

Подсистема диалога (интерфейса) должна обеспечивать связь пользователя с СППР ПУЗ через ПК, возможность ручного ввода исходных данных и вывода (визуализацию) запрашиваемых данных. Она должна состоять из подсистем ввода в СППР ПУЗ исходных данных и вывода (визуализации) данных на мониторе ПК или в печатном виде.

Заклучение

Разработанная структура СППР ПУЗ является основой создания соответствующей автоматизированной системы, использование которой позволит повысить эффективность управления проектами и программами уборки ранних зерновых культур на основе проектирования ТП УРЗК.

Литература

1. Сидорчук, О. В. Означення задач узгодження інтегрованих програм збирання ранніх зернових культур / О. В. Сидорчук, А. М. Тригуба, О. В. Макарчук, В. І. Скібчик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Х., 2012. – Т. 1, № 10. – С. 38–41.
2. Сидорчук, О. В. Планування механізованих зернозбиральних робіт і проектів: монографія / О. В. Сидорчук; за ред. В. В. Адамчука. – Ніжин: ПП «Лисенко М. М.», 2013. – 155 с.
3. Сидорчук, А. Проектно-технологические предпосылки управления аграрным производством на основе ИТ-технологий / А. Сидорчук // MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2016. – Vol. 18, № 3. – С. 31–40.
4. Система Soft.Farm. Автоматизация управління [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.soft.farm/uk>. – Дата доступа: 12.08.2018.
5. Pantheon Farming. Професійне програмне забезпечення для Вашого агробізнесу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datalab.ch/uk/>. – Дата доступа: 12.08.2018.

УДК 631.331.022

Поступила в редакцию 05.10.2018
Received 05.10.2018

А. Н. Юрин¹, В. В. Викторovich¹, А. Д. Четкин²

¹РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: anton-jurin@rambler.ru; lab_plodoyagoda@mail.ru

²УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПЛОДОУБОРОЧНОГО АГРЕГАТА

В статье приводятся результаты выполненных исследований по взаимодействию плодов с различными поверхностями и даются предложения по наиболее оптимальной конструкции транспортирующих органов плодуборочного агрегата, предотвращающей соударения плодов при транспортировании.

Ключевые слова: пловодство, плодуборочный агрегат, транспортирующее устройство, теория упругого контакта, математическая модель, соударение плодов.

A. N. Jurin¹, V. V. Viktorovich¹, A. D. Chechetkin²

¹RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: anton-jurin@rambler.ru; lab_plodoyagoda@mail.ru

²Educational Establishment «Belarusian State Agrarian Technical University»

Minsk, Republic of Belarus

STUDY OF INTERACTION OF FRUITS WITH VARIOUS SURFACES OF FRUIT-TREATMENT AGGREGATE

The article presents the results of the studies carried out on the interaction of fruits with various surfaces and gives suggestions on the most optimal design of the transporting organs of the fruit harvesting unit, preventing the fruit from colliding during transportation.

Keywords: fruit growing, fruit harvesting unit, transporting device, theory of elastic contact, mathematical model, impact of fruits.

Введение

Плодоводство занимает важнейшее место в обеспечении населения Республики Беларусь продуктами питания. Однако при этом на одного жителя в республике производится всего лишь около 30 кг плодов и ягод при медицинской норме 98 кг [1].

В то же время плодоводство в Беларуси остается одной из наименее механизированных отраслей сельского хозяйства, в которой доля механизированных работ не превышает 25...30 %. Затраты на содержание и обслуживание плодоносящего сада составляют до 8,9 млн чел.-ч/га, ягодников – до 8,5 млн чел.-ч/га.

Уборка плодов – заключительная и решающая операция в общем плане работ по выращиванию плодов, которая во многом определяет качественные и количественные показатели производимой продукции и экономики отрасли в целом.

Для определения параметров и режимов работы транспортирующих рабочих органов плодуборочной платформы необходимо выбрать модель плода, достоверно описывающую его состояние при взаимодействии плода с транспортирующими устройствами, определить напряжения, возникающие во время процесса уборки, и установить допустимые их значения для обеспечения высокого качества уборки плодов.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлись различные виды взаимодействия плодов с транспортирующими органами плодуборочного агрегата. При исследовании применялся анализ напряжений, возникающих в плодах при ударе, с помощью теории упругого контакта Герца.

Результаты исследований

Модель плода

Для определения напряжений, возникающих в плодах при ударе, нужно воспользоваться представлениями классической механики твердого деформируемого тела, которая разрабатывалась для конструкционных материалов. Применение данного математического аппарата механики сплошной среды для растительных тканей требует обоснования.

В механике сплошной среды предполагается, что деформируемые тела, испытывающие действие внешних сил, являются сплошными, однородными и изотропными, а самый малый элементарный объем, выделенный из этого тела, обладает теми же физико-механическими свойствами, что и все тело.

В механике сплошной среды этот объем сводится к нулю, что и соответствует идеальной, сплошной, однородной изотропной среде. В действительности такие среды в инженерной практике встречаются редко.

В подавляющем большинстве случаев свойства материалов изучаются на элементарных представительных объемах с конечными размерами [2]. Выбранный элементарный объем должен адекватно представлять свойства рассматриваемого материала. Для плодов семечковых и косточковых культур элементарный объем может быть представлен в виде совокупности клеток. Объем этой совокупности клеток должен быть в тысячи раз меньше объема плода, и его физико-механические свойства должны представлять собой осредненные значения свойств основной ткани плода. Выбор такого элементарного представительного объема позволяет нам считать материал плода сплошным, однородным и изотропным и оправдывает применение для решения данной динамической контактной задачи математической модели механики сплошной среды.

Данные допущения позволяют применить для анализа напряженного состояния теорию упругого контакта Герца. Пусть два упругих

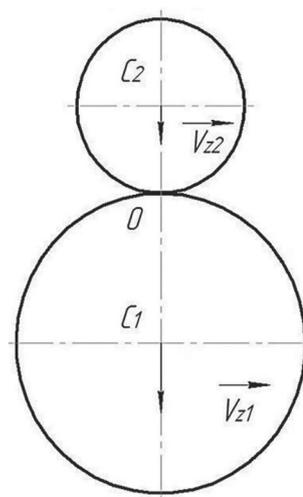


Рисунок 1. – Расчетная схема упругого удара шаров

шара с массами m_1 и m_2 (рисунок 1) движутся со скоростями V_{z1} и V_{z2} вдоль линии, соединяющей их центры (точки C_1 и C_2), и сталкиваются в точке O .

Во время удара из-за упругих деформаций расстояние между центрами шаров становится равным δ_z . Их относительная скорость равна:

$$V_{z2} - V_{z1} = \frac{d\delta_z}{dt}. \quad (1)$$

Сила взаимодействия в любой момент $P(t)$ определяется следующим образом:

$$P = m_1 \frac{dV_{z1}}{dt} = -m_2 \frac{dV_{z2}}{dt}. \quad (2)$$

Продифференцировав по времени (1) и используя выражение (2), можно записать:

$$\frac{d}{dt}(V_{z2} - V_{z1}) = -\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} P = \frac{d^2 \delta_z}{dt^2}. \quad (3)$$

Соотношение между P и δ_z берется таким, как при статическом контакте:

$$P = K \cdot \delta_z^{3/2}, \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от упругих свойств тел, а также их размеров, то есть радиусов.

$$K = \frac{4}{3} R^{1/2} E^*. \quad (5)$$

В формуле (5) обозначено:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (6)$$

где R_1 и R_2 – радиусы шаров; E^* – приведенный модуль упругости.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (7)$$

где E_1 , E_2 и ν_1 , ν_2 – модули упругости тел и коэффициенты Пуассона.

Выражение (4) справедливо для случаев, когда область контакта имеет форму круга, то есть в случае контакта двух тел сферической формы и при контакте сферы с плоскостью.

Учитывая (3), выражение (4) можно записать:

$$m \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = -K \delta_z^{1/2}, \quad (8)$$

где принято

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}. \quad (9)$$

Проинтегрируем выражение (8) по δ_z , предварительно осуществив следующие преобразования:

$$\frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = \frac{d\dot{\delta}_z}{dt} \frac{d\delta_z}{d\delta_z} = \frac{\dot{\delta}_z d\dot{\delta}_z}{d\delta_z}. \quad (10)$$

Подставим (10) в (8) и, разделив переменные, получим:

$$\dot{\delta}_z d\dot{\delta}_z = -\frac{K}{m} \delta_z^{3/2} d\delta_z. \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение (11) по $\dot{\delta}_z$ и δ_z , от начала удара до какого-то промежуточного момента удара

$$\int_{V_0}^{\delta_z} \dot{\delta}_z d\dot{\delta}_z = - \int_0^{\delta_z} \frac{K}{m} \delta^{3/2} d\delta, \quad (12)$$

где $V_0 = (V_{z_2} - V_{z_1})_{t=0}$ – скорость сближения тел в момент удара.

В результате интегрирования получим:

$$\frac{1}{2} \left(V_0^2 - \left(\frac{d\delta_z}{dt} \right)^2 \right) = \frac{2}{5} \frac{K}{m} \delta_z^{2/5}. \quad (13)$$

Из выражения (13) можно найти максимальное сближение шаров δ_z^* , соответствующее максимальной их деформации, то есть когда $\frac{d\delta_z}{dt} = 0$.

$$\delta_z^* = \left(\frac{5mV_0^2}{4K} \right)^{2/5} = \left(\frac{15mV_0^2}{16R^{1/2}E^*} \right)^{2/5}. \quad (14)$$

Формула (14) справедлива для случаев контакта двух тел сферической формы и при контакте сферы с плоскостью.

Зависимость сжатия от времени находится повторным интегрированием (13) и выражается в виде:

$$t = \frac{\delta_z^*}{V_0} \int \frac{d\left(\frac{\delta_z}{\delta_z^*}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\delta_z}{\delta_z^*}\right)^{5/2}\right)^{1/2}}. \quad (15)$$

После момента максимального сжатия t^* шары вновь восстанавливают форму. Так как они идеально упруги, трение отсутствует, а энергией, переходящей в волновое движение, пренебрегаем, то деформации абсолютно обратимы. Следовательно, общее время удара

$$T_c = 2t^* = \frac{2\delta_z^*}{V_0} \int_0^1 \frac{d\left(\frac{\delta_z}{\delta_z^*}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\delta_z}{\delta_z^*}\right)^{5/2}\right)^{1/2}}. \quad (16)$$

Интегрирование (16) дает следующее выражение для времени удара:

$$T_c = 2,94 \frac{2\delta_z^*}{V_0} = 2,87 \left(\frac{m^2}{RE^*V_0} \right)^{1/5}. \quad (17)$$

Согласно теории Герца, давление, развивающееся между двумя контактирующими гладкими упругими телами вращения

$$p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

где p_0 – максимальное давление; a – радиус площадки контакта; r – текущий радиус окружности, лежащей в площадке контакта с центром в центре площадки контакта.

Согласно выражению (18), максимальное давление будет в центре площадки контакта ($r = 0$), а по краям площадки ($r = a$) давление равно нулю (рисунок 2).

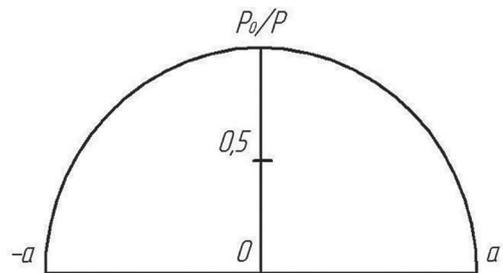


Рисунок 2. – Распределение давления по круговой площадке контакта

Радиус области контакта определяется по формуле

$$a = \frac{\pi p_0 R}{2E^*}. \quad (19)$$

Полная сжимающая нагрузка связана с давлением соотношением

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2. \quad (20)$$

Отсюда максимальное давление, с учетом соотношения (19), можно определить следующим образом:

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}. \quad (21)$$

В связи с тем, что при ударных взаимодействиях сжимающая нагрузка P зависит от скорости, на практике удобнее пользоваться формулой, которая получается при подстановке в (21) выражений (4), (5), (14) и определяет величину максимального контактного давления в момент максимального сжатия:

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \left(30 \frac{m}{R^3} V_0^2 E^{*4} \right)^{1/3}. \quad (22)$$

Представленная математическая модель определения величины контактного давления в момент сжатия (22) может быть использована для определения максимального давления в плодах в следующих случаях: при ударе плода о дно контейнера, соударении двух свободных плодов при перемещении по транспортирующим устройствам плодуборочного агрегата, ударе плода о поверхность из плотно лежащих плодов [3].

Удар плода о ровную поверхность (дно контейнера)

Для этого необходимо в выражениях (6) и (9) положить $R_2 = \infty$ и $m_2 = \infty$ (рисунок 3). Тогда в формуле (22) R и m будут радиус и масса плода соответственно, а V_a – скорость центра масс плода в момент удара.

В этом случае R и m не являются приведенными величинами, поэтому выразим массу плода через его плотность ρ .

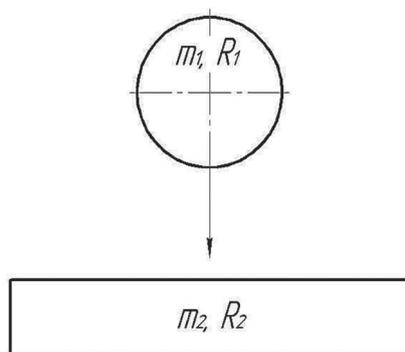


Рисунок 3. – Расчетная схема удара плода о дно контейнера

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (23)$$

Тогда формула (22) приобретает вид:

$$p_0^{(1)} = \left(40\rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}. \quad (24)$$

Как следует из формулы (24), при ударе тела сферической формы о плоскую поверхность максимальное контактное давление определяется скоростью удара, упругими характеристиками тел и плотностью плода и не зависит от его размеров. Плотность плодов зависит от сорта и сроков уборки.

Основные показатели плодов семечковых культур, применяемых при расчетах, приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Основные показатели яблок различных сортов

Показатель	Яблоко (6 сортов)
Масса плода, г	42–122
Высота плода, мм	40–60
Усилие отрыва плодоножки от ветки, кгс	0,8–2,35
Усилие отрыва плодоножки от плода, кгс	0,9–3,05
Насыпная плотность, кг/м ³	617–650

Таблица 2. – Индивидуальная масса и плотность плодов

Плоды	Индивидуальная масса, г		Плотность, г/см ³	
	минимальная	максимальная	минимальная	максимальная
Яблоко	42,0	160,0	0,733	0,972
Груша	28,0	155,0	0,964	1,167

С помощью полученного выражения (24) определяется зависимость контактного давления, влияющего на повреждаемость плодов при падении, от скорости соударения плода о плоскую поверхность (рисунок 4).

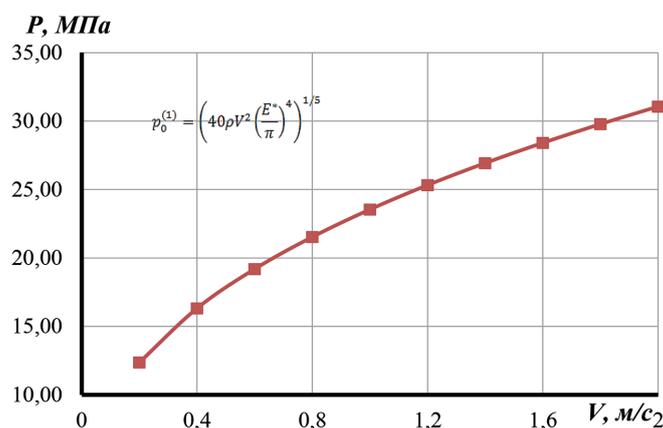


Рисунок 4. – Зависимость контактного давления от скорости соударения плодов

Представленная ситуация случается, когда плод переходит с лотка на горизонтальный конвейер, а также когда плод падает с вертикального конвейера в пустой контейнер.

Соударение двух свободных плодов

Ситуация соударения двух свободных плодов может возникать, когда плоды сталкиваются друг с другом в воздухе в момент перехода с лотков на горизонтальный конвейер или при свободном перекаатывании по рабочим поверхностям (рисунок 5).

В этом случае в формуле (22) величины m и R являются приведенными и определяются выражениями (6) и (9). Поэтому в формуле (22) отношение $\frac{m}{R^3}$ может быть представлено в виде:

$$\frac{m}{R^3} = \frac{\left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^3} = \frac{\frac{3}{4} \pi \left(\frac{R_1^3 \rho_1 R_2^3 \rho_2}{R_1^3 \rho_1 + R_2^3 \rho_2}\right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^3} = f(R), \quad (25)$$

где R_1 , ρ_1 и R_2 , ρ_2 – соответственно радиусы и плотность первого и второго тела.

Так как в случае уборки плодов взаимодействовать будут плоды одного сорта, а следовательно, одинаковой плотности, положим в формуле $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Тогда выражение (25) примет вид:

$$f(R) = \frac{4}{3} \pi \rho (R_1 + R_2)^3 \cdot \frac{1}{R_1^3 R_2^3}. \quad (26)$$

Функция $f(R)$ принимает максимальное значение при $R_1 = R_2 = R$. В этом случае

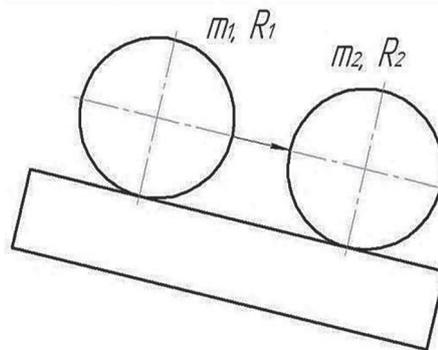


Рисунок 5. – Расчетная схема соударения двух свободных плодов

$$\frac{m}{R^3} = f(R) = \frac{16\pi}{3}\rho. \quad (27)$$

То есть выражение (22) при данном случае удара будет принимать наибольшее значение, когда радиусы контактирующих тел будут равны. Следовательно, из всех возможных комбинаций наиболее опасным будет случай соударения двух плодов одинакового радиуса. Такая ситуация наиболее вероятна, когда плоды будут перемещаться к контейнеру [4]. Подставив (27) в (22), получим выражение для максимального контактного давления в данном случае:

$$p_0^{(2)} = \left(160\rho V_0^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}, \quad (28)$$

где ρ – плотность соударяющихся плодов одинакового радиуса.

Как следует из формулы (28), при соударении двух одинаковых плодов максимальное давление зависит от плотности плодов, а не от их размеров и массы.

С помощью полученного выражения (28) определяется зависимость контактного давления, влияющего на повреждаемость плодов при падении, от скорости соударения плода о плоскую поверхность (рисунок 6).

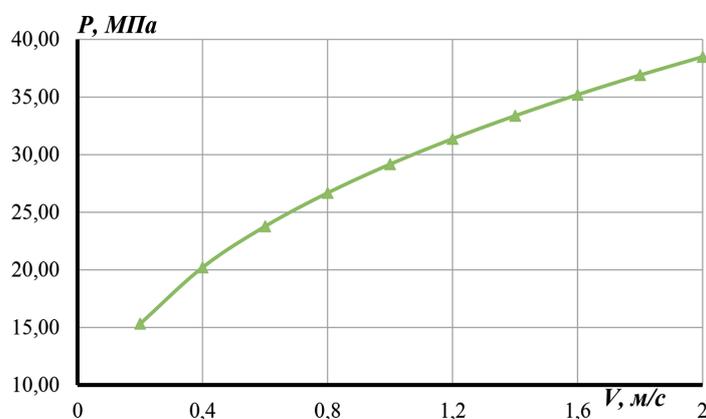


Рисунок 6. – Зависимость контактного давления от скорости соударения плодов

Сравнивая формулы (24) и (28), можно сделать вывод, что наибольшие повреждения получают плоды, которые контактируют при свободном перекатывании на рабочей поверхности. Это обусловлено тем, что контактное давление при соударении свободных плодов больше, чем давление при ударе плода о плоскую поверхность.

Поэтому при конструировании транспортирующих органов плодуборочного агрегата основной задачей является предотвращение соударения плодов при транспортировании. Для этого на транспортирующих лентах необходимо установить специальные упорные приспособления, которые предотвратят свободное перекатывание и соударение плодов на транспортирующих устройствах.

Удар плода о поверхность из плотно лежащих плодов

Будем считать, что плод массой m_1 и радиусом R_1 ударяется о плод (поверхность) конечного радиуса R_2 и бесконечной массы ($m_2 = \infty$) (рисунок 7). В этом случае, согласно формуле (9), $m = m_1$, а R будет приведенной величиной и определится выражением (6).

Для данного расчета в формуле (22) отношение $\frac{m}{R^3}$ может быть представлено в виде:

$$\frac{m}{R^3} = \frac{m_1}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi\rho R_1^3}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^3} = f(R). \quad (29)$$

В результате преобразований получим:

$$f(R) = \frac{4}{3} \pi \rho (k+1)^3. \quad (30)$$

Величина функции $f(R)$ в данном случае будет зависеть от соотношения радиусов $k = R_1/R_2$. Чем больше будет значение k , то есть чем больше радиус падающего плода по сравнению с радиусом поверхности в точке контакта, тем больше будет функция $f(R)$, следовательно, тем больше будет контактное давление. Формула (22) для контактного давления в этом случае примет вид:

$$p_0^{(3)} = \left(40(k+1)^3 \rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}, \quad (31)$$

где ρ – плотность падающего плода.

В таблице 3 приведены выражения для максимального контактного давления при различных значениях k .

Таблица 3. – Формулы для определения максимального контактного давления

$k = R_1/R_2$	$p_0^{(3)} = \left(40(k+1)^3 \rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}$
1/2	$p_0^{(3)} = \left(135 \rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}$
1/1	$p_0^{(3)} = \left(320 \rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}$
2/1	$p_0^{(3)} = \left(1080 \rho V^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}$

При перемещении плодов по исследуемому транспортирующему устройству рассмотренный случай реализуется при падении плодов с вертикального конвейера в контейнер. В большинстве случаев будут контактировать плоды одинаковых размеров ($k = 1$). Однако возможны более опасные ситуации ($k > 1$), когда крупный плод падает на гораздо более мелкий. На рисунке 8 показана зависимость контактного давления от соотношения радиусов падающего и несвободного плода.

Для расчета допустимых высот падения плодов и скоростей их соударения необходимо знать упругие и прочностные характеристики плодов.

Установлено, что допустимое контактное давление для яблок поздних сортов (5 сортов) – 26–30 МПа.

Таким образом, допустимая скорость падения плодов яблок на поверхность из плотно лежащих плодов составляет 0,8–1,0 м/с при $k = 1/2$, 0,5–0,7 м/с при $k = 1$ и 0,3–0,4 м/с при $k = 2$.

Теоретическими исследованиями взаимодействия плодов с транспортирующими органами плодуборочного агрегата установлено, что при падении плода на плод, лежащий на конвейере, наиболее неблагоприятной с точки зрения повреждаемости является ситуация, когда радиус несвободного плода меньше радиуса падающего плода. Очевидно, что при транспортировании необходимо избегать подобного рода контактов, так как они почти всегда будут приводить к повреждению плодов и снижению сроков их хранения.

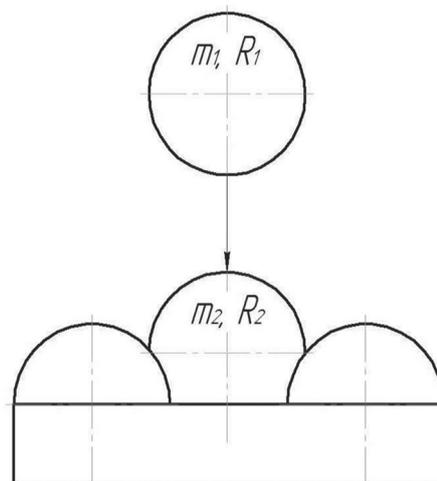


Рисунок 7. – Расчетная схема удара плодов о несвободный плод

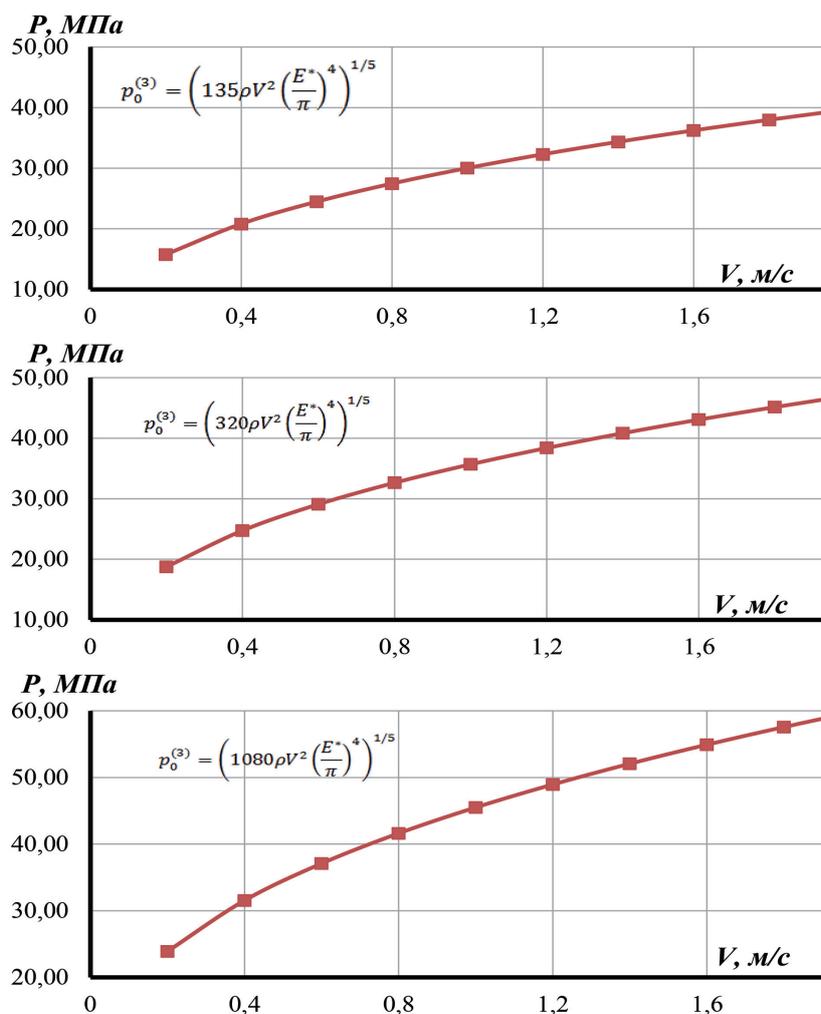


Рисунок 8. – Зависимость максимального контактного давления от скорости соударения плодов при различных соотношениях радиусов плодов

Заключение

1. Взаимодействие плодов при уборке бывает трех видов: удар плода о твердую поверхность, соударение двух свободных плодов и удар плода о поверхность из плотно лежащих плодов.

2. Допустимая скорость падения плодов яблок на поверхность из плотно лежащих плодов составляет 0,8–1,0 м/с при $k = 1/2$, 0,5–0,7 м/с при $k = 1$ и 0,3–0,4 м/с при $k = 2$.

3. Наибольшие повреждения получают плоды, которые контактируют при свободном перекачивании на рабочей поверхности. Это обусловлено тем, что контактное давление при соударении свободных плодов больше, чем давление при ударе плода о плоскую поверхность.

Литература

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2013. – 364 с.
2. Варламов, Г. П. Машины для уборки фруктов / Г. П. Варламов. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
3. Юрин, А. Н. Агрегат для уборки плодов и обрезки деревьев в садах / А. Н. Юрин, А. А. Лях // Сельскохозяйственная научно-техническая и рыночная информация. – 2013. – № 8. – С. 39–43.
4. Юрин, А. Н. Агрегат самоходный универсальный АСУ-6 для уборки плодов и обрезки деревьев в садах интенсивного типа / А. Н. Юрин, А. А. Лях, В. М. Резвинский, А. Д. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2013. – Вып. 47. – Т. 1. – С. 218–224.