ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАНІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.358:634.10
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-394-405

Поступила в редакцию 11.07.2022
Received 11.07.2022

П. П. Казакевич[1], А. Н. Юрин[2]

[1]Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[2]Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАВМИРОВАНИЯ ПЛОДОВ СЕМЕЧКОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ МАШИННОЙ УБОРКЕ

Аннотация. В статье представлены теоретические исследования взаимодействия плодов друг с другом и транспортирующими органами плодоуборочного агрегата. Такое взаимодействие является основной причиной их травмирования, что негативно сказывается на сохранности урожая и качестве реализуемой продукции, а значит, и на ее стоимости. В работе рассмотрены основные, наиболее вероятные способы взаимодействия плодов: удар плода о твердую поверхность, соударение двух свободных плодов и удар плода о поверхность из плотно лежащих плодов. В результате исследования установлено, что наибольшие повреждения получают плоды, контактирующие 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. Обоснована допустимая скорость падения яблок на поверхность из плотно лежащих плодов. Она составляет 1,9 м/с при высоте падения 0,183 м и соотношении радиусов контактирующих плодов $k = 1/2$, или 1,25 м/с и 0,08 м при $k = 1$, или 0,67 м/с и 0,023 м при $k = 2$. Результаты исследований применены в Научно-практическом центре НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства при разработке агрегата самоходного универсального для сбора плодов и формирования веток плодовых деревьев АСУ-6.

Ключевые слова: уборка плодов, модель плода, упругий удар, давление сжатия, площадь контакта, контактное давление, скорость соударения, высота падения

Для цитирования: Казакевич, П. П. Теоретическое исследование травмирования плодов семечковых культур при машинной уборке / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 393–405. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-394-405

Petr P. Kazakevich[1], Anton N. Yurin[2]

[1]Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[2]Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Republic of Belarus

THEORETICAL STUDY OF DAMAGING POMACEOUS FRUITS DURING MACHINE HARVESTING

Abstract. The article presents theoretical studies of contact of fruits with each other and with the transporting organs of the harvesting unit. Such contact is the main cause of damage, which negatively affects the safety of crop and the quality of products sold, and hence its cost. The paper considers the main, most probable ways of fruit contact: impact of fruit on a hard surface, impact of two free fruits and impact of fruit on the surface of densely lying fruits. It has been determined that fruits that are in contact during free rolling on the working surface receive the greatest damage. This is due to the fact that the contact pressure during the collision of free fruits is greater than the pressure when the fruit hits a flat surface. As a result of the study, the permissible speed of falling apples on the surface of their tightly lying fruits is 1.9 m/s at a falling height of 0.183 m and a ratio of the radii of the contacting fruits $k = 1/2$, or 1.25 m/s and 0.08 m at $k = 1$, or 0.67 m/s and 0.023 m at $k = 2$. The results of the research were applied by Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization in the development of a self-propelled universal unit for picking fruits and forming branches of fruit trees ASU-6.

Keywords: fruit picking, fruit model, elastic impact, compression pressure, contact area, contact pressure, impact velocity, fall height

For citation: Kazakevich P. P., Yurin A. N. Theoretical study of damaging pomaceous fruits during machine harvesting. *Vestsi natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no. 4, pp. 393–405 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-393-405

Введение. В Республике Беларусь плодоводство занимает важное место в обеспечении питанием населения. При этом на одного жителя в стране производится только около 30 кг плодов и ягод при медицинской норме 98 кг[1].

Плодоводство Беларуси остается одной из наименее механизированных отраслей сельского хозяйства. Доля механизированных работ не превышает 25…30 %. Затраты труда на содержание и обслуживание плодоносящего сада составляют до 750 чел.-ч/га, или до 15 млн чел.-ч по республике [1–4].

Уборка плодов – заключительная и важнейшая операция в технологическом комплексе работ по выращиванию плодов. Она во многом определяет качественные и количественные показатели производимой продукции, экономики отрасли в целом. Минимизация травмирования плода при уборке – одно из главных требований ее выполнения.

Поэтому для определения параметров и режимов работы транспортирующих рабочих органов плодоуборочной платформы важно выбрать модель плода, достоверно описывающую его состояние при взаимодействии с транспортирующими устройствами. Это позволит определить напряжения, возникающие на поверхности плодов в процессе уборки, и установить допустимые их значения для обеспечения качественной уборки.

Обоснование условной модели плода и аналитической зависимости его контактного взаимодействия. Для определения напряжений, возникающих в плодах при ударе, используем представления классической механики твердого деформируемого тела.

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. Этот объем сводится к нулю, что и соответствует идеальной, сплошной среде. В действительности такие среды на практике встречаются редко.

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

Эти допущения позволяют применить для анализа напряженного состояния теорию упругого контакта Герца [5]. Пусть два упругих шара с массами m_1 и m_2 (рис. 1) движутся со скоростями V_{z1} и V_{z2} вдоль линии, соединяющей их центры, и сталкиваются в точке *O*.

Очевидно, что движение плодов будет отвечать теории соударения упругих тел до определенного предела, при превышении которого в плодах будут происходить необратимые деформации, приводящие к потере внешнего вида и, что более важно, к получению внутренних повреждений, приводящих к снижению срока хранения.

Во время удара из-за упругих деформаций центры шаров приближаются друг к другу на расстояние δ_z. Их относительная скорость равна

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

[1] Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2013. – 363 с.

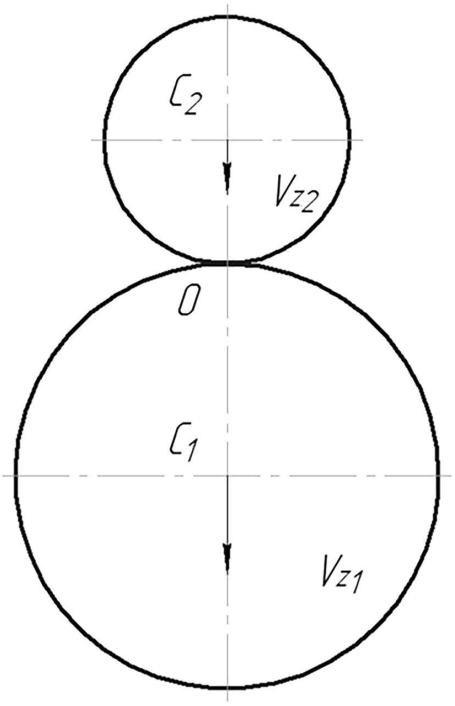

Рис. 1. Расчетная схема упругого удара шаров

Fig. 1. Calculation scheme of the elastic impact of balls

Сила взаимодействия плодов определяется как

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

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

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

Соотношение между P и δ_z берем таким, как при статическом контакте, т. е.

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

где K – коэффициент, зависящий от упругих свойств тел, а также их размеров, т. е. радиусов, который рассчитывается по формуле

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

где R – приведенный радиус шара; E^* – приведенный модуль упругости.

Соотношение радиусов шаров определяется следующим выражением:

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

где R_1 и R_2 – радиусы шаров. Тогда

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

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, т. е. при контакте двух тел сферической формы и тела сферической формы с плоскостью. Учитывая (3), выражение (4) можно записать следующим образом:

$$m \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = -K \delta_z^{3/2}, \quad (8)$$

где

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

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

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

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

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

где $V_0 = (V_{z2} - V_{z1})t = 0$ – скорость сближения тел в момент удара. В результате интегрирования получим

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

Из выражения (13) можно найти максимальное сближение шаров $\dot{\delta}_z$, соответствующее их максимальной деформации, т. е. когда $\frac{d\delta_z}{dt} = 0$:

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

Формула (14) справедлива для случаев, аналогичных применимости формулы (4).

Зависимость сжатия от времени находится повторным интегрированием выражения (13) и имеет вид

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

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

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

Интегрируя выражение (16), имеем

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

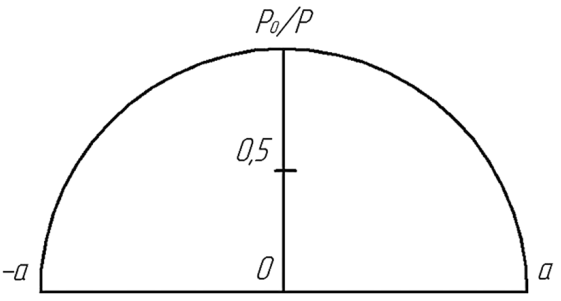

Рис. 2. Распределение давления по круговой площадке контакта

Fig. 2. Pressure distribution over the circular contact area

Давление, развивающееся между двумя контактирующими гладкими упругими телами вращения, согласно теории Герца, определяется как

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

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 (рис. 2).

Радиус области контакта определяется по формуле

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

Полная сжимающая нагрузка связана с давлением соотношением

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

Отсюда максимальное давление, учитывая соотношение (19), можно определить следующим образом:

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

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:

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

Данная математическая модель (22) может быть использована для определения максимального давления в плодах при следующих случаях: удара плода о дно контейнера, соударения двух свободных плодов при перемещении по транспортирующим устройствам плодоуборочного агрегата, удара плода о поверхность из плотно лежащих плодов. Рассмотрим эти случаи более детально.

Результаты исследования удара плода о ровную поверхность (дно контейнера). Для этого необходимо в выражениях (6) и (9) принять $R_2 = \infty$ и $m_2 = \infty$ (рис. 3). Тогда в формуле (22) R и m будут соответственно радиус и масса плода, а V_0 – 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:

$$m = \rho\frac{4}{3}\pi R^3. \tag{23}$$

Тогда формула (22) приобретает вид

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

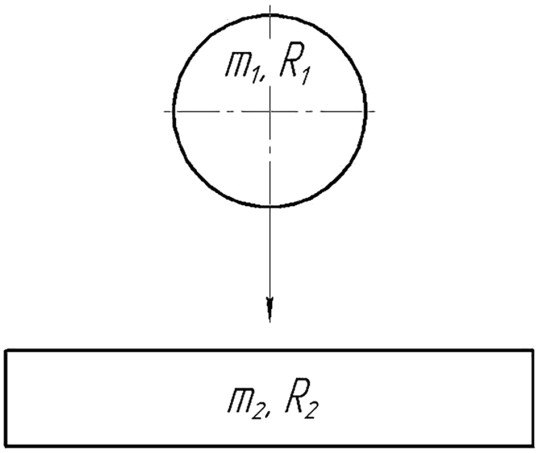

Рис. 3. Расчетная схема удара плода о дно контейнера

Fig. 3. Calculation scheme of the impact of fruit on the bottom of container

Из формулы (24) следует, что 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 и массы. Плотность плодов зависит от сорта и сроков уборки.

Основные показатели плодов семечковых культур, используемые при расчетах, представлены в табл. 1 и 2 [5–8].

Т а б л и ц а 1. **Основные механические характеристики яблок**

T a b l e 1. **Main mechanical characteristics of apples**

Показатель	Яблоко (6 сортов)
Масса плода, г	42–122
Высота плода, мм	40–60
Усилие отрыва плодоножки от ветки, кгс	0,80–2,35
Усилие отрыва плодоножки от плода, кгс	0,90–3,05
Насыпная плотность, кг/м^3	617–650

Т а б л и ц а 2. **Индивидуальная масса и плотность плодов**

T a b l e 2. **Individual weight and density of fruits**

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

Графическая интерпретация полученного выражения (24) с учетом этих показателей имеет вид, представленный на рис. 4.

Прочность кожуры и состояние мякоти оценивается по сопротивлению, которое возникает при проникновении инородного тела в плод через кожуру. Так исследованиями большого количества сортов яблок, предназначенных для механизированной уборки, установлено, что давление, при котором кожура теряет свою прочность, составляет 0,87–1,24 МПа [9–16]. Причем при давлении до 0,4 МПа воспринимаемые плодами повреждения обратимы, т. е. безопасны. Указанное давление принимаем за несущую способность плода.

В то же время мякоть плода прокалывается при давлении, составляющем 50…70 % давления прокалывания кожуры. При этом именно разрушение мякоти, в случае когда кожура осталась

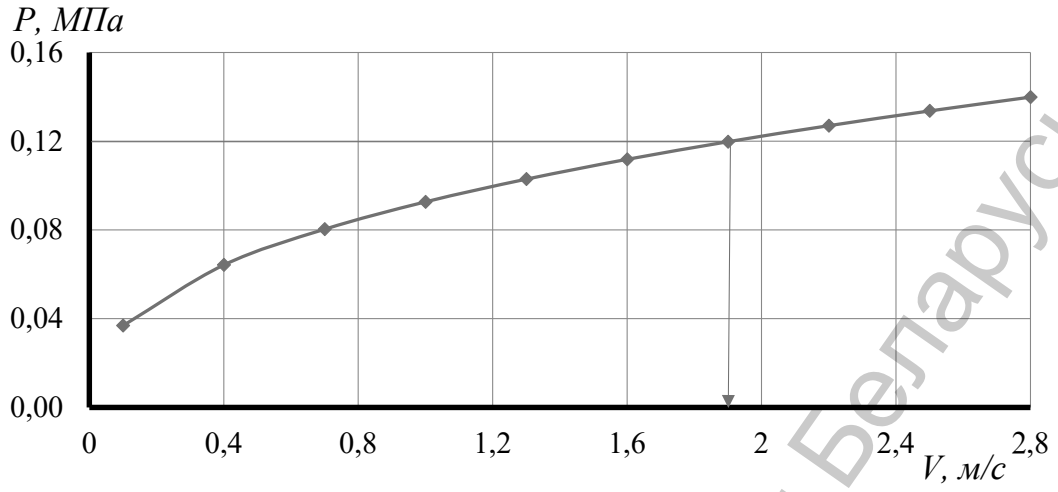

Рис. 4. Зависимость контактного давления от скорости соударения плодов при ударе о дно контейнера

Fig. 4. Dependence of contact pressure on the speed of impact of fruits when hitting the bottom of container

без повреждений, приводит к порче плодов при хранении. Вследствие этого для исключения повреждения мякоти давление на плоды должно быть на 30…50 % меньше несущей способности плода, т. е. не более 0,12 МПа.

Из графика на рис. 4 видно, что такое давление достигается при скорости столкновения, равной 1,9 м/с, что, в соответствии с зависимостью

$$h = \frac{V^2}{2g}, \tag{25}$$

соответствует высоте падения h, равной 0,183 м.

Представленная ситуация случается, когда плод переходит из лотка на горизонтальный конвейер, а также когда плод падает на дно пустого контейнера.

Соударение двух свободных плодов. Ситуация соударения двух свободных плодов при их уборке и сортировке может возникать, когда плоды сталкиваются друг с другом в воздухе в момент перехода из лотков на горизонтальный конвейер или при свободном перекатывании по рабочим поверхностям (рис. 5).

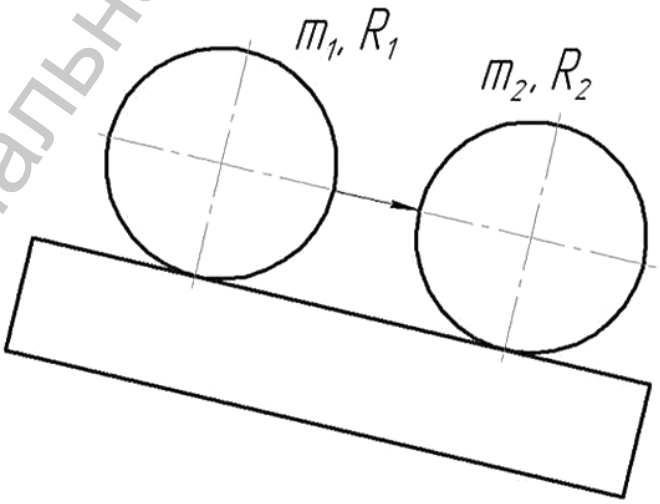

Рис. 5. Расчетная схема соударения двух свободных плодов

Fig. 5. Calculation scheme of the collision of two free fruits

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

$$\frac{m}{R^3}=\frac{\left(\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}\right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}\right)^3}=\frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{R_1^3\rho_1 R_2^3\rho_2}{R_1^3\rho_1+R_2^3\rho_2}\right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}\right)^3}=f\left(R\right), \tag{26}$$

где R_1, ρ_1 и R_2, ρ_2 – соответственно радиусы и плотности 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 (26) примет следующий вид:

$$f(R)=\frac{\frac{4}{3}\pi\rho(R_1+R_2)^3}{R_1^3 R_2^3}. \tag{27}$$

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

$$\frac{m}{R^3}=f(R)=\frac{16\pi}{3}\rho. \tag{28}$$

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. Подставив (28) в (22), получим выражение для максимального контактного давления в данном случае:

$$p_0^{(2)}=\left(160\rho V_0^2\left(\frac{E^*}{\pi}\right)^4\right)^{1/5}. \tag{29}$$

Графическая интерпретация зависимости (29) представлена на рис. 6.

Из формулы (29) следует, что при соударении двух одинаковых плодов максимальное давление зависит от их плотности, а не от размеров и массы. Сравнивая формулы (24) и (29), можно сделать вывод, что наибольшие повреждения получают плоды, которые контактируют при свободном

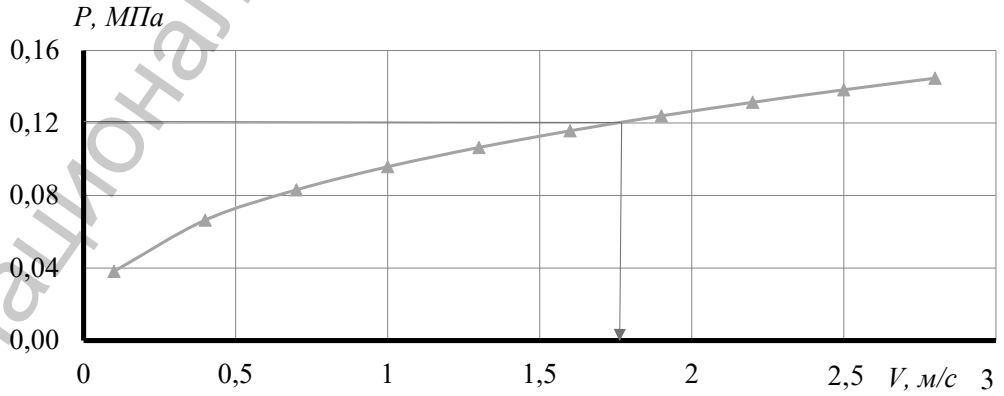

Рис. 6. Зависимость контактного давления от скорости соударения плодов

Fig. 6. Dependence of the contact pressure on the impact speed of fruits

перекатывании на рабочей поверхности. Это происходит потому, что контактное давление при соударении свободных плодов больше, чем давление при ударе плода о плоскую поверхность при одинаковой скорости.

Поэтому при конструировании транспортирующих органов плодоуборочного агрегата основной задачей их функционирования 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 $m_2 = \infty$ (рис. 7). В этом случае согласно формуле (9) $m = m_1$, а R будет приведенной величиной и определится выражением (6).

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

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

В результате преобразований получим

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

Величина функции $f(R)$ в данном случае будет зависеть от соотношения радиусов $k = R_1/R_2$. Чем больше будет значение k, т. е. 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 для этого случая примет вид

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

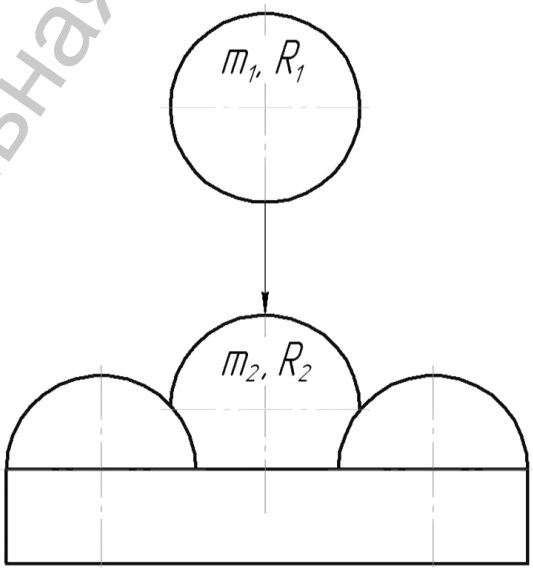

Рис. 7. Расчетная схема удара плода о несвободный плод

Fig. 7. Calculation scheme of the impact of fruit on a non-free fruit

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

Выполненными исследованиями взаимодействия плодов с транспортирующими органами плодоуборочного 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 ($k > 1$). Очевидно, что при транспортировании необходимо избегать подобного рода контактов, так как они почти всегда будут приводить к повреждению плодов и снижению сроков их хранения.

Таблица 3. **Аналитические выражения максимального контактного давления при различных значениях *k***

Table 3. **Analytical expressions for the maximum contact pressure for various values of *k***

$k = R_1/R_2$	Выражение
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 более мелкий. На рис. 8 показана зависимость контактного давления от соотношения радиусов падающего и несвободного плода.

Из графиков видно, что при допустимом контактном давлении на яблоки, равном 0,12 МПа, допустимая скорость падения на поверхность из плотно лежащих плодов составляет: 1,9 м/с при высоте падения 0,183 м и $k = 1/2$. При $k = 1$ значения допустимой скорости и высоты падения составляют 1,25 м/с и 0,08 м, а при $k = 2$ соответственно 0,67 м/с и 0,023 м.

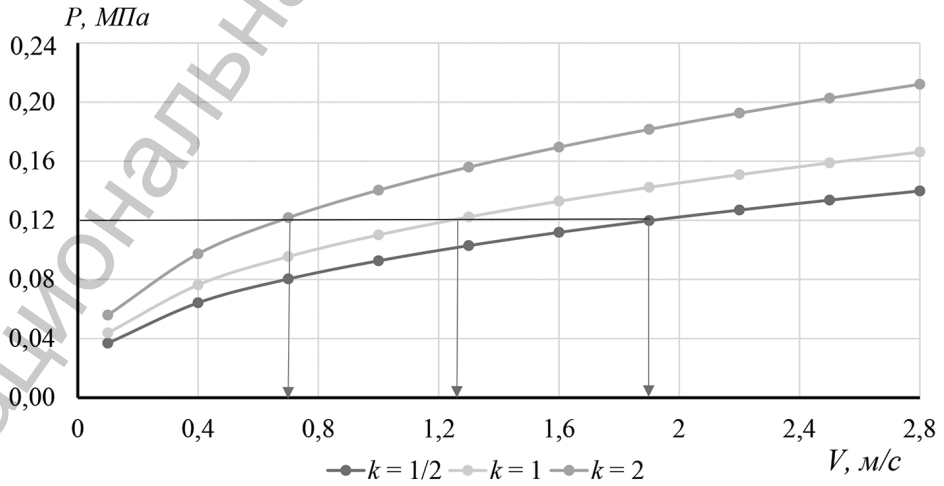

Рис. 8. Зависимость максимального контактного давления от отношения скорости соударения плодов при различных значениях *k*

Fig. 8. Dependence of maximum contact pressure on the ratio of fruit impact velocity for different values of *k*

Выводы. 1. Взаимодействие плодов при уборке в основном может быть представлено тремя видами: удар плода о твердую поверхность, соударение двух свободных плодов и удар плода о поверхность из плотно лежащих плодов.

2. Наибольшие повреждения получают плоды, контактирующие при свободном перекатывании на рабочей поверхности, так как контактное давление при соударении свободных плодов больше, чем давление при ударе плода о плоскую поверхность.

3. Теоретически установленная допустимая скорость падения яблок на поверхность из плотно лежащих плодов составляет 1,9 м/с при высоте падения 0,183 м и соотношении радиусов контактирующих плодов $k = 1/2$, или 1,25 м/с и 0,08 м при $k = 1$, или 0,67 м/с и 0,023 м при $k = 2$.

Список использованных источников

1. Юрин, А. Н. Анализ технологий и технических средств для уборки плодов семечковых культур в промышленных садах / А. Н. Юрин // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 окт. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2020. – С. 136–141.

2. Юрин, А. Н. Агрегат для уборки плодов и обрезки деревьев в садах / А. Н. Юрин, А. А. Лях // С.-х. науч.-техн. и рыноч. информ. – 2013. – № 8. – С. 39–43.

3. Юрин, А. Н. Проблема уборки плодов семечковых и орехоплодных культур с земли и пути ее решения / А. Н. Юрин, В. В. Викторович, А. Д. Чечеткин // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2019. – Вып. 52. – С. 116–120.

4. Юрин, А. Н. Агрегат самоходный универсальный АСУ-6 для уборки плодов и обрезки деревьев в садах интенсивного типа / А. Н. Юрин // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2013. – Вып. 47, т. 1. – С. 218–224.

5. Новые технологии и технические средства для механизации работ в садоводстве / Рос. науч.-исслед. ин-т информ. и технико-экон. исслед. по инженер.-техн. обеспечению агропром. комплекса; подгот.: М. И. Куликов [и др.]. – М.: Росинформагротех, 2012. – 164 с.

6. Ковалев, Н. Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства): учеб. пособие / Н. Г. Ковалев, Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М.: Родник, 1998. – 207 с.

7. Степанова, Е. Г. Реологические свойства яблок при различных способах их обработки / Е. Г. Степанова, В. А. Причко // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. – 1999. – № 5–6. – С. 72–73.

8. Салина, Е. С. Твердость мякоти яблок как индикатор технической степени зрелости для сока / Е. С. Салина, И. А. Сидорова, Н. С. Левгерова // Соврем. садоводство. – 2019. – № 3. – С. 78–84. https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10309

9. Apple damage and compressive forces in bulk bins during orchard transport / E. J. Timm [et al.] // Appl. Engineering in Agriculture. – 1998. – Vol. 14, № 2. – P. 165–172. https://doi.org/10.13031/2013.19366

10. Хоконова, М. Б. Потенциальная лежкоспособность плодов семечковых культур и факторы ее формирования / М. Б. Хоконова // Биология в сел. хо-ве. – 2020. – № 4 (29). – С. 31–34.

11. Menesatti, P. Development of a drop damage index of fruit resistance to damage / P. Menesatti, G. Paglia // J. of Agr. Engineering Research. – 2001. – Vol. 80, № 1. – P. 53–64. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0669

12. Пути дальнейшей модернизации транспортных средств для АПК / Н. В. Бышов [и др.] // Науч. журн. КубГАУ. – 2016. – № 123 (09). – С. 142–168.

13. Умаров, Г. Г. Удаления загрязнений с яблок / Г. Г. Умаров, А. Т. Теловов // Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы: материалы VI Междунар. науч.-практ. онлайн-конф., 25 нояб. 2020 г. / Майкоп. гос. технол. ун-т ; гл. ред. Н. И. Мамсиров. – Майкоп, 2020. – С. 554–556.

14. Garcia-Ramos, F. J. Analysis of the factors implied in the fruit-to-fruit impacts on packing lines / F. J. Garcia-Ramos, J. Ortiz-Canavate, M. Ruiz-Altisent // Appl. Engineering in Agriculture. – 2004. – Vol. 20, № 5. – P. 671–675. https://doi.org/10.13031/2013.17447

15. Бароев, Д. К. Влияние механизированной уборки яблок машиной МПУ-1 на состояние деревьев / Д. К. Бароев // Научное обеспечение сельского хозяйства горных и предгорных территорий: материалы II Всерос. студенч. науч.-практ. конф., Владикавказ, 25 нояб. 2021 г.: в 2 ч. / Горс. гос. аграр. ун-т; гл. ред. В. Х. Темираев. – Владикавказ, 2021. – Ч. 2. – С. 184–185.

16. Колеснов, А. Ю. Современные способы обеспечения управляемого качества продукции в технологиях выращивания и хранения фруктов и овощей / А. Ю. Колеснов, М. А. Зенина // Пищевая пром-сть. – 2015. – № 5. – С. 14–19.

References

1. Yurin A. N. Analysis of technologies and equipment for the harvesting of pome fruits in industrial orchards. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Minsk, 22–23 oktyabrya 2020 g.)* [Scientific and technical progress in agricultural production: proceedings of the international scientific and technical conference (Minsk, October 22–23, 2020)]. Minsk, 2020, pp. 136–141 (in Russian).

2. Yurin A. N., Lyakh A. A. A unit for harvesting fruits and pruning trees in gardens. *Sel'skokhozyaistvennaya nauchno-tekhnicheskaya i rynochnaya informatsiya* [Agricultural Scientific-Technical and Market Information], 2013, no. 8, pp. 39–43 (in Russian).

3. Yurin A. N., Viktorovich V. V., Chechetkin A. D. The problem of harvesting pomegranate and nut crops from the ground and ways to solve it. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi temataticheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental thematic collection]. Minsk, 2019, iss. 52, pp. 116–120 (in Russian).

4. Yurin A. N. Self-propelled all-purpose unit ASU-6 for harvesting fruits and pruning trees in the gardens of intensive type. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi temataticheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental thematic collection]. Minsk, 2013, iss. 47, pt. 1, pp. 218–224 (in Russian).

5. Kulikov M. I., Vorob'ev V. F., Kosyakin A. S., Bychkov V. V., Kadykalo G. I., Upadysheva G. Yu. (comp.) (et al.). *New technologies and technical means for the mechanization of work in horticulture*. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2012. 164 p. (in Russian).

6. Kovalev N. G., Khailis G. A., Kovalev M. M. *Agricultural materials (types, composition, properties).* Moscow, Rodnik Publ., 1998. 207 p. (in Russian).

7. Stepanova E. G., Prichko V. A. Rheological properties of apples when processed in different ways. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya = News of Institutes of Higher Education. Food Technology*, 1999, no. 5–6, pp. 72–73 (in Russian).

8. Salina E. S., Sidorova I. A., Levgerova N. S. Apple fruit firmness as an indicator of technical maturity for juice. *Sovremennoe sadovodstvo = Contemporary Horticulture*, 2019, no. 3, pp. 78–84 (in Russian). https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10309

9. Timm E. J., Bollen A. F., Rue B. T. D., Woodhead I. M. Apple damage and compressive forces in bulk bins during orchard transport. *Applied Engineering in Agriculture*, 1998, vol. 14, no. 2, pp. 165–172. https://doi.org/10.13031/2013.19366

10. Khokonova M. B. Potential passing capacity of fruit seed crops and factors of its formation. *Biologiya v sel'skom khozyaistve = Biology in Agriculture*, 2020, no. 4 (29), pp. 31–34 (in Russian).

11. Menesatti P., Paglia G. Development of a drop damage index of fruit resistance to damage. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, vol. 80, no. 1, pp. 53–64. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0669

12. Byshov N. V., Borychev S. N., Uspenskiy I. A., Yukhin I. A., Ryabchikov D. S., Kulik S. N. Ways of further modernization of vehicles for an agroindustrial complex. *Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2016, no. 123 (09), pp. 142–168 (in Russian).

13. Umarov G. G., Telovov A. T. Removing contaminants from apples. *Nauka, obrazovanie i innovatsii dlya APK: sostoyanie, problemy i perspektivy: materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi onlain-konferentsii, 25 noyabrya 2020 g.* [Science, education and innovation for the agro-industrial complex: state, problems and prospects: proceedings of the VI International scientific and practical online conference, November 25, 2020]. Maykop, 2020, pp. 554–556 (in Russian).

14. Garcia-Ramos F. J., Ortiz-Canavate J., Ruiz-Altisent M. Analysis of the factors implied in the fruit-to-fruit impacts on packing lines. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, vol. 20, no. 5, pp. 671–675. https://doi.org/10.13031/2013.17447

15. Baroev D. K. Influence of mechanized harvesting of apples by machine MPU-1 on the condition of trees. *Nauchnoe obespechenie sel'skogo khozyaistva gornykh i predgornykh territorii: materialy II Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Vladikavkaz, 25 noyabrya 2021 g.* [Scientific support of agriculture in mountainous and foothill areas: proceedings of the II All-Russian student scientific and practical conference, Vladikavkaz, November 25, 2021]. Vladikavkaz, 2021, pt. 2, pp. 184–185 (in Russian).

16. Kolesnov A., Zenina M. Modern methods of managed product quality in technologies of cultivation and storage of fruit and vegetables. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Processing Industry*, 2015, no. 5, pp. 14–19 (in Russian).

Информация об авторах

Казакевич Петр Петрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: oan2011@mail.ru. http://orcid.org/0000-0002-9102-2816

Юрин Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anton-jurin@rambler.ru. http://orcid.org/0000-0001-9348-8110

Information about the authors

Petr P. Kazakevich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Ph. D. (Engineering), Professor, Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oan2011@mail.ru. http://orcid.org/0000-0002-9102-2816

Anton N. Yurin – Ph. D. (Engineerig), Associate Professor, Head of the Laboratory, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1, Knorina Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anton-jurin@rambler.ru. http://orcid.org/0000-0001-9348-8110