

А. Н. Юрин*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»**г. Минск, Республика Беларусь**E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА СОРТИРОВАНИЯ ПЛОДОВ

Аннотация. В статье в общем виде рассмотрена автоматизированная сортировка плодов как процесс, состоящий из подачи плодов, классификации и механического разделения. Установлено, что подача плодов призвана решать вопросы формирования потока и транспортирования плодов, классификация – обнаружения и распознавания структуры плода и принятия решения, а механическое разделение потока – смену направления движения плодов.

Анализ физических параметров показал, что размеры яблок сортов «Имант», «Вербное» и «Глостер» подчиняются закону нормального распределения. При этом минимальный размер плода составляет 45 мм, а наибольший – 95 мм, что неизбежно приводит к образованию «двоек» плодов при формировании потока.

Анализ вероятности появления возможных «двоек» плодов с учетом агротехнических требований позволил обосновать модель автоматизированного процесса сортирования плодов, при котором двойки плодов относятся к более высокому сорту.

Результаты исследований применены РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» при разработке технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4.

Ключевые слова: подача, формирование потока, транспортирование, классификация плодов, обнаружение признаков, распознавание структуры, принятие решений, механическое разделение, «двойки» плодов, модель сортирования, исходное состояние, качественный плод, некачественный плод, сорт яблок.

A. N. Yurin*RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”**Minsk, Republic of Belarus**E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

JUSTIFICATION OF THE MODEL OF THE AUTOMATED PROCESS SORTING FRUIT

Abstract. The article generally considers automated sorting of fruits as a process consisting of fruit feeding, classification and mechanical separation. It has been established that the supply of fruits is designed to solve the issues of the formation and transportation of fruits, classification – detection and recognition of the structure of the fruit and decision making, and the mechanical separation of the flow – impact and change in the direction of movement of the fruits. The analysis of physical parameters showed that the sizes of apple varieties “Imant”, “Verbnoe” and “Gloster” obey the law of normal distribution. At the same time, the minimum size of the fruit is 45 mm, and the largest is 95 mm, which inevitably leads to the formation of “twos” of fruits during the formation of the flow. An analysis of the probability of the appearance of possible “twos” of fruits, taking into account agrotechnical requirements, made it possible to substantiate a model of an automated fruit process in which twos of fruits belong to a higher grade. The results of the research were applied by the Republican Unitary Enterprise “NPC of the National Academy of Sciences of Belarus for the mechanization of agriculture” in the development of a technological line for sorting and packing apples LSP-4.

Keywords: feeding, flow formation, transportation, fruit classification, feature detection, structure recognition, decision making, mechanical separation, fruit “twos”, sorting model, initial state, quality fruit, poor quality fruit, apple variety.

Введение

Потери плодов от уборки и до момента поступления к конечному потребителю составляют до 30 %. Это вызывает потребность в их сортировании. В настоящее время контроль качества пло-

дов – процесс мало механизированный, и на его выполнение приходится до 70 % всех трудозатрат товарной обработки плодов [1–4].

В процессе сортировки учитываются размер плодов, их цвет, наличие повреждений от болезней, вредителей и механического воздействия.

Качественное выполнение данной работы возможно лишь опытным специалистом-сортировщиком вручную. Плоды при этом подвергаются минимальному механическому травмированию. Однако производительность работ при ручной сортировке на три товарных сорта составляет 40–70 кг/ч [1].

В 2019 г. в общественном секторе республики произведено более 157,3 тыс. т яблок. Для осуществления их сортировки требуются трудозатраты в количестве 24,5 тыс. чел.-дн. [2]. С учетом складывающегося дефицита рабочих в сельском хозяйстве актуально внедрение в производство средств механизации и автоматизации, облегчающих или полностью исключаящих ручной труд при сортировке плодов.

Из всех известных средств автоматизации, предназначенных для сортирования плодов, наиболее качественно этот процесс может быть выполнен только оптическими средствами контроля на основе системы технического зрения (в дальнейшем – СТЗ).

В связи с этим создание технического средства с СТЗ, позволяющего определить качество поверхности плода без его повреждения, подобно тому, как это делает человек [4–8], является важной агроинженерной задачей.

Основная часть

Обоснование модели сортирования плодов. Первым этапом при создании СТЗ является определение модели функционирования, определяющей в дальнейшем алгоритм работы системы и технические возможности.

Любое устройство для автоматической сортировки плодоовощной продукции должно выполнять процессы подачи плодов, классификации и разделения. В зависимости от целей сортировки, вида продукции и требований к выходной продукции каждый из этих процессов может иметь свои особенности, поэтому при анализе разделим их на подпроцессы.

Так, подачу плодов рассмотрим как формирование потока и транспортирование, классификацию – как обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений на основе заложенных в «память» предписаний, а процесс механизированного разделения – как подпроцессы взвода исполнительного механизма, удара и движения объекта после него (рис. 1).

Тогда сортировка может быть представлена в виде случайных процессов [1].

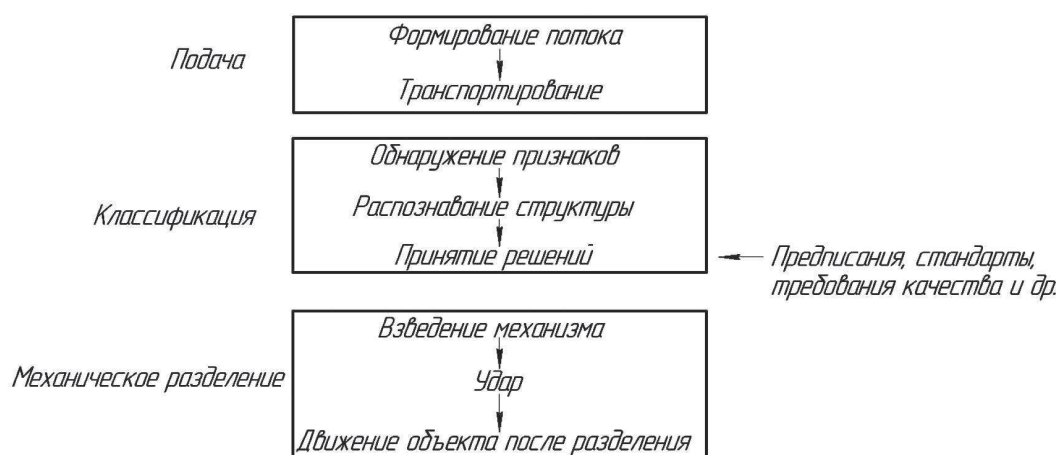


Рис. 1. Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству

Процессы, представленные на рис. 1, могут быть описаны следующим образом с пятью состояниями: S_1 – исходное, S_2 – классификация объекта как качественного, S_3 – классификация объекта

как некачественного, S_4 – перемещение объекта к группе качественных плодов, S_5 – перемещение объекта к группе некачественных плодов (рис. 2).

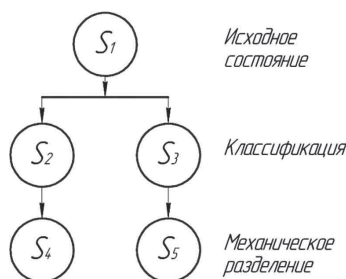


Рис. 2. Упрощенная модель процесса сортировки плодов

В то же время при формировании потока из-за большой вариации размерных характеристик плодов в зону контроля могут одновременно попадать два объекта («двойки») в различных сочетаниях: «качественный-некачественный», «качественный-качественный», «некачественный-некачественный».

Тогда модель процесса автоматической сортировки плодов будет включать 18 состояний и будет выглядеть следующим образом (рис. 3).

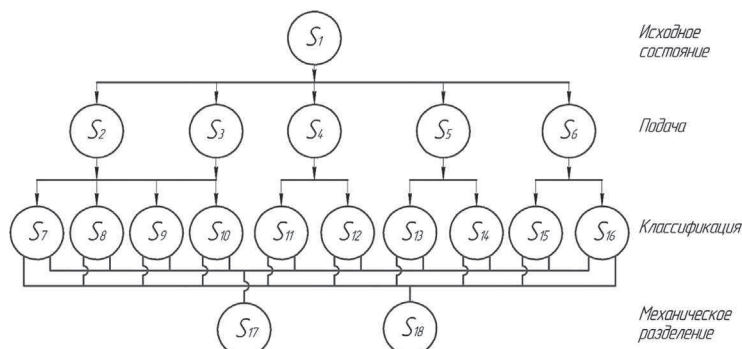


Рис. 3. Модель процесса сортировки плодов с учетом появления «двоек»

В приведенной модели S_1 – исходное состояние; S_2 – одиночный качественный плод; S_3 – одиночный некачественный плод; S_4 – два качественных плода; S_5 – два некачественных плода; S_6 – качественный-некачественный плод; S_7 – S_{16} – классификация плодов на классы, где четные – некачественные плоды, а нечетные – качественные; S_{17} – перемещение плода в качественные; S_{18} – перемещение плода в некачественные.

В связи с тем, что состояния классификации «качественные плоды» совпадают, их можно объединить. Тогда модель процесса сортировки примет вид (рис. 4).

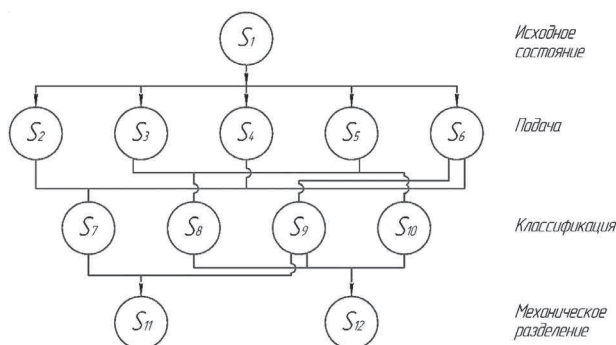


Рис. 4. Модель сортирования плодов по качеству на два класса

На рис. 3 и 4 состояния S_1 – S_6 одинаковы. Состояние S_7 обозначает «качественные плоды» для одиночных и сдвоенных плодов, S_8 – «некачественные» плоды для одиночных плодов, S_9 – «некачественные» плоды для двоек «качественный-некачественный плод», S_{10} – «некачественные» плоды для двоек некачественных плодов. Состояния S_{11} и S_{12} соответствуют разделению плодов на «качественные» и «некачественные».

В Республике Беларусь плоды, поступающие в розничную торговлю, должны соответствовать СТБ 2288-2012 «Яблоки свежие, поздних сроков созревания. Технические условия» [8]. Данный стандарт предусматривает разделение плодов на три сорта: высший, первый и второй. В процессе же сортировки плодов необходимо выделение ещё одной группы плодов, к которой относятся яблоки, не соответствующие ни одному из ранее указанных сортов, – бессортные (в дальнейшем – б/с).

Тогда модель сортирования яблок по качеству на 4 класса будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

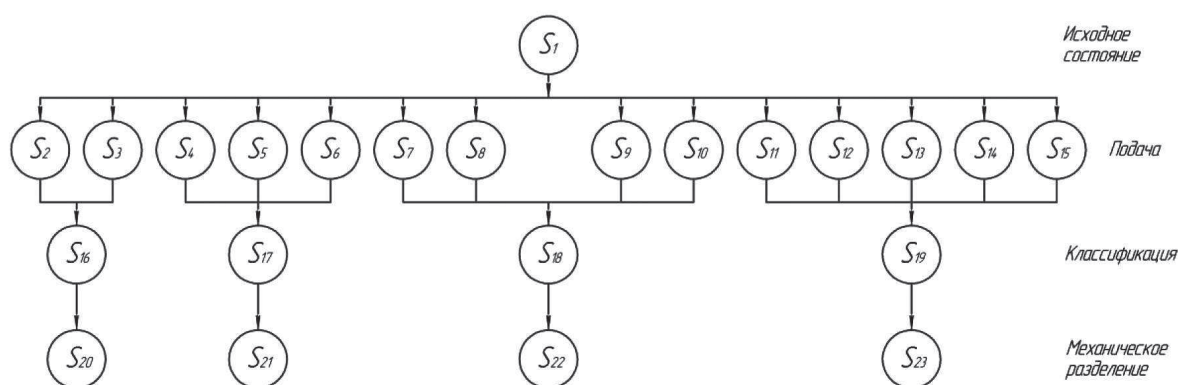


Рис. 5. Модель сортирования яблок по качеству на четыре класса с отнесением «двоек» к более низкому сорту

В данной модели S_1 – исходное состояние; S_2 и S_3 – это одиночный плод высшего сорта и «двойка» плодов высшего сорта; S_4 и S_5 – это одиночный плод первого сорта и «двойка» плодов первого сорта; S_6 – это «двойка» плодов первого и второго сортов; S_7 и S_8 – это одиночный плод второго сорта и «двойка» плодов второго сорта; S_9 и S_{10} – это «двойки» плодов из первого-второго и высшего-второго сортов; S_{11} и S_{12} – это одиночный и парные б/с плоды; S_{13} , S_{14} , S_{15} – это «двойки» из пар первый-б/с, второй-б/с и высший-б/с плоды; S_{16} – S_{19} – классификация одиночных и «двоек» плодов на высший, первый, второй сорта и б/с; S_{20} – S_{23} – механическое разделение плодов на высший, первый, второй сорта и б/с.

При внедрении данной модели все «двойки» плодов будут относиться к сорту, соответствующему более низкому сорту плода из рассматриваемой «двойки». То есть пара «высший-первый» будет отнесена к первому сорту, пара «первый-второй» – ко второму сорту и так далее.

Такой подход позволит получать плоды высшего и первого сорта без «примесей», т.е. более высокого качества. Однако потери плодов высокого качества при определенных условиях могут быть значительными.

В то же время в СТБ 2288-2012 оговаривается допустимое количество примесей плодов, не относящихся к данному сорту.

Так в яблоках высшего сорта не допускается присутствие яблок второго сорта и бессортных, а в яблоках первого сорта – только бессортных. При этом в высшем сорте допускается присутствие яблок первого сорта не более 10% по размеру и не более 5% по остальным показателям качества. Для яблок первого сорта допустимое количество плодов второго сорта – не более 10% по всем показателям качества. Для плодов второго сорта количество бессортных яблок должно быть не более 10% по всем показателям качества.

Очевидно, что при соблюдении указанных условий «двойки» плодов могут быть отнесены к более высокому сорту плодов.

С учетом этого модель сортирования яблок по качеству может быть представлена следующим образом (рис. 6).

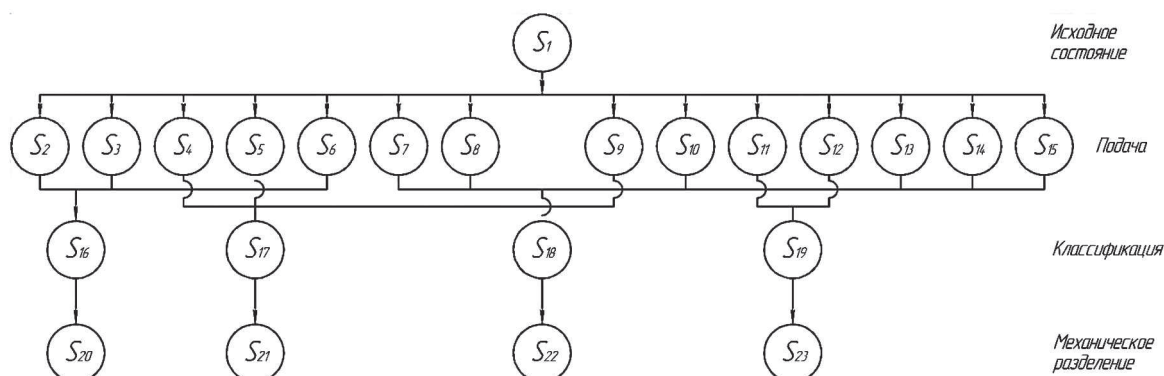


Рис. 6. Модель сортирования яблок по качеству на четыре класса с отнесением «двоек» к более высокому сорту

Для определения возможности использования данной модели необходимо выполнить анализ размерных характеристик плодов и определить вероятность появления различных вариантов «двоек» плодов.

Анализ размеров плодов сортов «Имант», «Глостер» и «Вербное» в процессе поисковых исследований показал (табл. 1), что размер плодов подчиняется нормальному закону распределения Гаусса, для которого плотность вероятности распределения размеров:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где X , m_x , σ – размер, математическое ожидание и разброс размеров плодов.

Таблица 1. Физические характеристики плодов

Наименование показателей	Значение показателей		
Сорт яблок	«Имант»	«Глостер»	«Вербное»
Содержание плодов в исходном материале (по размеру), %			
– 0–65 мм	22,9	17,5	0
– 65–78 мм	69,5	60,7	27,1
– 78–100 мм	7,6	21,8	72,9
– более 100 мм	0	0	0
Характеристика плодов:			
– средний диаметр, мм	70	75	82
– средняя высота, мм	62	67	71
– средняя масса, г	152	188	227
– максимальный диаметр, мм	85	92	95
– минимальный диаметр, мм	45	45	45

При этом размер плодов изменяется в широких пределах. Так минимальный размер плодов составляет 45мм, а максимальный – 95 мм.

Для обеспечения автоматической сортировки необходимо решение задачи поштучной подачи плодов, которая сводится к прохождению плода через заданную ячейку. При этом через нее должен пройти любой плод, только два плода одновременно пройти не должны. Такая ячейка может быть описана постоянной плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{h_b - h_n}, \quad (2)$$

где $f(x)$ – плотность распределения вероятности пропускной способности ячейки; h_b, h_n – верхняя и нижняя границы пропускной способности ячейки.

Плотность распределения вероятности выстраивания плодов по одному в общем случае может быть определена как плотность распределения системы независимых случайных величин $p(x)$ и $f(x)$. Вероятность выстраивания по одному в общем случае может быть определена по формуле:

$$P_{\text{ед}} = \int_{h_n}^{h_b} p(x) f(x) dx. \quad (3)$$

Для нормального закона распределения плотности вероятности выстраивания плодов $p(x)$ с учетом выражения (3) вероятность выстраивания плодов имеет вид:

$$P_{\text{ед}} = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{h_b - m_x}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{m_x - h_n}{\sigma} \right) \right],$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt$.

Из выражения (4) вытекает, что наложение функции $p(x)$ и $f(x)$ позволяет выявить три области: от 0 до h_n – вероятность выстраивания плодов по два и более, от h_n до h_b – поштучно, от h_b до ∞ – вероятность, что плод не пройдет через ячейку из-за большого размера, то есть возможен затор. Плоды небольших размеров, оказываясь одновременно в зоне поштучного формирования, могут образовывать «двойки», то есть проходить по два сразу. Считая, что одновременно можно наблюдать в зоне контроля не более двух плодов, вероятность появления «двоек» можно определить по формуле:

$$P_{\text{дв}} = \left[k_{\text{дв}} \int_0^{h_n} p(x) dx \right]^2, \quad (4)$$

где $k_{\text{дв}}$ – коэффициент появления «двойки».

В расчетах принимаем $k_{\text{дв}} = 1$.

В связи с тем, что плоды размерами, близкими к h_b , с трудом проходят через формирующее устройство, получается много «пропусков», то есть интервал между плодами дискретно меняется от Δ до $n\Delta$ (где $n = 2, 3, \dots$). Это снижает плотность потока и производительность. Поэтому целесообразно соблюдать условие:

$$h_b \approx (1,1 \dots 1,2) x_{\text{max}}.$$

Исходя из выражения 2, можно h_b определить с учетом дисперсии:

$$h_b = m + \epsilon \sigma$$

где ϵ – число, определяющее доверительный интервал в сторону максимума.

Соответственно:

$$h_n = \frac{h_b}{2} = \frac{m + \epsilon \sigma}{2}.$$

С другой стороны, для систем поштучной подачи по одному признаку:

$$h_n \leq x_{\text{min}} = m - \ddot{\epsilon} \sigma,$$

где $\ddot{\epsilon}$ – число, определяющее доверительный интервал в сторону максимума.

Исходя из изложенного, принимаем размер ячейки устройства для формирования потока $h_b = 10,5$ см.

При таком размере ячейки возможно формирование следующих «двоек» плодов (табл. 2), вероятность возникновения которых в соответствии определялась по зависимости (4):

Таблица 2. Вероятность возникновения «двоек» плодов

Номер	Диаметры плодов из «двойки», мм	Вероятность возникновения «двоек» для яблок сортов		
		«Имант»	«Глостер»	«Вербное»
1	45 и 60	0,01	0,009	0,009
2	45 и 55	0,003	0,0032	0,0034
3	45 и 50	0,001	0,0085	0,0088
4	45 и 45	0,001	0,0009	0,0009
5	50 и 55	0,003	0,0037	0,0038
6	50 и 50	0,001	0,009	0,009

В соответствии с СТБ 2288-2012 к высшему сорту могут быть отнесены яблоки диаметром более 60 мм, чему удовлетворяет пара №1 с вероятностью появления не более 1%. К первому сорту относятся плоды диаметром 50–60 мм, что соответствует парам № 2, 3, 5, 6, что дает суммарную вероятность возникновения данных «двоек» не более 2,5 %.

Таким образом, количество примесей в плодах высшего сорта не превысит 1%, в плодах первого сорта – не более 2,5%, а в плодах второго сорта – не более 1%.

С учетом этого, наиболее рациональной для автоматической сортировки является модель с делением плодов на четыре сорта и отнесением «двоек» к более высокому сорту, изображенная на рис. 6.

Реализация результатов исследований. На основе проведенных исследований в РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» разработана технологическая линия сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 [9–11].

Приемочные испытания линии проходили в ОАО «Остромечево» Брестского района, аг. Остромечево в 2020–2021 годах. По результатам приёмочных испытаний технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 получен протокол № 004-1/3-2022 от 25 февраля 2022 года [9].

Анализ проведенных испытаний показал, что технологическая линия в общем соответствует требованиям технического задания и обеспечивает качественное выполнение технологического процесса сортировки яблок по размеру и наличию дефектов от механических повреждений, болезней и вредителей. При этом точность сортирования плодов по размеру составила 75,4 %, а точность сортирования по размеру и наличию дефектов – 73,1 %, что подтверждает правильность выбора модели функционирования автоматизированной системы сортирования плодов.

Заключение

1. Размерные характеристики яблок сортов «Имант», «Вербное» и «Глостер» подчиняются нормальному закону распределения Гаусса.
2. Вследствие большой вариации размерных характеристик плодов при автоматизированной сортировке неизбежно образование «двоек», при которых в зону контроля одновременно попадают два объекта в различных сочетаниях качества.
3. На основе анализа вероятности возникновения «двоек» и требований к качеству плодов обоснована модель процесса автоматической сортировки яблок на четыре класса с отнесением «двоек» к более высокому сорту.

Список использованных источников

1. Старовойтов, В. И. Автоматизация контроля качества картофеля, овощей и плодов / В. И. Старовойтов, А. М. Башилов, А.Л. Андержанов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 197 с.
2. Юрин, А. Механизация трудоемких процессов в садоводстве [Электронный ресурс] / А. Юрин, Д. Жданко // Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Режим доступа: <https://belagromech.by/articles/mechanizatsiya-trudoeemkih-protseessov-v-sadovodstve/>. – Дата доступа: 30.04.2018.

3. Юрин, А. Н. Актуальность проблемы дефицита плодов и ягод в Республике Беларусь и пути ее решения / А. Н. Юрин, А. А. Игнатчик, В. В. Викторovich. // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-тех. конф., Минск, 17–18 октября 2019 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2019. – С. 89–95.
4. Развитие технических средств для возделывания многолетних насаждений в садоводстве России и Беларуси [Электронный ресурс] / Я.П. Лобачевский [и др.] // Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Режим доступа: <https://belagromech.by/articles/razvitie-tehnicheskikh-sredstv-dlya-vozdelyvaniya-mnogoletnih-nasazhdenij-v-sadovodstve-rossii-i-belarusi/> – Дата доступа: 30.04.2018.
5. Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П. В. Балабанов [и др.] // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–23 окт. 2020 г. : в 2 т. / Тамб. гос. техн. ун-т [и др.]. – Тамбов, 2020. – Т. 2. – С. 44–47.
6. Применение методов люминесцентного анализа в системах технического зрения при сортировании плодов / М. В. Кирина [и др.] // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10–12 нояб. 2014 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 188–191.
7. Использование систем технического зрения для качественной сортировки плодов персика по окраске. (Иран) / A. Esehaghbeygi, M. Ardforoushan, S.A.H. Monajemi, A.A. Masoumi Digital image processing for quality ranking of saffron peach // Intern. Agrophysics. – 2010. – Vol.24. – N 2. – P. 115–120.
8. Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия: СТБ 2288-2012. – Введ. 08.11.12. – Минск : Госстандарт, 2012. – 11 с.
9. Протокол приемочных испытаний линии технологической сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 от 25 февр. 2022 г. № 004-1/3-2022 / ИЦ ГУ «Белорусская МИС». – п. Привольный, 2022. – 99 с.
10. Юрин, А.Н. Снижение затрат труда применением системы технического зрения при сортировке яблок / А. Н. Юрин, В. В. Викторovich, А. А. Игнатчик // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2022. – Вып. 55. – С. 88–95.
11. Казакевич, П. П. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин, Г. А. Прокопович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 488–500.

УДК 631.542

Поступила в редакцию 19.10.2022
Received 19.10.2022

А. Н. Юрин

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТВЕЙ ПЛОДОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ

Аннотация. В данной статье проведено исследование основных физико-механических свойств и размерных характеристик ветвей яблонь сортов Глоустер и Ред Принц.

Ключевые слова: яблоня, распределение, обрезка, крона, ветви, диаметр, угол наклона, прогиб ветвей.

A. N. Yurin

*RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

STUDIES OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF FRUIT TREE BRANCHES

Abstract. In this article, a study was made of the main physical and mechanical properties and dimensional characteristics of the branches of apple trees of the Gloucester and Red Prince varieties.

Keywords: apple tree, distribution, pruning, crown, branches, diameter, angle of inclination, deflection of branches.