

На правах рукописи

Садовников Михаил Алексеевич

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ
ДЛЯ РЕЗАНИЯ ОЧИЩЕННОЙ МЯКОТИ ПЛОДОВ
БАХЧЕВЫХ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НА ЦУКАТЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: Шапров Михаил Николаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Борисенко Иван Борисович
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет», заведующий научно-исследовательской лаборатории «Инновационные технологии и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур»

Нелепов Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, ГНУ Поволжский НИИ производства и переработки мясомолочной продукции Россельхозакадемии, заведующий отделом по хранению и переработке продукции животноводства

Ведущая организация: ГНУ Нижне-Волжский НИИ сельского хозяйства (НВ НИИСХ) Россельхозакадемии

Защита диссертации состоится 29 декабря 2012 года в 10 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д220.008.02 при ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет» по адресу: 400002, г. Волгоград, пр-т Университетский, 26, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан «28» ноября 2012 года и размещен на официальных интернет-сайтах ВАК РФ и ВолГАУ.

Ученый секретарь
диссертационного совета, профессор

А.И. Ряднов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. При современном уровне развития сельскохозяйственной и перерабатывающей техники исключить ручной труд при переработке таких культур как бахчевые полностью невозможно. Это связано со специфическими свойствами плодов. Так, существующие технологии уборки и переработки бахчевых культур включают операции традиционно выполняемые полностью или частично вручную.

Одним из главных факторов, сдерживающих использование плодов бахчевых культур в пищевой промышленности, является высокая трудоёмкость послеуборочной переработки с целью получения очищенной мякоти и продуктов из неё.

Для решения указанной проблемы необходимо на основе анализа особенностей биологических и физико-механических свойств бахчевых культур обосновать рациональную технологию и разработать технические средства для механизации процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур, которые полностью соответствуют всем требованиям процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых при переработке на цукаты.

Степень разработанности темы. Существующая технология резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур в основном основана на применении ручного труда, в связи с тем, что применяемые конструктивно – технологические решения машин для резания не обеспечивают при переработке бахчевых эффективной и качественной работы.

Цель исследования - создание средств механизации для технологического процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур и повышение эффективности этого процесса за счёт применения в качестве рабочего органа режущего барабана в виде ножевой решетки, позволяющего обеспечить максимальное качество резания и снизить потери съедобной мякоти.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ способов и устройств для резания мякоти овощебахчевых культур.
2. Определить физико-механические свойства мякоти плодов бахчевых, необходимые для обоснования параметров машины для резания мякоти.
3. Разработать принципиальную схему устройства, теоретически и экспериментально обосновать его конструктивные и кинематические параметры.

4. Разработать математическую модель процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых.

5. Обосновать экономическую целесообразность внедрения предлагаемого технического решения.

Объект исследования. Технологический процесс резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур при переработке на цукаты с применением вращающегося ножевого барабана в виде ножевой решетки.

Предмет исследования. Закономерности процессов взаимодействия рабочего органа с мякотью плодов бахчевых культур, влияние его конструктивно-технологических параметров на качество работы.

Научная новизна работы

1. Разработана принципиальная схема машины для резания очищенной мякоти плодов бахчевых, обоснованы её основные кинематические и конструктивные параметры.

2. Определены физико-механические свойства мякоти плодов бахчевых, необходимые для определения параметров машины для резания мякоти.

3. Разработана математическая модель процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых.

Новизна технических решений подтверждена патентом на изобретение.

Теоретическая и практическая значимость работы. Изготовлен опытный образец машины для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур. Установлены аналитические зависимости по определению оптимальных конструктивных параметров рабочего органа. Проведены экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях. Разработана адекватная математическая модель процесса стесненного резания очищенной мякоти плодов бахчевых. Даны рекомендации по переработке мякоти плодов бахчевых культур.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием положений и методов классической механики. Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных и частных методик проведения экспериментов и метода планирования эксперимента. Полученные экспериментальные данные обработаны методами математической статистики на ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованный процесс подготовки мякоти плодов бахчевых культур к переработке на цукаты.

2. Конструкция машины для резания очищенной мякоти бахчевых культур, защищенная патентом РФ на изобретение № 2426463.

3. Аналитические зависимости, определяющие конструктивные и кинематические параметры машины для резания.

4. Математическая модель, описывающая процесс работы машины для резания очищенной мякоти.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований разработанной конструкции машины для резания.

6. Техничко-экономическая оценка эффективности использования разработанной конструкции машины для резания.

Степень достоверности и апробация результатов. По материалам исследований опубликовано 13 печатных работ, три из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент РФ на изобретение. Общий объем опубликованных работ составляет 4,05 печ. л., из них 1,8 печ. л. принадлежит автору.

Основные результаты исследований по работе докладывались на научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО «Волгоградский ГАУ» (2008...2012гг.), региональных конференциях молодых исследователей Волгоградской области (2010...2012гг.), программе «У.М.Н.И.К.» 2012 г., на научном семинаре инженерных факультетов ВолГАУ 2012 г.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и представлена общая характеристика работы.

В первой главе «Состояние механизации переработки плодов бахчевых культур» отмечены основные направления использования мякоти бахчевых. На основе материалов, изложенных в работах В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, Г.И. Бремера, И.И. Капустина, Н.Е. Резника, А.Н. Даурского, Ю.А. Мачихина, М.Я. Дикиса, А.Н. Мальского, А.Г. Бареяна, И.А. Долгова, А.Н. Цепляева, М.Н. Шапрова, П.М. Овчарова и других ученых, проведен обзор теоретических исследований резания пищевого сырья и приведены общие требования к этому процессу, а также выделены серийно выпускаемые и оригинальные машины и устройства для резания и измельчения плодов овощебахчевых культур. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

В выводах первой главы отмечается, что для обеспечения выполнения требований, предъявляемых к полуфабрикатам из мякоти бахчевых при переработке её на цукаты, необходим рабочий орган, позволяющий получать кусочки правильной формы без трещин, например, барабан в виде ножевой решетки.

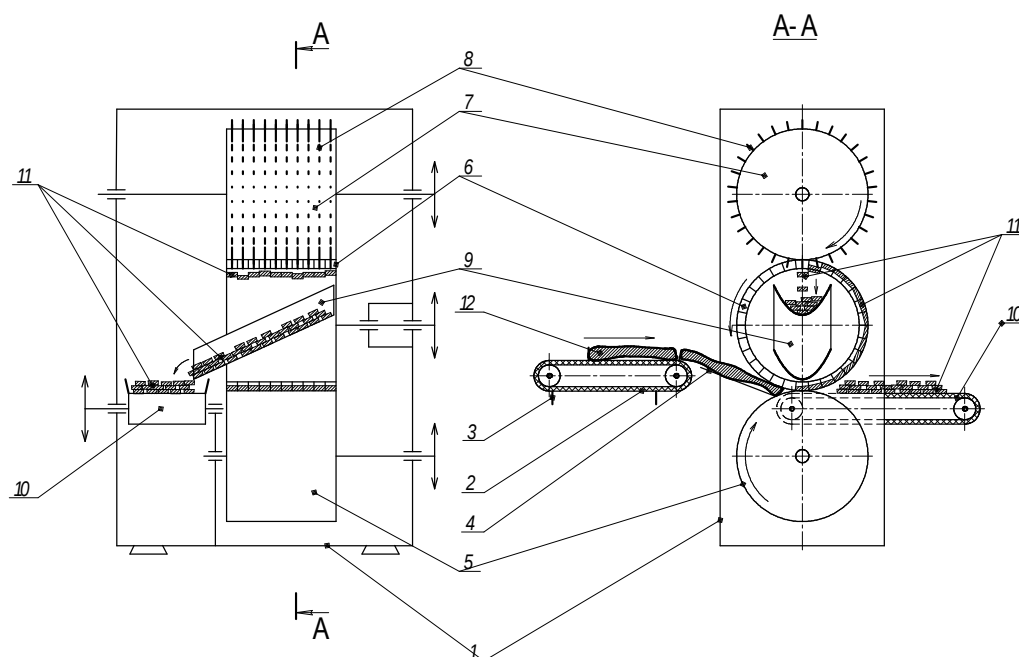
Во второй главе «Аналитическое исследование процесса стесненного резания очищенной мякоти плодов бахчевых вращающимся ножевым барабаном в виде ножевой решетки» представлена технологическая схема машины для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур при переработке на цукаты, получены аналитические зависимости основных кинематических, конструкторских и силовых параметров рабочего органа этой машины.

Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур (рисунок 1) состоит из рамы 1, установленных на ней загрузочно-го бункера (не показан), питающего транспортера 2 с упорными планками 3, лотка 4, опорного вальца 5, режущего барабана 6, игольчатого вальца 7 с иглами 8, желоба 9 и транспортера 10 для отвода кусочков продукта.

Режущий барабан 6 выполнен в виде ножевой решетки, что позволяет осуществлять резание в продольной и поперечной плоскости, обеспечивая получение кусочков 11 заданной геометрической формы и размеров. Желоб 9 для отвода кусочков 11 готового продукта установлен внутри режущего барабана 6. Оси вращения опорного вальца 5, режущего барабана 6, игольчатого вальца 7 выполнены параллельными. Поверхность опорного вальца 5 выполнена обрешеченной, а иглы 8 игольчатого вальца 7 – эластичными. Питающий транспортер 2, опорный валец 5, игольчатый валец 7 соединены синхронизирующей передачей и имеют одно направление вращения, а режущий барабан 6 – встречное. Привод всех вращающихся частей электрический с частотными преобразователями для бесступенчатого изменения скорости.

Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур, работает следующим образом. Предварительно очищенные от семян и коры, разрезанные по длине под средний размер куски 12 мякоти плодов бахчевых культур из бункера по питающему транспортеру 2 и лотку 4 поступают в пространство между вращающимися опорным вальцом 5 и режущим барабаном 6, принудительно подаются упорными планками 3 и захватываются опорным вальцом 5 и режущим барабаном 6. Опорный валец 5 прижимает кусок 12 к ножевой решетке режущего барабана 6, которая разрезает его на кусочки 11 заданной геометрической формы и размеров.

Кусочки 11 перемещаются вместе с ножевой решеткой режущего барабана 6 в направлении игольчатого вальца 7, который выталкивает иглами 8 кусочки 11 на поверхность желоба 9. Перемещаясь по поверхности желоба 9, кусочки 11 попадают на транспортер 10 для отвода кусочков продукта и удаляются из машины.



- 1 - рама, 2 – питающий транспортер, 3 – упорные планки, 4 – лоток,
 5 – опорный валец, 6 – режущий барабан, 7 – игольчатый валец,
 8 – иглы, 9 – желоб, 10 – транспортер для отвода кусочков,
 11 – кусочки, 12 – куски мякоти

Рисунок 1 – Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур

Рабочее движение лезвий ножей барабана данной машины представляет собой криволинейную поверхность, в сечении имеющую форму части петли циклоиды. Это обусловлено тем обстоятельством, что в процессе резания ножи не только внедряются в материал, но и протаскивают его, описывая при этом окружность вокруг оси барабана, ребром которого они являются.

В процессе резания угол внедрения лезвий ножей все время меняется относительно поверхности разреза, вследствие чего фаски лезвия вместе с необходимым резанием производят смятие материала, расходуя на это энергию.

Рассмотрим такие элементы кинематики ножевого барабана, как абсолютная траектория его ножей, их относительная траектория в перерезаемом материале, зависимость скорости резания от геометрических и кинематических параметров.

Ножи 1 (рисунок 2) ножевого барабана и опорный валец 2 при вращении со скоростью ω захватывают ломоть мякоти 3, затем сжимают и протягивают его, при этом одновременно ножи внедряются в мякоть и разрезают ее, используя в качестве опоры поверхность вальца 2. Продолжая вращаться, ножи удерживают отрезанные кусоч-

ки внутри ячейки ножевой решетки. Абсолютная траектория движения кромки лезвия в координатах x - y может быть представлена уравнением окружности:

$$x^2 + [y - R]^2 = R^2, \quad (1)$$

где R – радиус ножа по лезвиям.

Кромка лезвия ножа 1, вращаясь по окружности радиуса R с угловой скоростью ω , имеет окружную скорость $v_{окр}$. Эта скорость может быть разложена на составляющие v_x и v_y :

$$v_{окр y} = v_{окр} \cdot \sin \varphi_0; \quad (2)$$

$$v_{окр x} = v_{окр} \cdot \cos \varphi_0, \quad (3)$$

где φ_0 – угол поворота ножа от момента соприкосновения лезвия с мякотью до момента, когда нож вертикальное положение.

Траектория ножей в слое мякоти представляет собой циклоиду (рисунок 2), уравнение которой для ножа в параметрической форме в неподвижных осях координат Ox и Oy будет:

$$\begin{aligned} x &= R \cdot \sin(\varphi_0 - \omega t) - r \cdot \omega t \\ y &= r - R \cdot \cos(\varphi_0 - \omega t), \end{aligned} \quad (4)$$

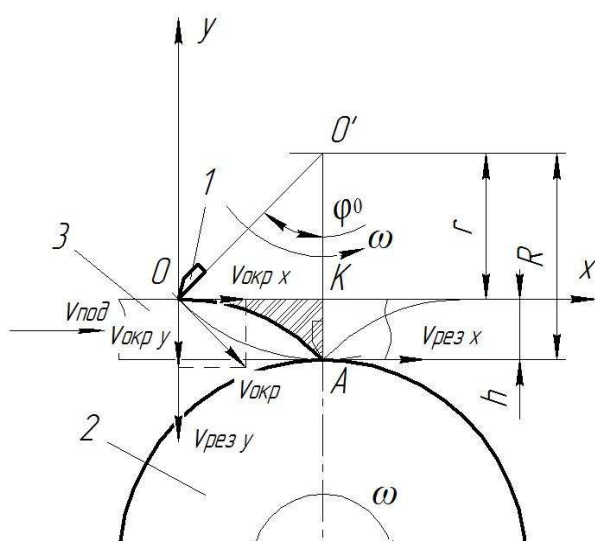
где t – время, за которое барабан повернулся на угол ωt , $r = R - h$, h – толщина разрезаемого слоя.

Скорость перемещения кромки лезвия в материале является скоростью резания $v_{рез}$. Направление скорости $v_{рез}$ совпадает с направлением разреза материала и определяется касательной к траектории движения кромки.

По величине скорость $v_{рез}$ равна производной пути по времени, т.е.

$$v_{рез} = \frac{ds}{dt} = \sqrt{v_{рез x}^2 + v_{рез y}^2}, \quad (5)$$

где $v_{рез x} = R \cdot \omega \cdot \cos(\varphi_0 - \omega t) - r \cdot \omega$; $v_{рез y} = -R \cdot \omega \cdot \sin(\varphi_0 - \omega t)$.



1 – ножи, 2 – опорный валец,
3 – мякоть

Рисунок 2 – Схема к анализу работы машины для резания очищенной мякоти

Выражение (5) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} v_{рез} &= \omega \sqrt{R^2 - 2r \left(r \cos \omega t + \sqrt{R^2 - r^2} \sin \omega t \right) + r^2} = \\ &= \omega \sqrt{R^2 - r^2 \left(2 \cos \omega t + \frac{2\sqrt{R^2 - r^2} \sin \omega t}{r} + 1 \right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Данное выражение показывает, что с увеличением угловой скорости ω , радиуса R окружности по лезвиям ножа, толщины h разрезаемой мякоти скорость $v_{рез}$ увеличивается. Эта скорость меняется вместе с углом поворота ножа ωt . Угол ωt изменяет свое значение с нуля в момент соприкосновения кромки лезвия с материалом в точке O до φ_0 , в момент конца резания в точке A . Максимальное значение $v_{рез}$ будет при $\varphi_0=0$:

$$v_{рез\ max} = \omega \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (7)$$

Минимальное значение скорости резания будет при $\omega t = \varphi_0$. При этом выражение (6) примет вид

$$v_{рез\ min} = \omega(R - r). \quad (8)$$

Анализ уравнений показывает, что составляющая скорости резания $v_{рез\ x}$ не зависит от диаметра барабана и направлена вдоль перерезаемого слоя, способствуя его сжатию. В точке A горизонтальная составляющая скорости резания достигает максимальной величины. Увеличение вертикальной составляющей скорости $v_{рез}$ резания может быть достигнуто за счет увеличения: угловой скорости ω , радиуса R барабана, толщины h перерезаемого слоя мякоти.

Качество резания мякоти в значительной мере зависит от скорости ее подачи $v_{под}$. Анализируя работу машины для резания можно увидеть, что если скорость подачи значительно меньше составляющей $v_{окр\ x}$, т.е. $\lambda \gg 1$, то возможен отрыв кусочков мякоти от ломтя ножами. Однако, если $\lambda \ll 1$, то технологический процесс будет протекать ненормально, так как подаваемая мякоть будет упираться в грани ножа, что приведет к дополнительному ее сжатию и отклонению от направления подачи. Казалось бы, наилучшее качество резания будет при равенстве скорости подачи и составляющей $v_{окр\ x}$, т.е. $\lambda = 1$, но при этом траектория ножей в мякоти будет представлять кривую OA (см. рисунок 1), а объем мякоти заключенный в сечении в область OAK будет теряться из-за смятия.

Для того, чтобы не происходила значительная потеря мякоти необходима такая траектория ножа в материале, которая была бы наиболее близка к прямой параллельной оси Oy . Этого можно добиться при $\lambda > 1$. При этом траектория ножа в мякоти будет представлять часть OA петли укороченной циклоиды (рисунок 3).

Путь пройденный машиной за один оборот барабана можно определить как

$$s_0 = \frac{v_{\text{под}} \cdot 2\pi}{\omega} = \frac{2\pi R}{\lambda}. \quad (9)$$

Зная число ножей n по окружности барабана, находим значение шага барабана

$$s_x = \frac{s_0}{n} = \frac{2\pi}{n\lambda} \cdot R. \quad (10)$$

Определим максимальную толщину ломтя мякоти, который можно разрезать. При выполнении условия $\lambda > 1$ горизонтальная составляющая скорости постоянно будет уменьшаться и при некотором угле $\varphi_A = \omega t_A$ (рисунок 4) поворота барабана станет равной нулю, а потом приобретет обратный знак.

Определим угол φ_A , соответствующий точке A , имеющей горизонтальную составляющую скорости равную нулю:

$$v_M - R\omega \sin \varphi_A = 0. \quad (11)$$

Откуда

$$\sin \varphi_A = \frac{v_M}{R\omega} = \frac{1}{\lambda}. \quad (12)$$

Таким образом, точка A , является точкой начала резания. Точкой конца резания является точка B , в которой нож займет нижнее свое положение.

Из рисунка 4 очевидно, что

$$\begin{aligned} h_{\max} &= OC_0 - R \sin \varphi_A = \\ &= R - \frac{R}{\lambda} = R \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Определим величину максимальной деформации Δx разрезаемого

куска мякоти. Отметив находящиеся на циклоиде (рисунок 4) наиболее удаленные точки A и B начала и конца резания, получаем

$$\Delta x = x_A - x_B. \quad (14)$$

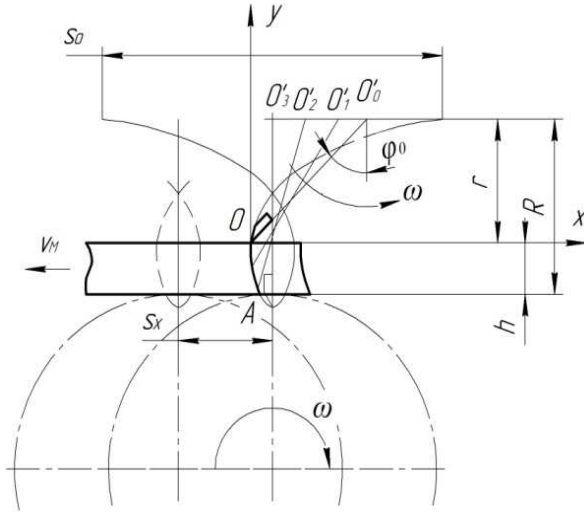


Рисунок 3 – Траектория движения ножей в материале при $\lambda > 1$

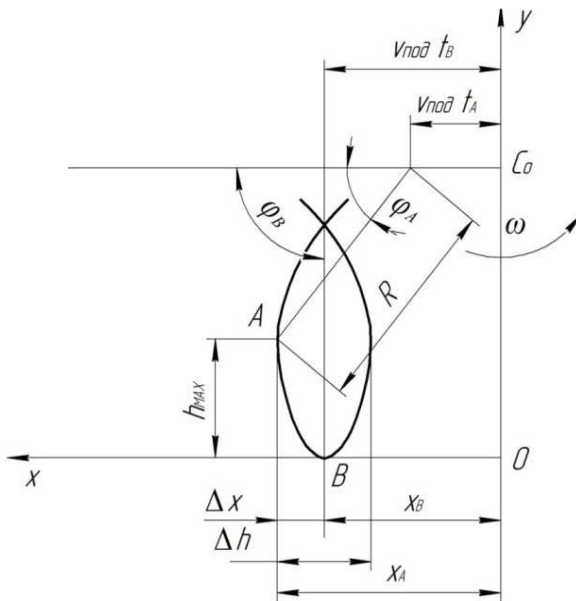


Рисунок 4 – Схема к определению максимальной толщины максимальной деформации куска

С учетом того, что

$$x_A = v_m t_A + R \cos \omega t_A, x_B = v_m t_B, \varphi_A = \omega t_A, \sin \varphi_A = \frac{1}{\lambda}, t_A = \frac{\arcsin \frac{1}{\lambda}}{\omega}, \varphi_B = \frac{\pi}{2} = \omega t_B, t_B = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\varphi_B}{\omega} \quad \text{получаем}$$

$$\Delta x = \frac{R}{\lambda} \left(\arcsin \frac{1}{\lambda} + \sqrt{\lambda^2 - 1} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (15)$$

В соответствии с рисунком 4, максимальная ширина петли циклоиды составляет

$$\Delta h = 2 \cdot \Delta x = \frac{2R}{\lambda} \left(\arcsin \frac{1}{\lambda} + \sqrt{\lambda^2 - 1} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (16)$$

Выразим из выражений (13) и (15) величину R

$$R = \frac{h_{max}}{1 - \frac{1}{\lambda}} = \frac{\Delta x \cdot \lambda}{\arcsin \frac{1}{\lambda} + \sqrt{\lambda^2 - 1} - \frac{\pi}{2}}. \quad (17)$$

После преобразований получим зависимость величины деформации Δx от толщины куска разрезаемой мякоти h_{max} и отношения λ :

$$\Delta x = h_{max} \frac{\arcsin \frac{1}{\lambda} + \sqrt{\lambda^2 - 1} - \frac{\pi}{2}}{\lambda - 1}. \quad (18)$$

Уравнение (18) относительно h_{max} и λ было решено с использованием пакета MS Excel, при различных значениях h_{max} и λ . По полученным данным были построены графические зависимости деформации Δx (рисунок 5) и радиуса R (рисунок 6) от отношения скоростей λ .

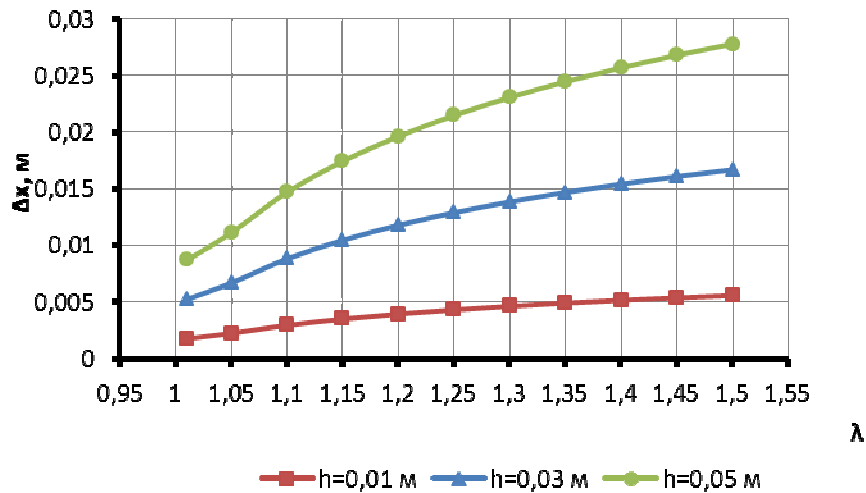


Рисунок 5 – Зависимость величины деформации Δx от отношения скоростей λ

Передний угол γ и угол заточки ε ножа лежат в плоскости, перпендикулярной к плоскости резания, и находятся в следующей взаимосвязи:

$$\vartheta = \gamma + \varepsilon, \quad (19)$$

где ϑ - угол резания.

Как видно из рисунка 7, передний угол оказывает существенное влияние на технологический процесс. Наиболее рациональным в нашем случае будет использование ножа с односторонней заточкой со скосом задней кромки, т.к. снижается деформация смятия разрезаемого материала передней кромкой.

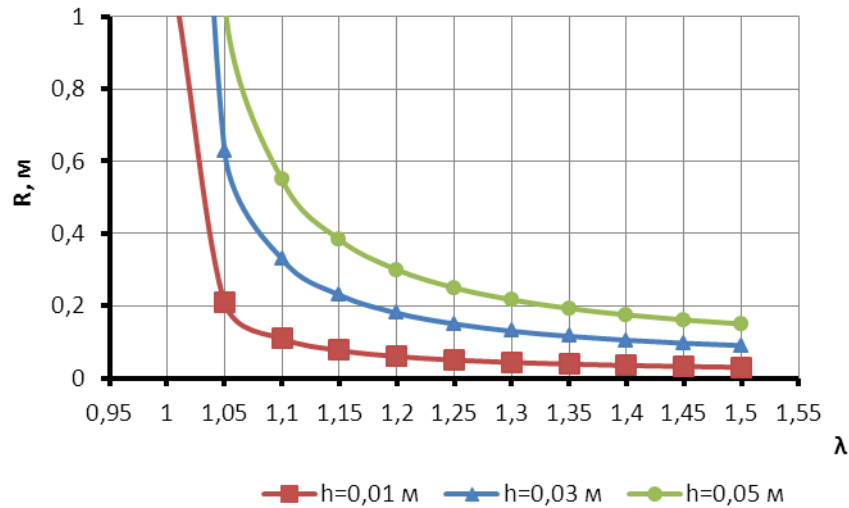
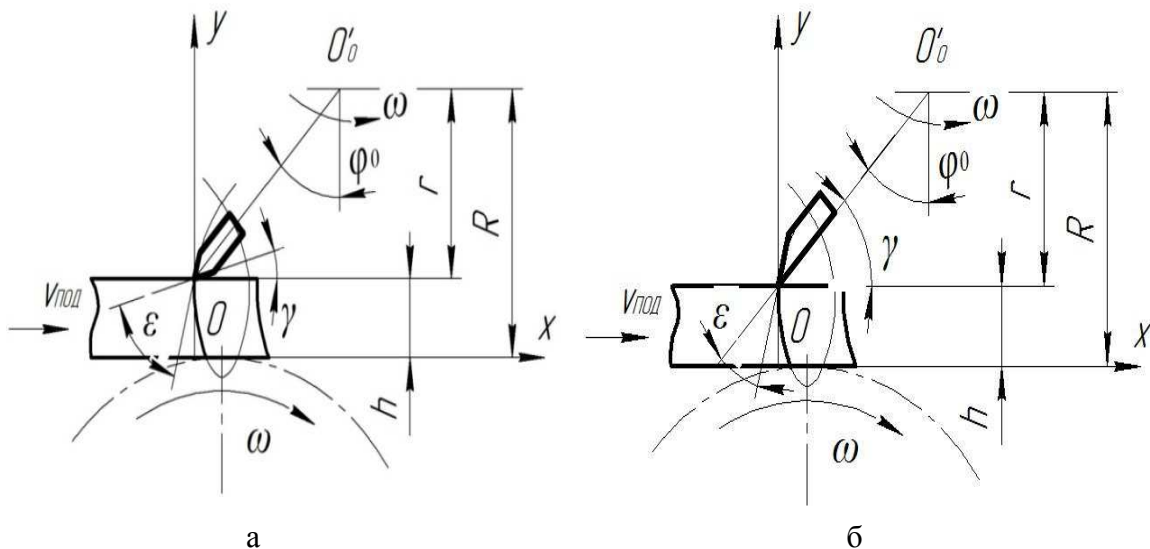


Рисунок 6 – Зависимость величины радиуса R от отношения скоростей λ

Угол заточки существенно влияет на энергоемкость процесса резания, поэтому было бы целесообразным угол ϵ делать наименьшим, вплоть до нулевого. Однако, при этом снижается прочность лезвия и уменьшение угла заточки лимитируется эксплуатационной надежностью лезвия.



а – нож с двусторонней заточкой; б – нож с односторонней заточкой со скосом задней кромки

Рисунок 7 – Схемы для обоснования переднего угла и угла заточки ножа

Максимальное значение угла ε в нашем случае ограничивается углом наклона касательной к траектории ножа в точке входа в разрезаемый материал, т.к. при дальнейшем увеличении угла заточки будет происходить смятие разрезаемого материала задней кромкой ножа.

Уравнение касательной к траектории циклоиды в неподвижных осях координат Ox и Oy в т. O имеет вид:

$$y = \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{2r} \cdot x. \quad (20)$$

Таким образом, значение угла резания в момент начала резания определяется выражением

$$\vartheta = \arctg \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{2r}. \quad (21)$$

С учетом этого максимальный угол заточки ножа определяется

$$\varepsilon_{\max} = \arctg \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{2r} - \arccos \frac{r}{R}. \quad (22)$$

Одним из важных параметров лезвия в плоскости, перпендикулярной плоскости резания, является толщина режущей кромки (острота лезвия). За толщину режущей кромки принимается диаметр окружности, вписанной в контур кромки лезвия (рисунок 8).

При выборе толщины ножа следует учитывать свойства разрезаемого материала, износостойкость и требования к качеству среза. Для работы в машине для резания очищенной мякоти следует выбирать ножи малой толщины (порядка 1...3 мм) обеспечивающие требования прочности, жесткости и износостойкости, но при этом наименее сжимающие разрезаемый материал.

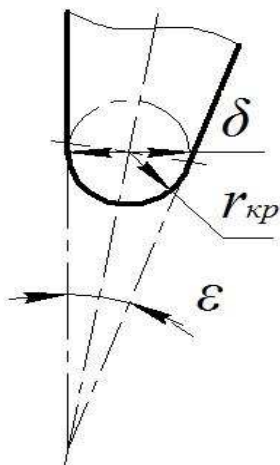


Рисунок 8 – Схема к определению толщины режущей кромки

Ломоть мякоти, зажатый в ячейке ножевой решетки, подвергается всестороннему сжатию (стеснению) гранями ножей при врезании решетки. Резание мякоти происходит в два этапа. Сначала осуществляется врезание рабочих фасок лезвия ножа, давление при этом увеличивается от нуля до некоторого значения $p_{вр}$. Затем одновременно осуществляется резание мякоти и перемещение зажатого куска вдоль боковых граней ножа. Т.к. ножи установлены по радиусу R и наклонены друг к другу на угол α , то давление при заполнении ячейки решетки постепенно возрастает и достигает максимального значения $p_{пр}$ при полностью заполненной ячейке.

Длина H ячейки и угол α должны обеспечить наименее возможное сжатие мякоти и вы-

держку под давлением в течение короткого промежутка времени с целью получения упругого последействия при выходе из ячейки.

Физическая сущность процесса сжатия, знание которой необходимо для выяснения влияния различных технологических факторов на уплотнение мякоти плодов бахчевых является сложной и до конца невыясненной. Основным показателем, характеризующим сжатие мякоти при резании, является плотность получаемых кусков. Для определения напряжений, действующих в деталях и механизмах машины, а также энергии, уходящей на сжатие, нужно знать усилие на рабочем органе, учитывающее как сопротивление материала сжатию, так и его трение о стенки ножевой решетки.

Для раскрытия взаимосвязи между плотностью мякоти и прикладываемым давлением примем следующие допущения:

- 1) Начальная плотность мякоти одинакова во всем объеме ячейки;
- 2) Начальные напряжения в мякоти при отсутствии внешних нагрузок равны нулю;
- 3) Плотность мякоти в процессе проталкивания возрастет непрерывно;
- 4) Усилия при статическом сжатии не зависят от скорости деформации.

Эти предпосылки позволяют считать, что производная давления p по плотности является функцией последнего. Накопленный опыт дает основание полагать, что функция $f(p)$ - непрерывная и монотонно-возрастающая, линейная:

$$\frac{dp}{d\rho} = f(p) = ap + b. \quad (23)$$

Проинтегрировав правую и левую часть этого уравнения в пределах от 0 до p и от ρ_0 до ρ , получим зависимость давления от плотности в явном виде:

$$p = C \cdot (e^{\theta(\rho - \rho_0)} - 1), \quad (24)$$

где $C = b/a$.

Величина $\frac{1}{\theta}$ представляет собой приращение начальной плотности материала при давлении, равном $C \cdot (\theta - 1)$. Таким образом, коэффициенты θ и C зависят от физико-механических свойств материала и характеризуют его сопротивление сжатию.

Под давлением опорного вальца в сжимаемом материале возникают усилия, действующие параллельно оси ячейки. Мякоть сжимается в направлении действия опорного вальца и стремится расшириться

перпендикулярно этому направлению. Стенки ячейки препятствуют расширению, вследствие чего возникает боковое давление на стенки. Пока отсутствует осевое давление, нет и бокового. Затем по мере увеличения осевого давления, плотность материала повышается, и он по своим свойствам приближается к упругому твердому телу. Характер этой зависимости при малых значениях p можно определить только экспериментально. Предположим, что кривая, изображающая зависимость q и p , близка к прямой или приближается к ней. Поэтому зависимость бокового давления от осевого считаем линейной во всем интервале изменения осевого давления:

$$q = \mu p, \quad (25)$$

где μ - коэффициент бокового давления при нагрузке.

Доведя осевое давление до некоторого значения p , уменьшим его до нуля. Боковое давление при этом не упадет до нуля, а сохранит некоторое значение q_0 . Зависимость при разгрузке можно записать так:

$$q = q_0 + \mu_1 p, \quad (26)$$

где μ_1 - коэффициент бокового давления при разгрузке.

Первое слагаемое q_0 выражает остаточное боковое давление на стенки ячейки, обусловленное упругим расширением сжатого материала. В момент остановки, когда увеличение деформации материала прекращается, q_0 не зависит от осевого давления. Второе слагаемое представляет собой боковое давление, вызываемое осевым, то есть оно является функцией от p .

В момент остановки левые и правые части выражений (25) и (26) равны, таким образом

$$\mu = \mu_1 + \frac{q_0}{p}. \quad (27)$$

Составим дифференциальное уравнение равновесия элементарного слоя сжатого материала для того, чтобы определить сопротивление ячейки прямоугольного сечения с наклоном двух противоположных стенок. При этом будем иметь ввиду, что на расстоянии z (рисунок 9) от начала ячейки две стороны его сохраняют свой начальный размер a_0 , а две другие будут иметь размер $a_0 - 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Сила трения на стенке, параллельной оси канала, будет

$$F_{zoy} = f \cdot q_x \cdot 2(a_0 - 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha) dz.$$

На стенки, наклоненные к оси ячейки под углом α , действуют силы: нормального давления Q_n , касательные Q_t , и силы трения F .

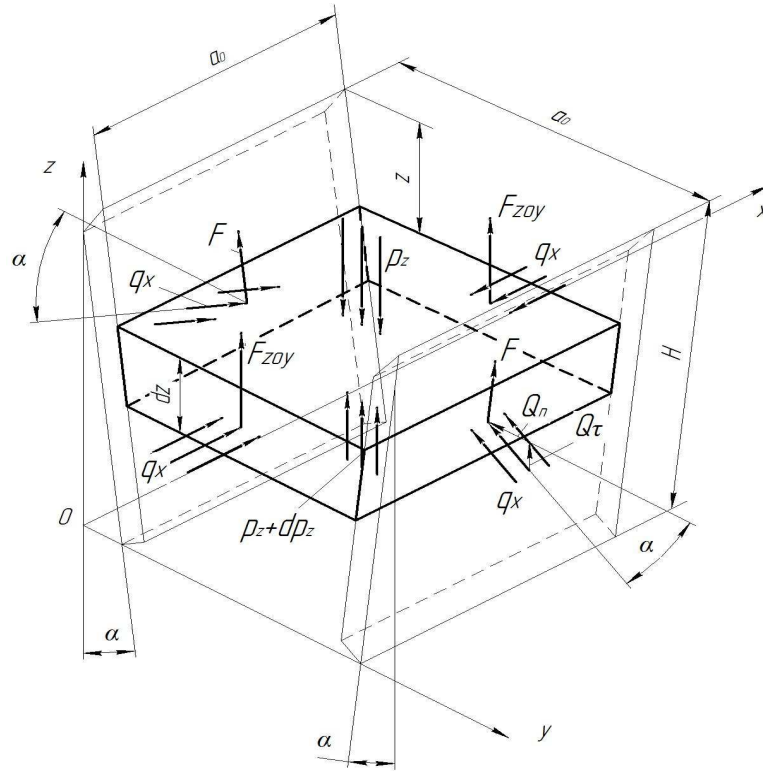


Рисунок 9 – Схема сил, действующих на элементарный слой мякоти, защемленной в ячейке ножевой решетки

Условие равновесия элементарного слоя будет иметь вид:

$$p_z \cdot a_0(a_0 - 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha) - (p_z + dp_z) a_0(a_0 - 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha) - 2F_{zoy} - 2F - 2Q_\tau = 0. \quad (28)$$

После соответствующих преобразований и замены $q_x = \mu p_z + q_0$ имеем:

$$\frac{dp_z}{\mu p_z + q_0} = \frac{\left((2f + 2f \cos \alpha + 2 \sin \alpha) - \frac{4f \operatorname{tg} \alpha}{a_0} z \right)}{z \cdot 2 \operatorname{tg} \alpha - a_0} dz. \quad (29)$$

Решением данного дифференциального уравнения с разделяющимися переменными является формула:

$$p_z = \frac{1}{\mu} \cdot C \cdot e^{-\frac{2f\mu}{a_0} z} \cdot (z \cdot 2 \operatorname{tg} \alpha - a_0)^{\frac{(f \cos \alpha + \sin \alpha) \mu}{\operatorname{tg} \alpha}} - q_0, \quad (30)$$

где C – постоянная интегрирования.

Подставляя начальные условия $z = H$ и $p_z = 0$ находим значение постоянной интегрирования

$$C = [q_0 \cdot e^{2f\mu H/a_0}] / (H \cdot 2 \operatorname{tg} \alpha - a_0)^{(f \cos \alpha + \sin \alpha) \mu / \operatorname{tg} \alpha} \quad (31)$$

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» изложена программа и методика проведения экспериментальных исследований.

Согласно программе были проведены исследования по определению некоторых физико-механических свойств мякоти бахчевых культур (толщина мякоти, коэффициенты трения покоя и трения движения), прочностных показателей мякоти (усилие разрушения, модуль упругости, усилие резания плоским ножом и ножом-решеткой при различных скоростях резания).

Наряду с однофакторными экспериментами был проведен многофакторный эксперимент, целью которого было определение оптимальных значений основных параметров машины (угол заточки ножа, скорость резания, толщина режущей кромки, угол подачи куска) влияющих на качество резания, которое является основным критерием оптимизации.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты исследований и дан их анализ.

На основе анализа результата однофакторных экспериментов построены необходимые графические зависимости, а также проведена статистическая оценка полученных вариационных рядов. Затем по каждому из вариационных рядов построены кривые распределения и проведена их проверка на причастность полученного эмпирического распределения к нормальному теоретическому распределению по критерию χ^2 Пирсона.

Так, среднее значение усилия резания ножом-решеткой при скорости до 0,5 м/с для мякоти арбуза Дисхим составляет: в области плодоножки – 84,03 Н, в области экватора – 49,67 Н, в области цветоложа – 71,73 Н; для мякоти тыквы Волжская серая-92: в области плодоножки – 50,80 Н, экватора – 55,95 Н, в цветоложа – 60,72 Н; для мякоти дыни Быковская-735: в области плодоножки – 18,44 Н, экватора – 11,05 Н, цветоложа – 12,28 Н.

Для построения математической модели процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур был реализован план Рехтшафнера для 4-х факторного эксперимента. На основании экспериментальных данных были рассчитаны коэффициенты регрессии.

В результате расчетов получены уравнения регрессии в кодированном виде:

$$\begin{aligned} &\text{а) для мякоти арбуза Дисхим} \\ &y_D = 91.75 + 8.5x_1 - 8.89x_2 - 5.45x_3 - 1.95x_4 - 0.01x_1x_2 + 0.02x_1x_3 - 0.05x_1x_4 - \\ &- 0.05x_2x_3 - 0.05x_2x_4 - 0.02x_3x_4 - 6.11x_1^2 - 7.61x_2^2 - 2.96x_3^2 - 4.64x_4^2 \end{aligned} \quad (32)$$

б) для мякоти тыквы Волжская серая-92

$$y_{BC-92} = 92.2 + 5.1x_1 - 5.63x_2 - 1.73x_3 + 2.86x_4 + 0.008x_1x_2 + 0.11x_1x_3 + 0.13x_1x_4 - 0.002x_2x_3 - 0.008x_2x_4 + 0.11x_3x_4 - 4.82x_1^2 - 6.1x_2^2 - 0.97x_3^2 - 2.07x_4^2 \quad (33)$$

Для мякоти дыни Быковская-735

$$y_{B-735} = 94.9 - 2.0x_1 + 3.5x_2 - 4.0x_3 + 8.39x_4 - 0.02x_1x_2 + 0.02x_1x_3 + 0.025x_1x_4 + 0.012x_2x_3 - 0.015x_2x_4 + 0.11x_3x_4 - 5.0x_1^2 - 8.75x_2^2 - 2.5x_3^2 - 5.99x_4^2 \quad (34)$$

Адекватность полученных математических моделей проверялась по критерию Фишера. Оптимальные значения факторов представлены в таблице.

Уравнения регрессии представленные в канонической форме, имеют вид:

Для мякоти арбуза Дисхим

$$Y_D - 98,67 = -6.1x_1^2 - 7.6x_2^2 - 2.97x_3^2 - 4.63x_4^2 \quad (35)$$

Для мякоти тыквы Волжская серая-92

$$Y_{BC-92} - 97,74 = -4,8x_1^2 - 6,1x_2^2 - x_3^2 - 2.1x_4^2 \quad (36)$$

Для мякоти дыни Быковская-735

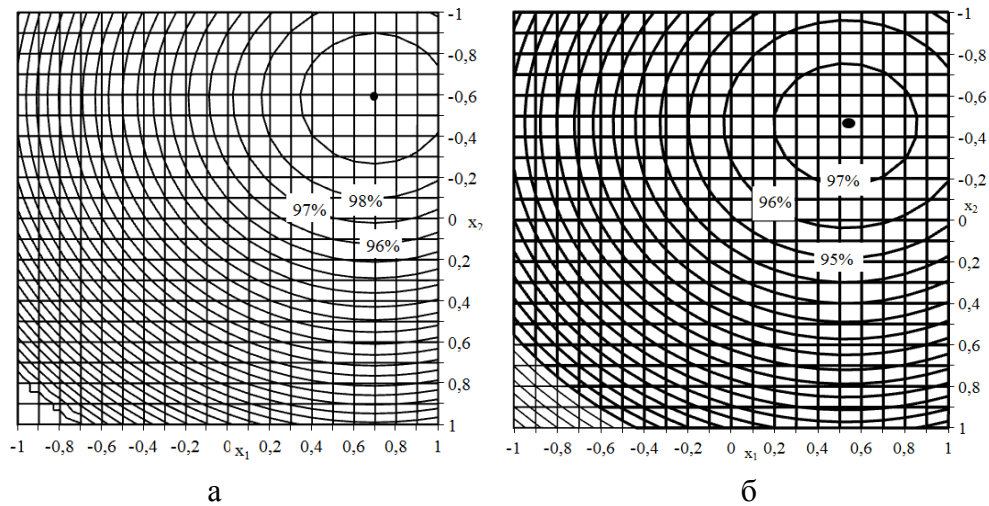
$$Y_{B-735} - 97.2 = -5.1x_1^2 - 8.75x_2^2 - 2.5x_3^2 - 6.0x_4^2 \quad (37)$$

Таблица – Оптимальные значения факторов

Фактор	Оптимальные значения факторов		
	арбуз Дисхим	тыква Волжская серая-92	дыня Быков- ская-735
x_1 – скорость резания, м/с	$\frac{0,7}{0,22}$	$\frac{0,52}{0,2}$	$\frac{-0,2}{0,13}$
x_2 – угол заточки ножа, °	$\frac{-0,6}{22}$	$\frac{-0,47}{23}$	$\frac{0,2}{26}$
x_3 – толщина режущей кромки, мкм	$\frac{-0,94}{53}$	$\frac{-0,86}{55}$	$\frac{-0,8}{60}$
x_4 – угол подачи куска, °	$\frac{-0,2}{42}$	$\frac{-0,67}{54}$	$\frac{0,7}{60}$

Примечание: в числителе – в кодированном виде, в знаменателе – в раскодированном виде

Поскольку все коэффициенты при квадратных членах имеют отрицательные знаки, то поверхности откликов, описанные уравнениями, представляют не что иное, как четырехмерные параболоиды с координатами центров поверхностей в оптимальных значениях факторов. Их анализ целесообразно вести при помощи двумерных сечений, пример которых приведен на рисунке 10.



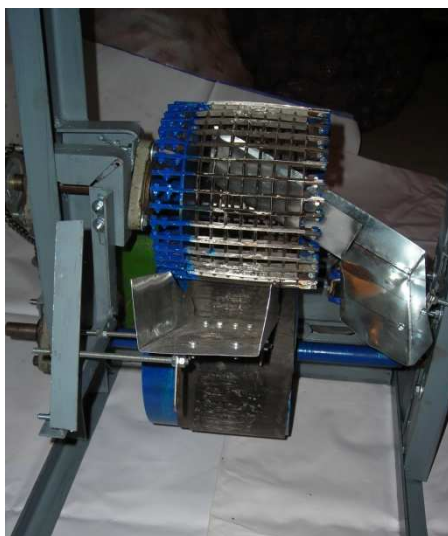
а - арбуз Дисхим ($x_3 = -0,94$ $x_4 = -0,2$); б - тыквы Волжская серая-92 ($x_3 = -0,86$ $x_4 = 0,67$)

Рисунок 10 - Двумерное сечение для изучения влияния факторов x_1 и x_2

При этом оптимальное значение качества резания в центре поверхности для арбуза Дисхим $Y_D = 98\%$, тыквы Волжская серая-92 $Y_{BC-92} = 91\%$, дыни Быковская-735 $Y_{B-735} = 92\%$.

В пятой главе «Определение основных экономических показателей применения машины для резания очищенной мякоти» проведен сравнительный анализ экономической эффективности машины для резания очищенной мякоти с ручным трудом. Производительность машины (рисунок 11) составила порядка 510 кг/ч, потребляемая мощность 0,37 кВт·ч, а качество резания около 92%.

Стоимость новой конструкции машины составила 45169,84 руб., годовая экономия затрат денежных средств от эксплуатации машины 368182 руб., срок окупаемости 0,12 года.



а

б

а – вид спереди, б – вид сбоку

Рисунок 11 – Машина для резки очищенной мякоти

Заключение

1. Использование для механизации процесса резания мякоти бахчевых культур известных в перерабатывающей промышленности машин затруднено и осложняется относительно большими геометрическими размерами плодов бахчевых, различным индексом их формы и специфическими физико-механическими свойствами мякоти.

2. Наиболее полно обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к полуфабрикатам из мякоти бахчевых при переработке её на цукаты, машина с рабочим органом в виде ножевой решетки в форме барабана, позволяющим получать кусочки правильной формы (патент РФ № 2426463).

3. В результате теоретических исследований процесса резания мякоти бахчевых получены зависимости для определения кинематических параметров режущего барабана (траектория движения кромки лезвий ножей в материале, скорость резания), конструктивных параметров (диаметр барабана, максимальная толщина разрезаемой мякоти, максимальная деформация мякоти, максимальный угол заточки ножа), сопротивление ячейки прямоугольного сечения с наклоном двух противоположенных стенок проталкиванию кусочка мякоти.

3. У арбуза Дисхим и дыни Быковская-735 областью с наименьшим усилием резания мякоти является цветоложе, а у тыквы Волжская серая-92 цветоложе является зоной с наибольшим усилием резания плоским ножом. У дыни Быковская-735 разница при резании плоским ножом вдоль и поперек не значительная, так как, по сравнению с тыквой и арбузом, практически отсутствует волокнистая структура. При этом дыня имеет усилие резания мякоти в 3...4 раза меньшее, чем мякоть кормового арбуза и тыквы.

4. Анализ результатов экспериментов показывает, что усилие резания мякоти ножом решеткой при скорости 10...15 м/с больше, чем при скорости резания 0,5 м/с, но разница значений не превышает 12%.

5. При реализации многофакторного эксперимента получены математические модели резания очищенной мякоти плодов бахчевых и определены оптимальные значения наиболее важных параметров. Для мякоти арбуза Дисхим: скорость резания 0,22 м/с, угол заточки ножа 22° , толщина режущей кромки 53 мкм, угол подачи куса 42° . Для мякоти тыквы Волжская серая-92: скорость резания 0,2 м/с, угол заточки ножа 23° , толщина режущей кромки 55 мкм, угол подачи куса 54° . Для мякоти дыни Быковская-735: скорость резания 0,13 м/с, угол заточки ножа 26° , толщина режущей кромки 60 мкм, угол подачи куса 60° .

6. Результаты испытаний разработанной машины для резания показывают, что производительность составляет порядка 510 кг/ч, а качество резания около 92%.

7. Анализ экономической эффективности показал, что годовая экономия затрат денежных средств от эксплуатации машины составляет 368182 руб., срок окупаемости 0,12 года.

8. Для повышения эффективности работы данной машины наиболее целесообразно использование её в поточной линии по переработке плодоовощной продукции. Дальнейшие исследования следует вести по разработке универсального рабочего органа, позволяющего осуществлять качественное резание сырья разного вида.

Основные положения опубликованы в следующих работах:

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шапоров, М.Н. Формирование технологического потока при переработке плодов бахчевых культур / М.Н. Шапоров, Д.В. Семин, М.А. Садовников, А.В. Кузнецов// Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2010. – Вып. №1 (17). – С. 140-145.

2. Шапоров, М.Н. Определение прочностных характеристик плодов бахчевых культур / М.Н. Шапоров, Д.В. Семин, М.А. Садовников, А.В. Кузнецов// Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – Вып. №4 (24). – С. 219-226.

3. Шапоров, М.Н. Качественные показатели работы машины для резания очищенной мякоти бахчевых при переработке на цукаты / М.Н. Шапоров, Д.В. Семин, М.А. Садовников// Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – Вып. №4 (28). – С. 219-226.

патенты:

4. Патент на изобретение РФ №2426463, A23N15/00, B26D3/26; Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур / М.Н. Шапоров, В.Г. Абезин, Д.В. Семин, М.А. Садовников (Россия). - №2010107532/13; заявл. 01.03.10; опубл. 20.08.2011. 2с.

в других изданиях:

5. Лебедь, Н.И. Устройство для определения прочностных свойств плодов, овощей корнеплодов / Н.И. Лебедь, М.А. Садовников // Материалы XVI региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области: науч. изд. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С. 190-192.

6. Садовников, М.А. Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур при первичной переработке на цукаты /

М.А. Садовников // Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, посвященной 65-летию Победы в Великой Отечественной войне / ВГСХА. – Волгоград: Волгоградская ГСХА, 2010. – С. 198-200.

7. Садовников, М.А. Определение прочностных характеристик плодов бахчевых культур / М.А. Садовников // Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей / ВГСХА. – Волгоград: Волгоградская ГСХА, 2011. – С. 283-286.

8. Садовников, М.А. Усовершенствование технологического процесса подготовки мякоти тыквы при переработке на цукаты / М.А. Садовников // Материалы XV региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области: науч. изд. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградская ГСХА, 2011. – С. 283-286.

9. Садовников, М.А. Определение оптимальных параметров работы машины для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур / М.А. Садовников // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей / Волгоградский ГАУ. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С. 105-109.

10. Садовников, М.А. Определение физико-механических свойств мякоти бахчевых культур / М.А. Садовников // Материалы XVI региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области: науч. изд. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С. 213-215.

11. Семин, Д.В. Машина для удаления коры с плодов тыквы и ее качественные показатели работы / Д.В. Семин, А.В. Кузнецов, М.А. Садовников // Применение инновационных технологий в подготовке специалистов высшей квалификации для агропромышленного комплекса Волгоградской области. Материалы регион. науч. конф. / Волгоград: ФГБОУ ВПО ВГСХА, 2008. – С. 57-61.

12. Шапров, М.Н. Механизация первичной переработки плодов бахчевых культур / М.Н. Шапров, Д.В. Семин, М.А. Садовников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2008. – Вып. №4 (12). – С. 146-150.

13. Шапров, М.Н. Качественные показатели работы машины для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур / М.Н. Шапров, Д.В. Семин, М.А. Садовников // Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С. 191-195.

Садовников Михаил Алексеевич

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ
ДЛЯ РЕЗАНИЯ ОЧИЩЕННОЙ МЯКОТИ ПЛОДОВ БАХЧЕВЫХ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НА ЦУКАТЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____. Формат 60×80 ¹/₁₆
Бумага кн.-журн. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № ____

Издательско-полиграфический комплекс ВолГАУ «Нива»
400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26

