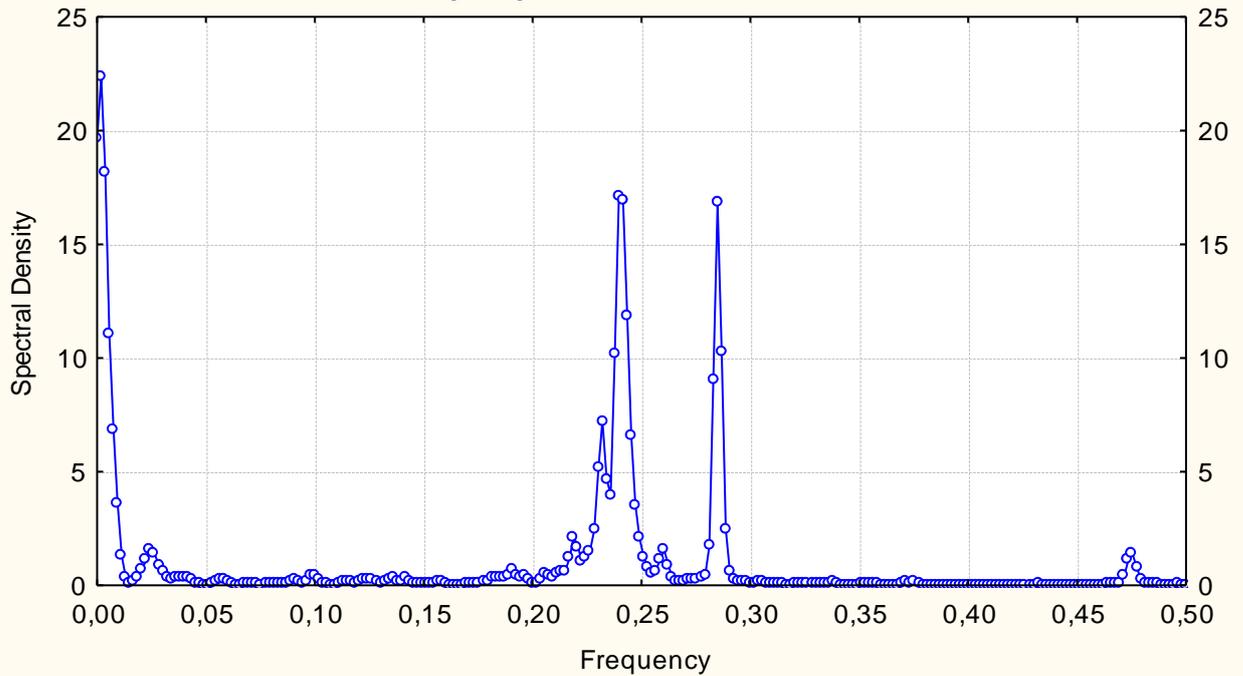
## Приложение В

Нормированная корреляционная функция и спектральная плотность  
тягового сопротивления экспериментальной секции при  
моделировании разных условий работы гольчатой борона

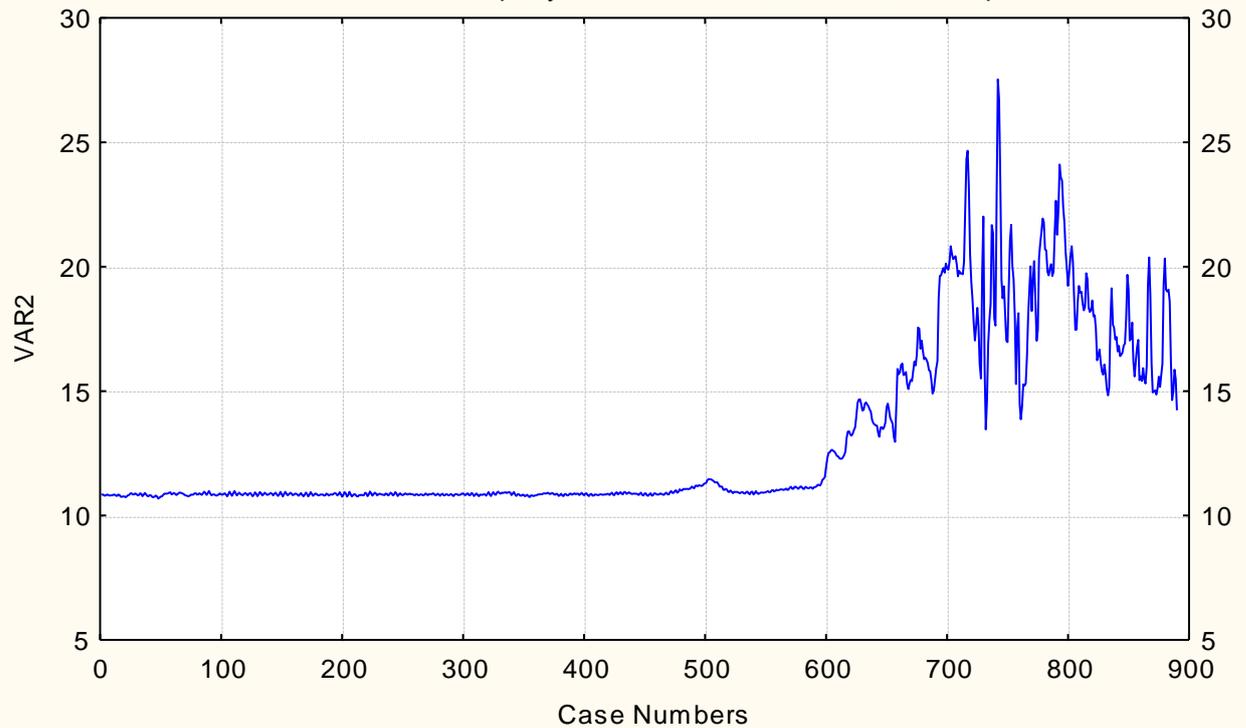
Spectral analysis: голка 9 градусів глибина 4 при швидкост 1,9 м/с вертикал

No. of cases: 530

Hamming weights: ,0357 ,2411 ,4464 ,2411 ,0357



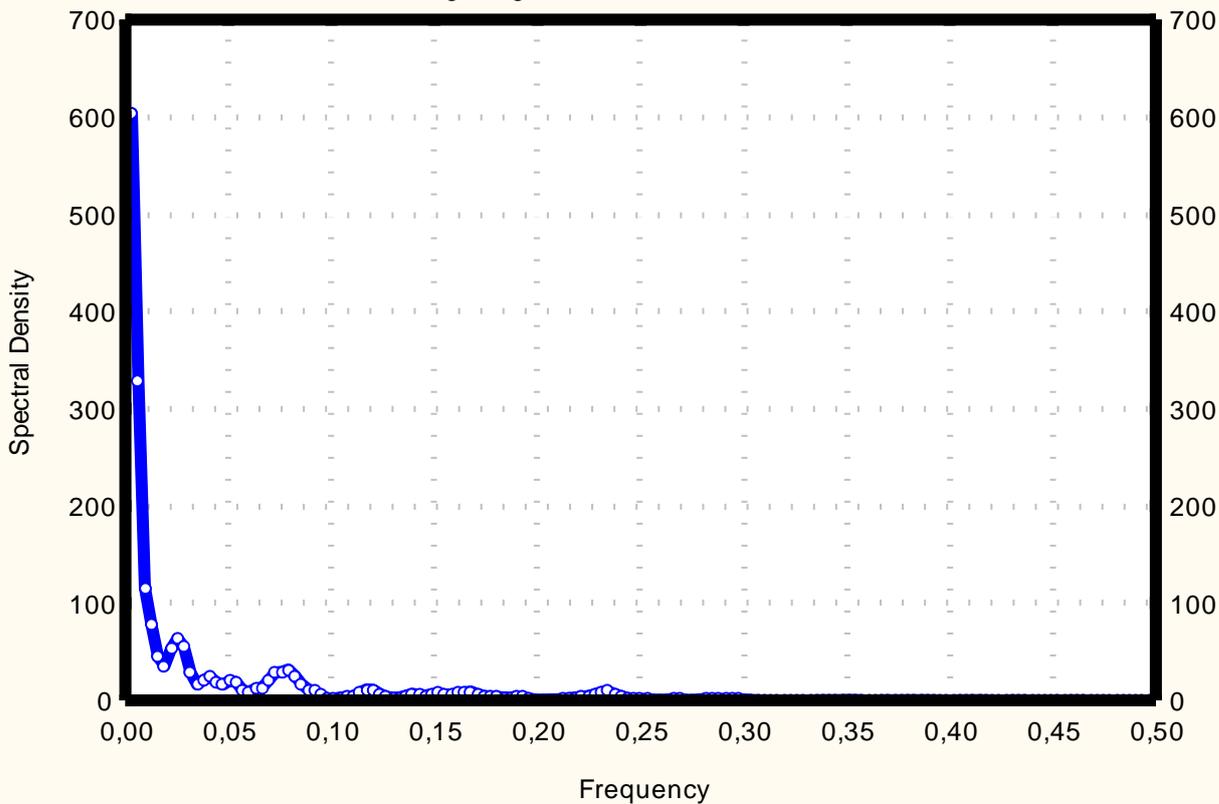
Plot of variable: голка 9 градусів глибина 4 швидкість 1,9 м/с горизонта



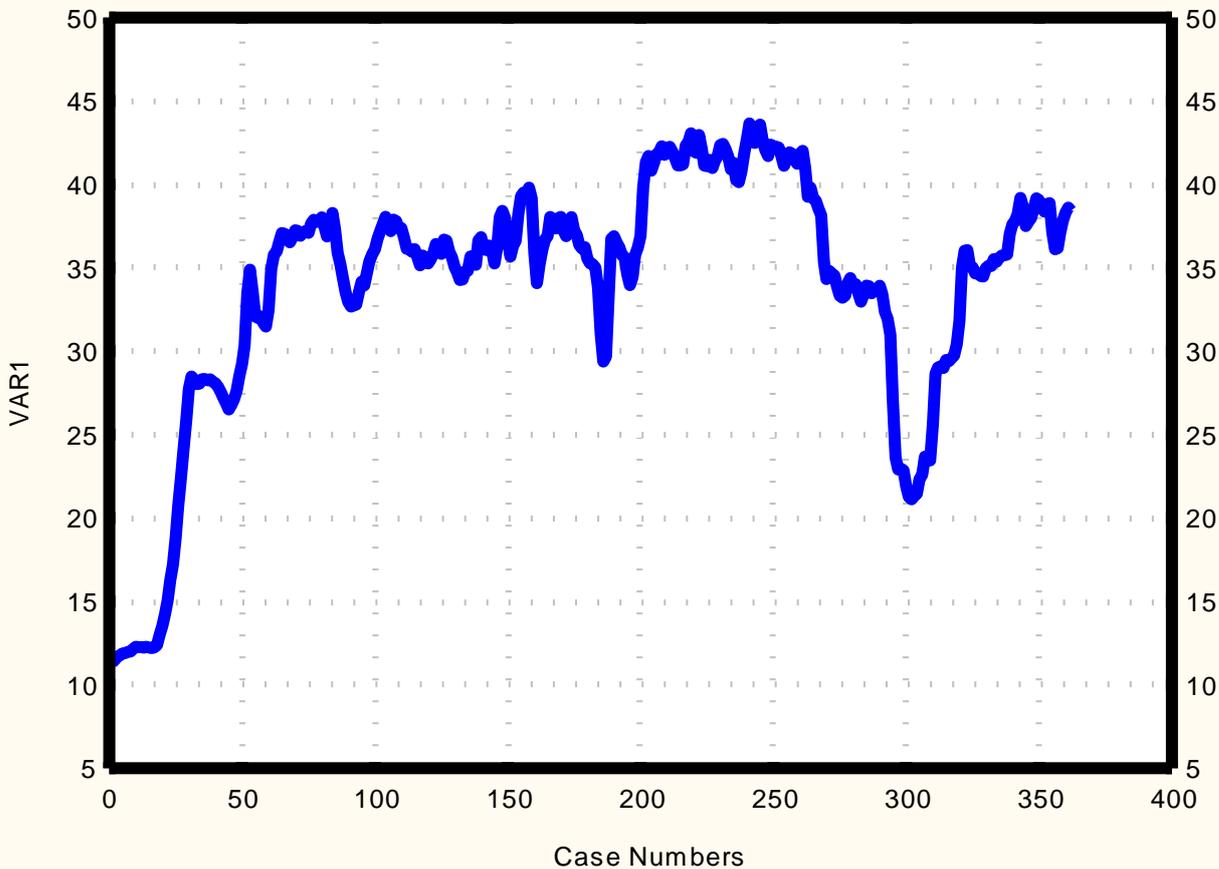
Spectral analysis: голка 9 градусів глибина 4 швидкість 1,9 м/с горизонталь

No. of cases: 316

Hamming weights: ,0357 ,2411 ,4464 ,2411 ,0357



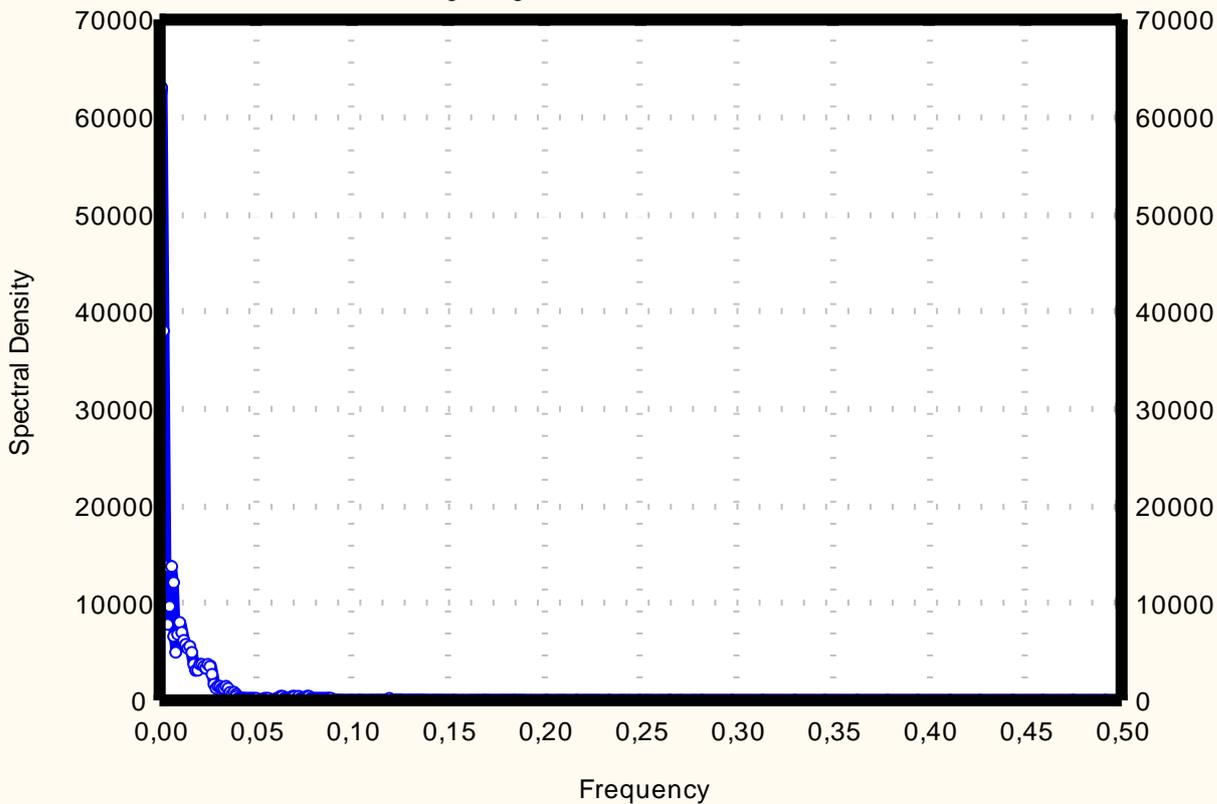
Plot of variable: 9 градусів глибина 6 см швидкіс 1,9 м/с горизонталь



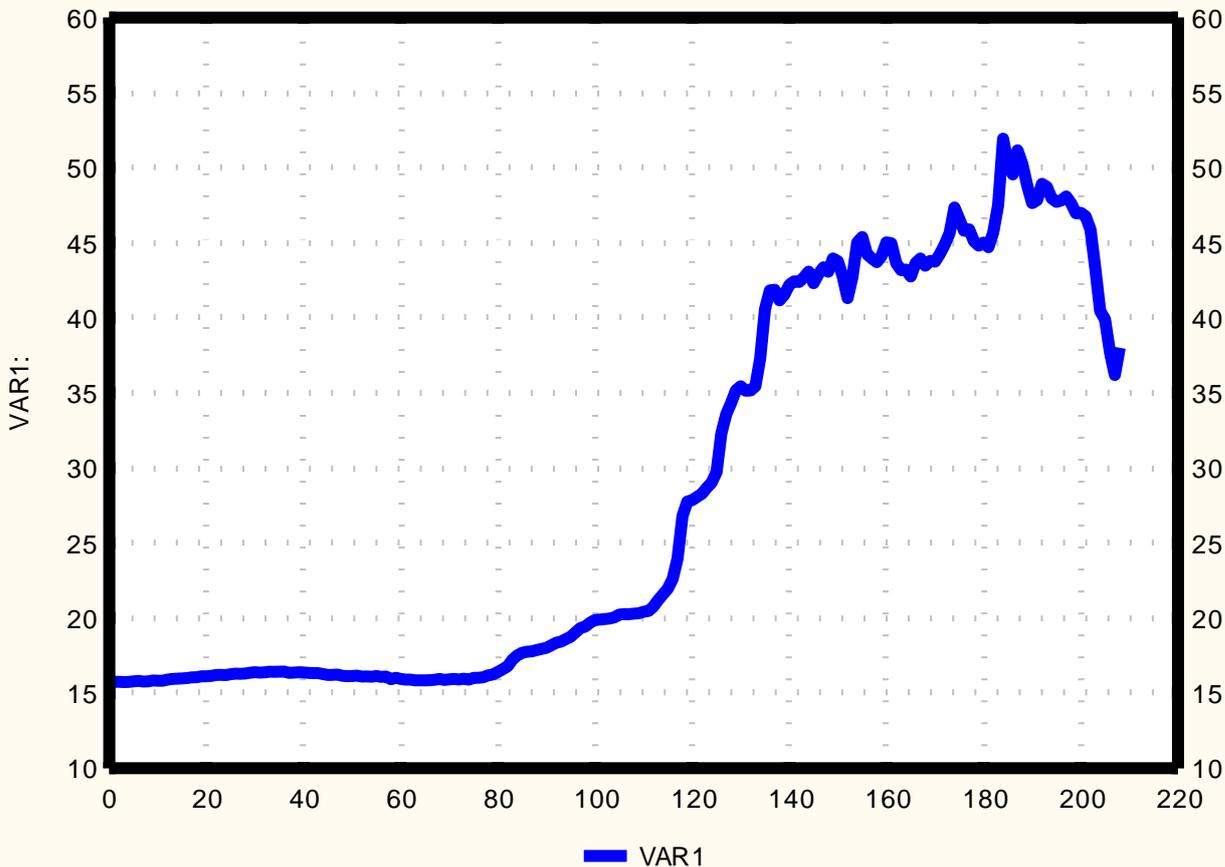
Spectral analysis: голка 9 градусів глибина 6 швидкість 1,9 вертикаль

No. of cases: 1016

Hamming weights: ,0357 ,2411 ,4464 ,2411 ,0357



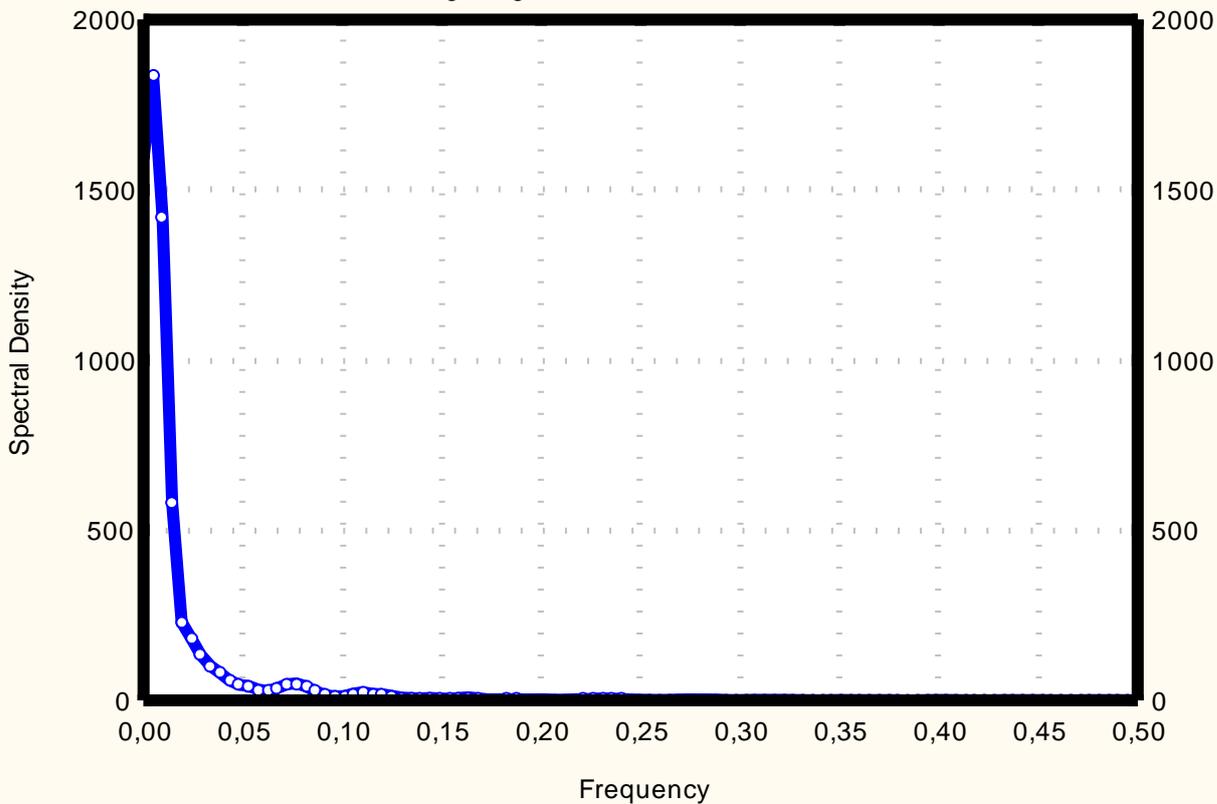
Plot голка 9 градусів глибина 8 швидкість 1,9 горизонт



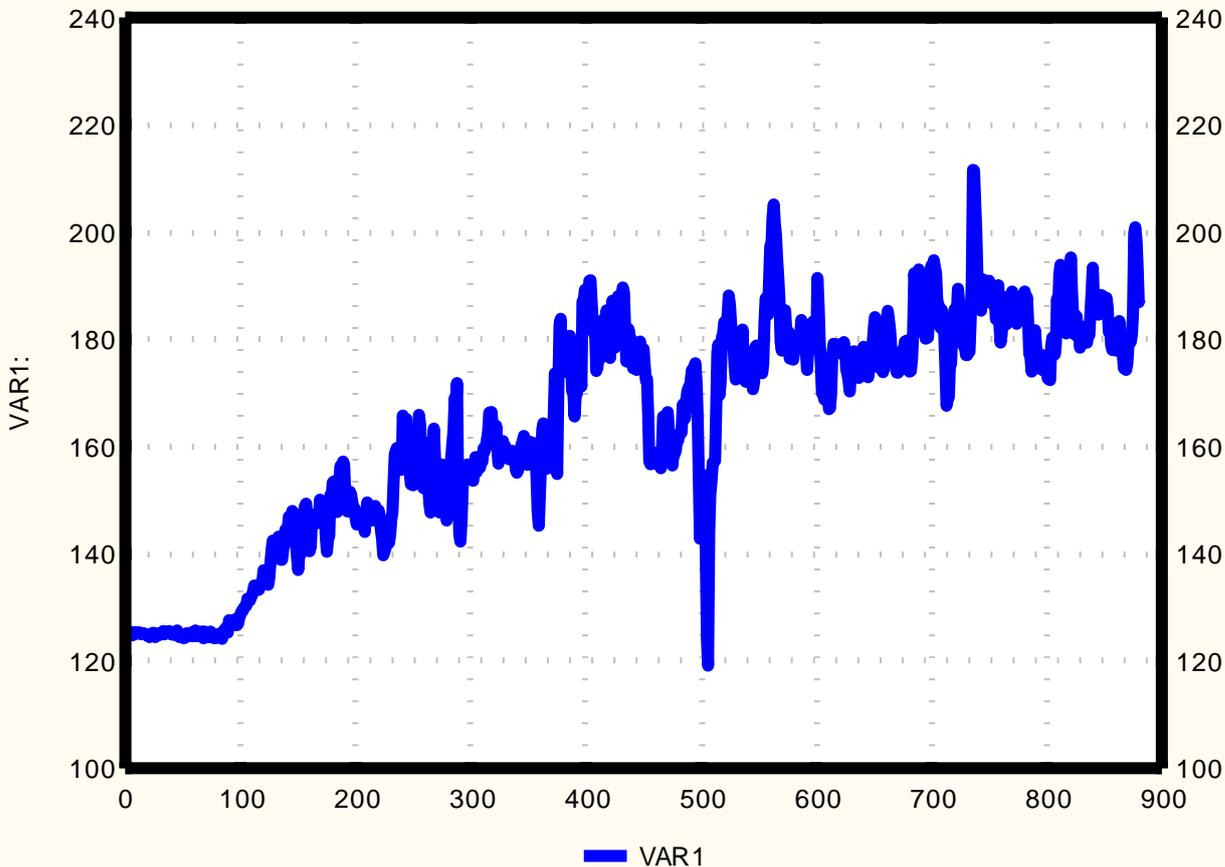
Spectral analysis: голка 9 градусів глибина 8 швидкість 1,9 горизонт

No. of cases: 208

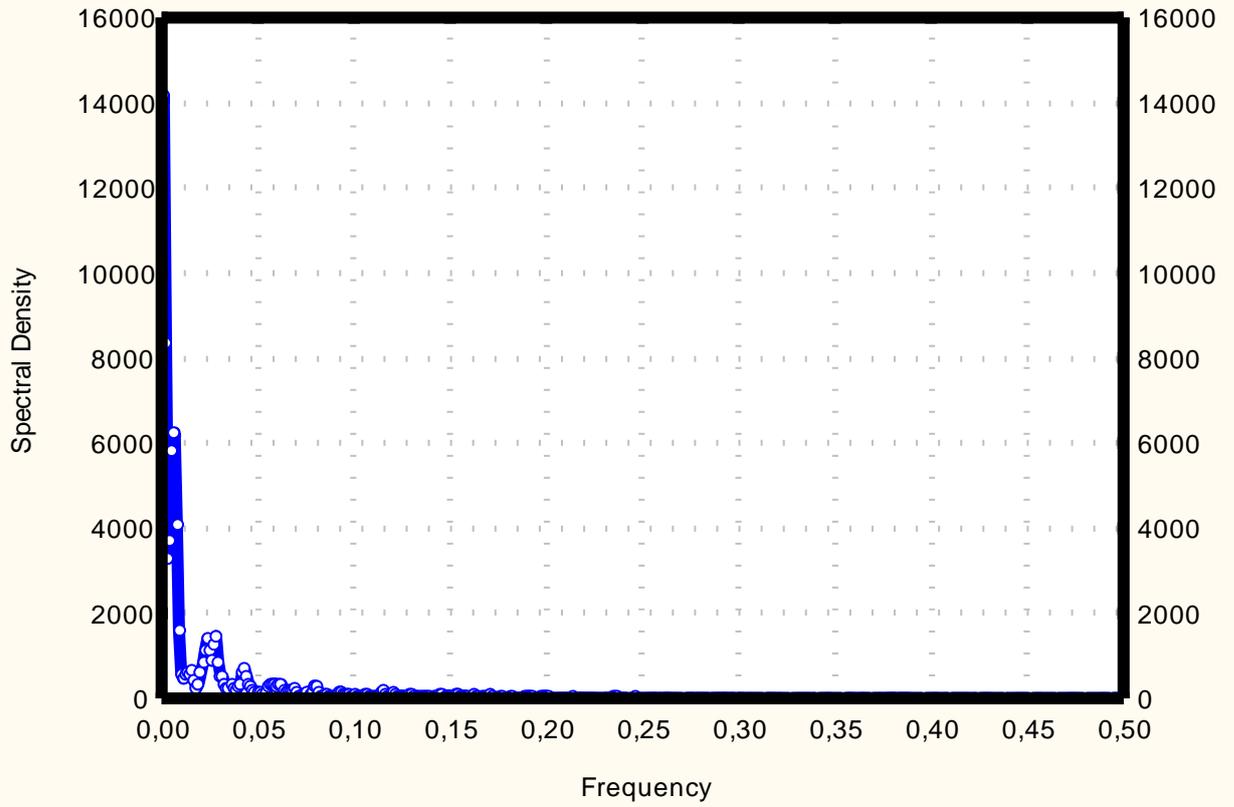
Hamming weights: ,0357 ,2411 ,4464 ,2411 ,0357



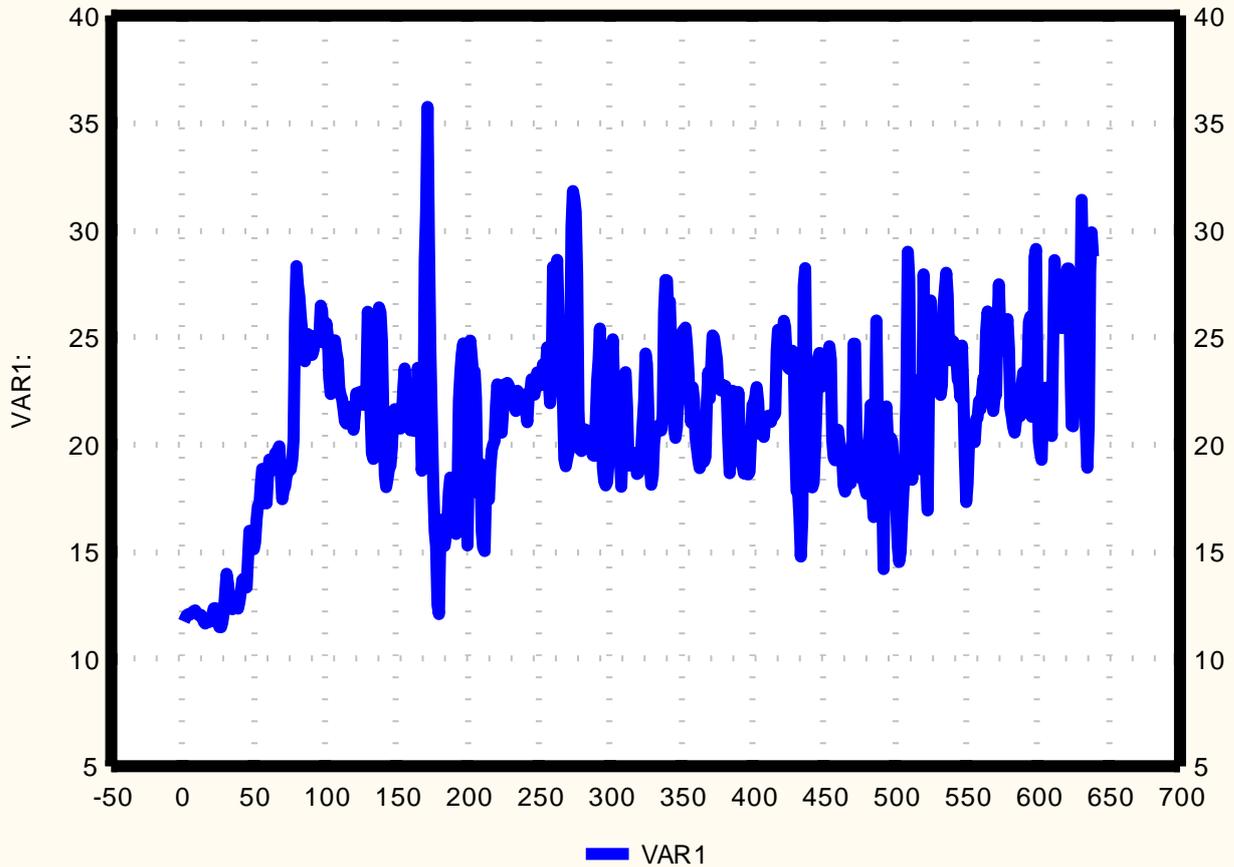
Plot голка 9 градусів глибина 8 швидкість 1,9м/с вертикаль

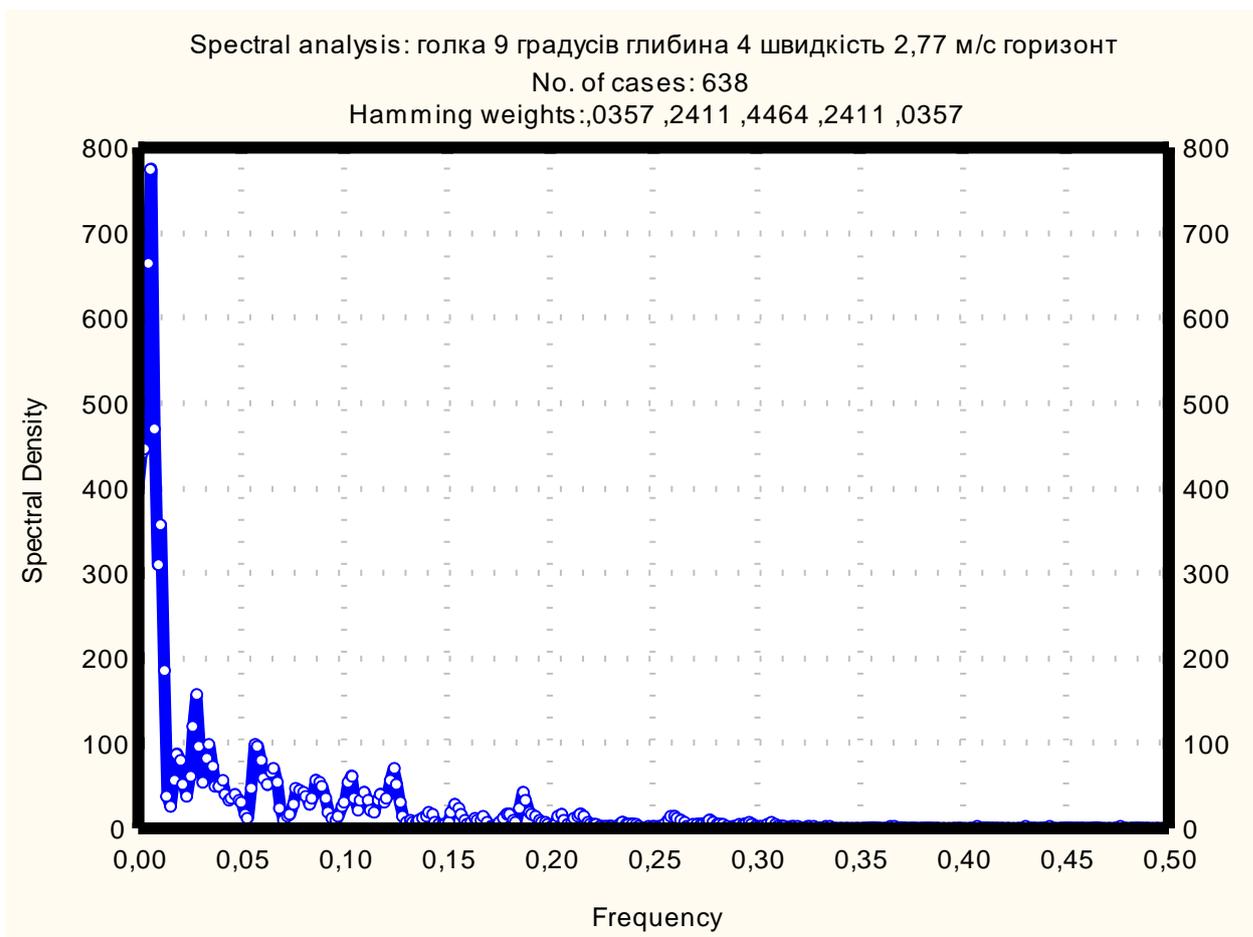


Spectral analysis: голка 9 градусів глибина 8 швидкість 1,9 вертикаль  
No. of cases: 882  
Hamming weights: ,0357 ,2411 ,4464 ,2411 ,0357



Plot голка 9 градусів глибина 4 швидкість 2,77 горизонт





)

## Приложение К

Таблица К1. Результаты исследований по определению коэффициента  $k_{п}$  проникновения иглы в почву

Но ме р оп ыт а	Твер дость почв ы, МПа	Глуби на прони кнове ния конус а (см) $\lambda_k$	Значени е угла конусно сти, $\alpha_k$	Значение $2tg\alpha_k$	Значен ие $G, H$	Значени е коэффи циента $k_I, \text{кг/с}^2$	Средне е значен ие коэффи циента $k_I, \text{кг/с}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,03	2	3	0,1048	300	260235	359631
	0,17	4	3	0,1048	700	303608	
	0,34	6	3	0,1048	1600	462642	
	0,55	8	3	0,1048	1900	412040	
2	0,025	2	3	0,1048	300	260236	333428
	0,11	4	3	0,1048	550	238550	
	0,3	6	3	0,1048	1500	433727	
	0,5	8	3	0,1048	1850	401197	
3	0,02	2	3	0,1048	250	216863	328909
	0,095	4	3	0,1048	600	260236	
	0,29	6	3	0,1048	1550	448184	
	0,48	8	3	0,1048	1800	390354	
4	0,025	2	3	0,1048	350	303609	343367
	0,12	4	3	0,1048	500	216836	
	0,3	6	3	0,1048	1450	419269	
	0,49	8	3	0,104816	2000	433727	

1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,03	2	5	0,175	400	207792	334415
	0,17	4	5	0,175	1300	337662	
	0,34	6	5	0,175	2100	363636	
	0,55	8	5	0,175	3300	428571	
2	0,025	2	5	0,175	450	233766	350108
	0,11	4	5	0,175	1400	363636	
	0,3	6	5	0,175	2200	380952	
	0,5	8	5	0,175	3250	422077	
3	0,02	2	5	0,175	500	259740	363636
	0,095	4	5	0,175	1300	337662	
	0,29	6	5	0,175	2400	415584	
	0,48	8	5	0,175	3400	441558	
4	0,025	2	5	0,175	450	233766	369047
	0,12	4	5	0,175	1500	389610	
	0,3	6	5	0,175	2600	450216	
	0,49	8	5	0,175	3100	402597	
1	0,03	2	7	0,2456	550	203583	273757
	0,17	4	7	0,2456	1500	277613	
	0,34	6	7	0,2456	2500	308459	
	0,55	8	7	0,2456	3300	305374	
2	0,025	2	7	0,2456	570	210986	269670
	0,11	4	7	0,2456	1430	264657	
	0,3	6	7	0,2456	2300	283782	
	0,5	8	7	0,2456	3450	319255	
3	0,02	2	7	0,2456	500	185075	267253
	0,095	4	7	0,2456	1350	250055	
	0,29	6	7	0,2456	2550	314628	
	0,48	8	7	0,2456	3450	319255	

1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,025	2	7	0,2456	590	218389	285170
	0,12	4	7	0,2456	1500	277613	
	0,3	6	7	0,2456	2600	320797	
	0,49	8	7	0,2456	3500	323882	
1	0,03	2	9	0,3168	500	148480	187176
	0,17	4	9	0,3168	1000	143480	
	0,34	6	9	0,3168	2300	220003	
	0,55	8	9	0,3168	3300	236742	
2	0,025	2	9	0,3168	600	172176	214921
	0,11	4	9	0,3168	1400	200872	
	0,3	6	9	0,3168	2500	239133	
	0,5	8	9	0,3168	3450	247503	
3	0,02	2	9	0,3168	750	215220	243318
	0,095	4	9	0,3168	1800	258264	
	0,29	6	9	0,3168	2600	248699	
	0,48	8	9	0,3168	3500	251090	
4	0,025	2	9	0,3168	950	272612	271416
	0,12	4	9	0,3168	2000	286960	
	0,3	6	9	0,3168	2800	267829	
	0,49	8	9	0,3168	3600	258264	

## АННОТАЦИЯ АВТОРЫ

Шейченко Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, кафедра технологии и средства механизации аграрного производства, Полтавская государственная аграрная академия.

Хайлис Гедадь Абрамович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов машин и оборудования агропромышленного производства, Уманский национальный университет садоводства

Шевчук Виталий Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры процессов машин и оборудования агропромышленного производства, Уманский национальный университет садоводства

Дудников Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры отраслевого машиностроения, декан инженерно - технологического факультета, Полтавская государственная аграрная академия

Пушка Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, декан инженерно - технологического факультета, Уманский национальный университет садоводства