

Научная статья

УДК 634:631.353.73

doi: 10.55196/2411-3492-2024-2-44-98-109

## Математическое моделирование процесса работы подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых насаждений

Луан Мухажевич Хажметов<sup>✉1</sup>, Тимур Муаедович Апхудов<sup>2</sup>, Аслан Узенирович Заммоев<sup>3</sup>,  
Инал Олегович Макуашев<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

<sup>3</sup>Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного садоводства,  
ул. Шарданова, 23, Нальчик, Россия, 360004

<sup>✉1</sup>hajmetov@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5830-4355>

<sup>2</sup>aphudov75@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9304-1324>

<sup>3</sup>zammoev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

<sup>4</sup>07energokbr@mail.ru

**Аннотация.** Регулярно проводимая обрезка плодовых деревьев является существенной предпосылкой повышения урожайности и качества плодов. Уборка и утилизация срезаемых ветвей плодовых насаждений в садах являются обязательными операциями технологического процесса производства плодов. В то же время они сопряжены с большими материальными и трудовыми затратами, вызванными низким уровнем механизации и малой эффективностью используемых технологий. Наиболее перспективной является использование срезанных ветвей в измельченном виде для мульчирования почвы. Это способствует накоплению и сохранению влаги в почве, обогащению ее органическим веществом, элементами минерального питания, улучшению агрофизических свойств и в конечном итоге вовлечению отчуждаемой древесины в круговорот веществ без ущерба для экологии. Для реализации указанной технологии утилизации древесных отходов была предложена конструкция подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых насаждений, оснащенная двумя ступенями роторных двухвалковых измельчителей. Отсутствие достаточных данных о процессах взаимодействия рабочих органов измельчителей со срезанными ветвями плодовых насаждений препятствует совершенствованию машины и ее широкому внедрению в сельскохозяйственное производство. Цель исследования – разработка математической модели процесса работы подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых насаждений. Предмет исследования – процесс измельчения срезанных ветвей плодовых насаждений двухвалковым роторным измельчителем в древесную мульчу. Исследования проведены с использованием методов классической механики, физического и математического моделирования. Объект исследования – роторный двухвалковый измельчитель. Математическое моделирование процесса работы подборщика-измельчителя позволило установить кинематические параметры движения рабочего органа измельчителя и рациональные параметры переднего  $\delta_n = -5^\circ \dots -15^\circ$  и заднего углов заточки ножа  $\delta_z = 60^\circ - 70^\circ$ , радиуса  $R$  режущей кромки ножа 75-125 мм, окружной скорости режущей кромки ножа  $v_0 = 8-12$  м/с, скорости резания ветвей 10-12 м/с, скорости подачи ветвей  $v_n = 1,4-2,1$  м/с, зазора между режущей кромкой ножа и валом противоположенного ротора  $s = 0,003$  м.

**Ключевые слова:** садоводство, плодовые деревья, обрезка, подбор, измельчение, двухвалковый роторный измельчитель, моделирование, кинематические параметры, режимы работы

**Для цитирования.** Хажметов Л. М., Апхудов Т. М., Заммоев А. У., Макуашев И. О. Математическое моделирование процесса работы подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых насаждений // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова, 2024. № 2(44). С. 98–109. doi: 10.55196/2411-3492-2024-2-44-98-109

Original article

## Mathematical modeling of the process of operation of a picker-chopper of cut branches of fruit trees

Luan M. Khazhmetov<sup>✉1</sup>, Timur M. Apkhudov<sup>2</sup>, Aslan U. Zammoev<sup>3</sup>, Inal O. Makuashev<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1 v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

<sup>3</sup>North Caucasus Scientific Research Institute of Mountain and Foothill Horticulture, 23 Shardanov Street, Nalchik, Russia, 360004

<sup>✉1</sup>hajmetov@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5830-4355>

<sup>2</sup>aphudov75@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9304-1324>

<sup>3</sup>zammoev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

<sup>4</sup>07energokbr@mail.ru

**Abstract.** Regular pruning of fruit trees is an essential prerequisite for increasing the yield and quality of the fruit. Cleaning and disposal of cut branches of fruit plants in orchards are mandatory operations in the technological process of fruit production. At the same time, they are associated with high material and labor costs caused by the low level of mechanization and low efficiency of the technologies used. The most promising is the use of cut branches in crushed form for mulching the soil. This contributes to the accumulation and preservation of moisture in the soil, enriching it with organic matter, mineral nutrition elements, improving agrophysical properties and ultimately involving alienated wood in the cycle of substances without harming the environment. To implement this technology for recycling wood waste, a design was proposed for a pick-up chopper of cut branches of fruit trees, equipped with two stages of rotary twin-roll choppers. The lack of sufficient data on the processes of interaction between the working parts of shredders and cut branches of fruit trees hinders the improvement of the machine and its widespread introduction into agricultural production. The purpose of the study is to develop a mathematical model of the operation process of a picker-chopper of cut branches of fruit trees. The subject of the study is the process of crushing cut branches of fruit trees using a two-roll rotary chopper into wood mulch. The research was carried out using methods of classical mechanics, physical and mathematical modeling. The object of study is a rotary two-roll grinder. Mathematical modeling of the operation process of the pick-up chopper made it possible to establish the kinematic parameters of the movement of the chopper working body and the rational parameters of the front  $\delta_n = -5^\circ \dots -15^\circ$  and rear sharpening angles of the knife  $\delta_s = 60^\circ - 70^\circ$ , the radius  $R$  of the cutting edge of the knife 75-125 mm, the peripheral speed of the cutting edge of the knife  $v_0 = 8-12$  m/s, the cutting speed of branches 10-12 m/s, feed speed of branches  $v_n = 1,4-2,1$  m/s, gap between the cutting edge of the knife and the shaft of the opposite rotor  $s = 0,003$  m.

**Keywords:** gardening, fruit trees, pruning, selection, grinding, twin-roll rotary grinder, modeling, kinematic parameters, operating modes

**For citation.** Khazhmetov L.M., Apkhudov T. M. Zammoev A.U., Makuashev I.O. Mathematical modeling of the process of operation of a picker-chopper of cut branches of fruit trees. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;2(44):98–109. (in Russ.).

doi: 10.55196/2411-3492-2024-2-44-98-109

**Введение.** Сады отличаются рядом положительных хозяйственных и технологических качеств, и их выращивание представляет собой важную народно-хозяйственную задачу. Садоводство выполняет не только продовольственные и лечебно-профилактические функции, но и социально-экономические.

Регулярно проводимая обрезка плодовых деревьев является существенной предпосылкой повышения урожайности и качества плодов. В то же время отходы фитомассы при обрезке плодовых деревьев, в зависимости от возраста и биологических особенностей сорта, могут составлять от 3 до 20 и более тонн

на гектар. Уборка и утилизация срезанного древесного материала в садах являются обязательными операциями технологического процесса производства плодов. В то же время они сопряжены с большими материальными и трудовыми затратами, вызванными низким уровнем механизации и малой эффективностью используемых технологий [1].

Наиболее простым, рациональным и перспективным является использование срезанных ветвей в измельченном виде для мульчирования почвы. Это способствует накоплению и сохранению влаги в почве, обогащению ее органическим веществом, элементами минерального питания, улучшению агрофизических свойств и в конечном итоге вовлечению отчуждаемой древесины в круговорот веществ без ущерба для экологии [2–7].

Для реализации указанной технологии утилизации древесных отходов была предложена конструкция подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых деревьев, оснащенная двумя ступенями роторных двухвалковых измельчителей [8]. Отсутствие достаточных данных о процессах взаимодействия рабочих органов измельчителей со срезанными ветвями плодовых насаждений препятствует совершенствованию машины и ее широкому внедрению в сельскохозяйственное производство. Поэтому моделирование процесса измельчения срезанных ветвей плодовых насаждений является актуальной.

**Цель исследования** – разработка математической модели процесса работы подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых насаждений.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Предмет исследования – процесс измельчения срезанных ветвей плодовых насаждений двухвалковым роторным измельчителем в древесную мульчу. Исследования проведены с использованием методов классической механики, физического и математического моделирования. Объект исследования – роторный двухвалковый измельчитель.

**Результаты исследования.** Исследованию процесса измельчения срезанных ветвей плодовых насаждений измельчительными машинами посвящены работы Шомахова Л. А., Долгова И. А., Кротова А. М., Медов-

ника А. Н., Токарева В. Г., Завражнова А. И., Манаенкова К. А., Ланцева В. Ю. и др. [5, 9–12].

Технологический процесс, выполняемый подборщиком-измельчителем срезанных ветвей плодовых насаждений, состоит из следующих стадий (рис. 1) [13, 14]:

1. Подбор и подача подборщиком из междурядья сада срезанных ветвей плодовых деревьев к подающим вальцам;

2. подача срезанных ветвей подающими вальцами на первую ступень измельчительного устройства;

3. Измельчение срезанных ветвей первой ступенью измельчителя;

4. Доизмельчение срезанных ветвей второй ступенью измельчителя;

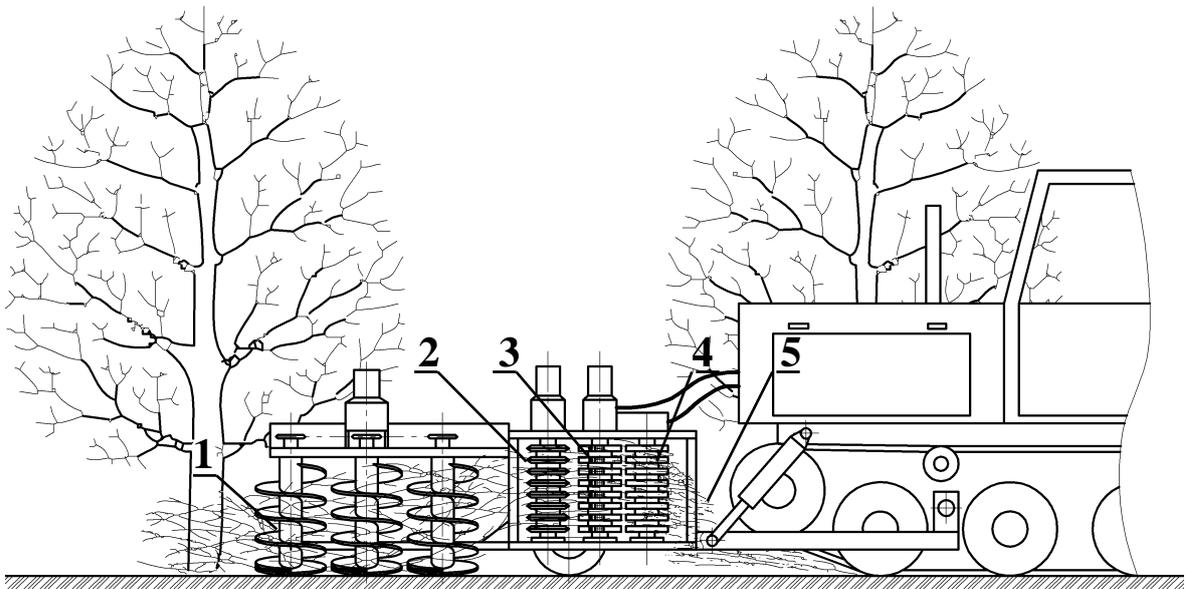
5. Свободное падение измельченной массы на поверхность почвы.

Измельчение ветвей в данной машине происходит несколькими этапами, на каждом из которых одновременно протекают сложные процессы механической обработки древесины ветвей (фрикционное перемещение, резание, деформация, разрушение). Изучение этих процессов является необходимым этапом перед проектированием. При этом необходимо знать величины действующих сил и параметры перерабатываемого материала на каждом этапе технологического процесса.

При работе двухвалкового роторного измельчителя зубчатые ножи, установленные на ножевых дисках роторов, совершают вращательное движение навстречу друг другу при поступательном движении подаваемого слоя древесины срезанных ветвей плодовых деревьев в пространство между роторами. Это обуславливает криволинейность траектории лезвий ножей в слое древесины (рис. 2).

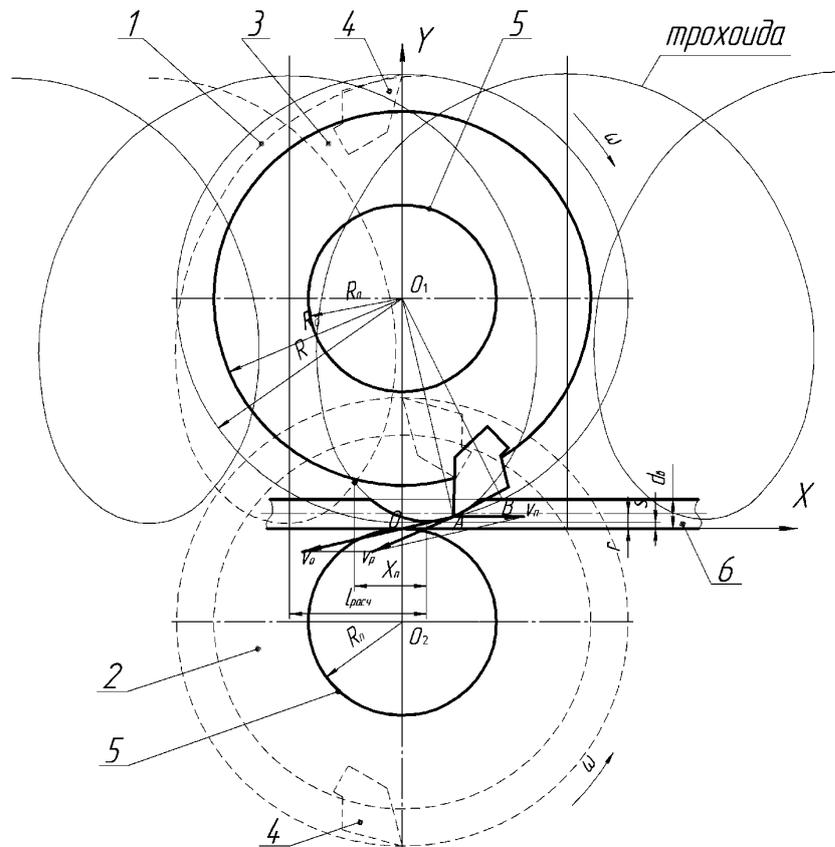
Траекторией движения точки ножа относительно слоя древесины является удлиненная циклоида (трохоида).

Конструкция двухвалкового роторного измельчителя не позволяет осуществлять полное разрезание ветви на отдельные части из-за наличия конструктивного зазора  $s$  между кромкой ножа и валом противоположенного ротора (рис. 3).



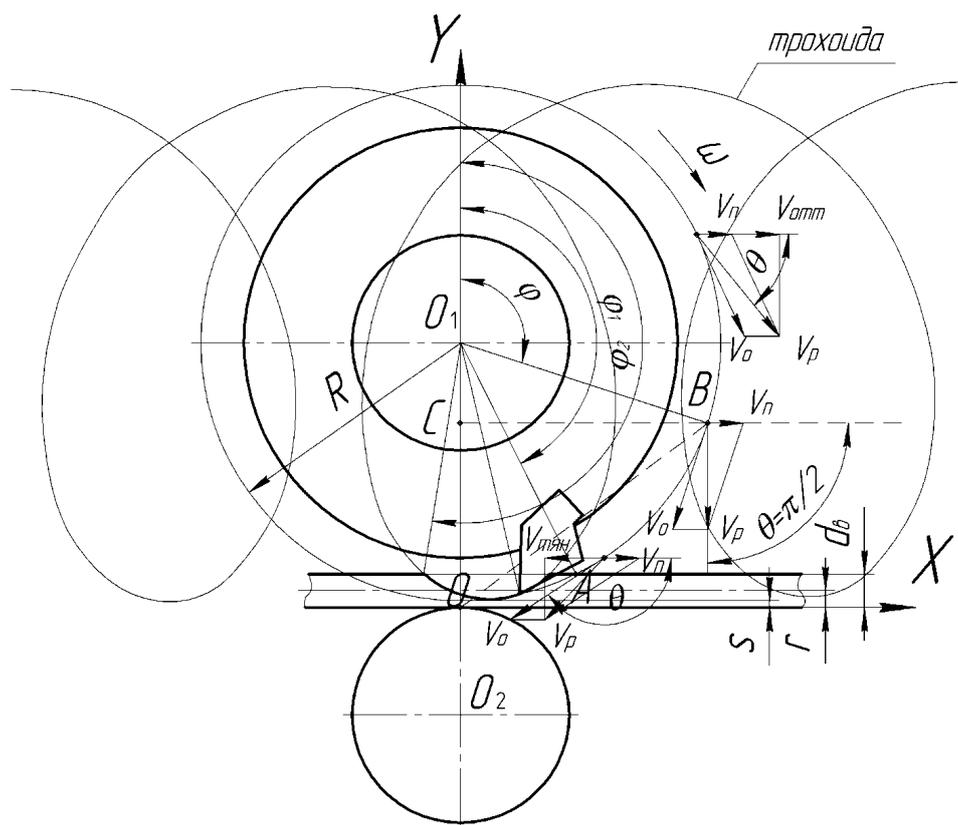
**Рисунок 1.** Технологическая схема работы подборщика-измельчителя срезанных ветвей плодовых деревьев

**Figure 1.** Technological scheme of the picker-chopper of cut branches of fruit trees



**Рисунок 2.** Схема к кинематическому анализу траектории движения ножа измельчителя:  
1, 2 – верхний и нижний роторы; 3 – ножевой диск; 4 – нож; 5 – вал ротора; 6 – измельчаемая ветка

**Figure 2.** The scheme for the kinematic analysis of the trajectory of the chopper knife:  
1, 2 – upper and lower rotors; 3 – knife disk; 4 – knife; 5 – rotor shaft; 6 – chopped branch



**Рисунок 3.** Схема к определению максимальной толщины слоя древесины  
**Figure 3.** The scheme for determining the maximum thickness of the wood layer

Главным является не разделение ветви на части, а разрушение поверхности ветви и клеточной структуры древесины. Это обстоятельство дает право использовать конструкцию двухвалкового роторного измельчителя для получения из срезанных ветвей плодовых деревьев древесной мульчи. Отделение отрезанной части от ветви возможно при обеспечении минимальной величины зазора  $s$  между кромкой ножа и валом противоположенного ротора. При этом величина силы, необходимой для отрыва срезанной частицы минимальна. Необходимо отметить и то, что разделение на части продолжается и после первой ступени измельчения, а именно в пространстве между первой и второй ступенью измельчения и во второй ступени измельчения.

Абсолютная скорость любой точки ножа представляет собой геометрическую сумму окружной  $v_0$  и поступательной  $v_n$  скоростей (рис. 2).

Проекции скорости на оси координат могут быть выражены параметрическими уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_n + v_0 \cos \varphi; \\ \frac{dy}{dt} = -v_0 \sin \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где:

$v_n$  – поступательная скорость (подача) ножевого диска измельчителя относительно ветки, м/с;

$v_0$  – окружная скорость, м/с;

$\varphi$  – угол поворота ножевого диска, град.

Окружная скорость определяется по формуле:

$$v_0 = \omega R, \quad (2)$$

где:

$\omega$  – угловая скорость вращения ножевого диска,  $c^{-1}$ ;

$t$  – текущее время, с;

$R$  – радиус окружности, описываемой режущей кромкой, м.

После интегрирования выражения (1) получаем уравнение траектории точки ножа. Постоянные интегрирования  $C$  и  $C_1$  определяются с учетом начальных условий:  $t = 0; x = 0; y = 0$ . При этом получим  $C = 0$  и  $C_1 = s + R$ , а уравнения примут вид:

$$\begin{cases} x = v_n t + R \sin \omega t; \\ y = s + R \cdot (1 + \cos \omega t), \end{cases} \quad (2)$$

где:

$S$  – зазор, представляющий собой расстояние между режущей кромкой ножа и валом противоположенного ротора, м.

Установлено, что результирующая скорость лезвия ножа  $V_p$  в зависимости от его положения меняет свое направление относительно движения ветви. Проекция результирующей скорости лезвия на направление движения слоя характеризует воздействие лезвия на слой материала (рис. 3). В точке  $A$  проекция скорости  $V_p$  представляет собой скорость, с которой лезвие воздействует на слой, затягивая его и способствуя поступлению ветви в пространство между роторами измельчителя и ее резанию.

$$v_{мян} = v_p \sin \theta, \quad (3)$$

Исходя из этого, подача должна осуществляться в том месте ножевого диска, где нет отталкивающего действия ножа, т.е.  $v_{мян} \geq 0$ . Согласно выражению (4)  $v_{мян} = 0$ , тогда  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , т. е. результирующая  $v_p$  направлена перпендикулярно направлению движения ветви и соответственно поперек волокнам древесины, как это имеет место в точке  $B$  (рис. 3).

Направление и величина скорости  $V_p$  являются функциями угла  $\varphi$  поворота ножевого диска. Из параллелограмма скоростей для положения лезвия в любой точке можно написать

$$v_p^2 = v_n^2 + v_o^2 - 2v_n v_o \sin \varphi, \quad (4)$$

В точке  $B$ , для которой соблюдено условие  $v_{мян} = 0$ ,

$$v_p^2 = v_o^2 - v_n^2, \quad (5)$$

Приравнивая эти выражения, устанавливается значение угла  $\varphi$ , при котором  $v_{мян} = 0$ , т. е. определяется точка, где отсутствует отталкивающее действие лезвия и появляется явление затягивания ветви.

$$\sin \varphi = \frac{v_n}{v_o}. \quad (6)$$

Данное условие получается из зависимости угла  $\theta$  от  $\varphi$  по рис. 3.

$$\sin \varphi = \frac{AA_1}{v_o} = \frac{v_{мян} + v_n}{v_o} = \frac{v_p \cos \theta + v_n}{v_o}, \quad (7)$$

откуда при  $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$\sin \varphi = \frac{v_n}{v_o}.$$

Максимально возможную толщину  $h$  слоя древесины, перерезаемого ножевым диском, определяется из треугольника  $BOC$  на схеме (рис. 3):

$$h = |OC|; R + s - h = R \sin \varphi, \quad (8)$$

откуда с учетом уравнения (9)

$$R + s - h = R \frac{v_n}{v_o}. \quad (9)$$

Тогда выражение для расчета максимальной толщины слоя примет вид

$$h_{\max} = s + R \left( 1 - \frac{v_n}{v_o} \right). \quad (10)$$

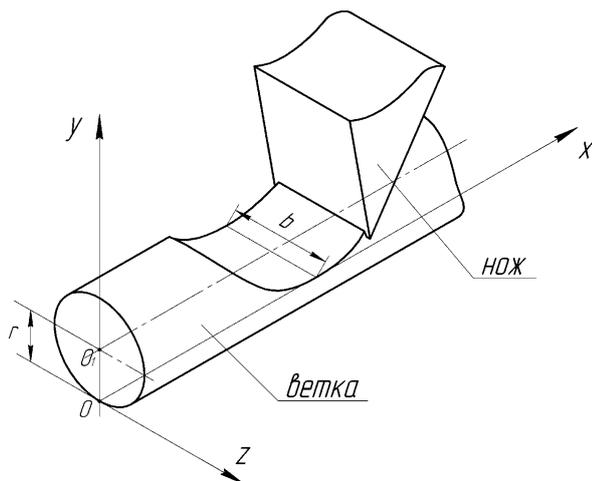
Уравнение цилиндрической поверхности ветви относительно осей  $ZOY$  (рис. 4) при прямом лезвии ножа представляется выражением:

$$(y + r)^2 + z^2 = r^2, \quad (11)$$

где:

$r = d_g/2$  – радиус измельчаемой ветви диаметром  $d_g$ , м.

Уравнением линии, ограничивающей поверхность резания, является решение системы



**Рисунок 4.** Схема к определению ширины резания  
**Figure 4.** The scheme for determining the cutting width

$$\begin{cases} x = v_n t + R \sin \omega t ; \\ y = s + R \cdot (1 + \cos \omega t) ; \\ (y + r)^2 + z^2 = r^2 . \end{cases} \quad (12)$$

Ширина резания  $b(t)$  определяется координатами  $X$  двух точек, являющихся точками пересечения линии лезвия ножа с линией, задаваемой системой (13):

$$b = z_2 - z_1. \quad (13)$$

Решая систему уравнений (13), получим:

$$b = 2\sqrt{y \cdot (d_g - y)} = 2\sqrt{(s + R \cdot (1 + \cos \omega t)) \cdot (d_g - s - R \cdot (1 + \cos \omega t))}. \quad (14)$$

Максимальная ширина резания:

$$b_{\max} = d_g. \quad (15)$$

Одной из важных характеристик траектории движения режущей кромки ножа является расстояние между любыми однородными точками смежных отрезков трохоиды, равные между собой (рис. 2). Его величину можно найти, если значение абсциссы  $x$  вычесть из значения абсциссы  $x_b$ , для обоих последующих положений, т. е.

$$l_{\text{расч}} = x_b - x. \quad (16)$$

Центральный угол между ножами равен:

$$\beta = \frac{2\pi}{z}, \quad (17)$$

где:

$z$  – число ножей на ножевом диске.

Следовательно,

$$\sin \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2}. \quad (18)$$

Тогда, подставляя значение  $\sin \omega t$  в уравнение (3), получим:

$$x = v_n t + R \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2}. \quad (19)$$

Нож достигнет в слое положения  $a$  с опозданием на время  $\Delta t$ , необходимом для поворота ножевого диска на угол  $\beta$ , т. е.

$$\Delta t = \frac{\beta}{\omega}. \quad (20)$$

Следовательно, абсцисса для нового положения ножа

$$x_b = v_n (t + \Delta t) + R \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2}. \quad (21)$$

Подставив значение  $\Delta t$  и учитывая, что  $y_b = y$ , получим

$$l_{\text{расч}} = x_b - x = v_n (t + \Delta t) - v_n t + R \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2} - R \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2} - v_n t + R \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2},$$

$$l_{\text{расч}} = v_n \frac{\beta}{\omega},$$

или

$$l_{\text{расч}} = \frac{v_n}{nz}. \quad (22)$$

Длительность процесса резания одной ветви  $\Delta T$  определяется как

$$T = t_2 - t_1, \quad (23)$$

где:

$t_1$  и  $t_2$  – начало и конец реза, с.

$$t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}; t_2 = \frac{\varphi_2}{\omega}, \quad (24)$$

где:

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота ротора в моменты начала и конца реза, рад.

Угол поворота в момент начала резания определяется по схеме на рисунке 3 при  $y = d_6$ :

$$\varphi_1 = \arccos \left[ \frac{d_6 - s}{R} - 1 \right]. \quad (25)$$

Конец процесса резания ветви соответствует моменту времени, когда происходит скол образованной частицы от ветви. Условием скола является превышение сил давления ножа на частицу максимального напряжения сдвига древесины. Если условие скола не выполняется, то резание продолжается до тех пор, пока режущая кромка не выйдет из тела ветви. На схеме этому могут соответствовать два момента времени.

В первом случае траектория режущей кромки пересекает горизонтальную линию, ограничивающую ветвь. Угол поворота определяется с учетом симметрии траектории трохойды одного оборота режущей кромки относительно вертикальной оси (рис. 3).

$$\varphi_2 = 2\pi - \varphi_1. \quad (26)$$

Во втором случае траектория режущей кромки пересекает траекторию режущей кромки предыдущего реза в пределах тела ветви. Здесь угол поворота определяется как:

$$x = x_n; \quad \varphi \in \left( \pi; \frac{3\pi}{2} \right), \quad (27)$$

где:

$x_n$  – координата точки пересечения траекторий, которая определяется как

$$x_n = x(\pi) - \frac{l_{расч}}{2}, \quad (28)$$

где:

$x(\pi)$  – координата траектории режущей кромки в нижнем положении при  $\varphi = \pi$ , тогда после преобразований с учетом формул (3), (23) и (25) получим

$$x_n = v_n \frac{\pi}{\omega} + R \sin \pi - \frac{v_n}{2nz} = \frac{v_n}{2n} \cdot \left( 1 - \frac{1}{z} \right);$$

$$v_n \frac{\varphi_2}{2\pi n} + R \sin \varphi_2 = \frac{v_n}{2n} \cdot \left( 1 - \frac{1}{z} \right). \quad (29)$$

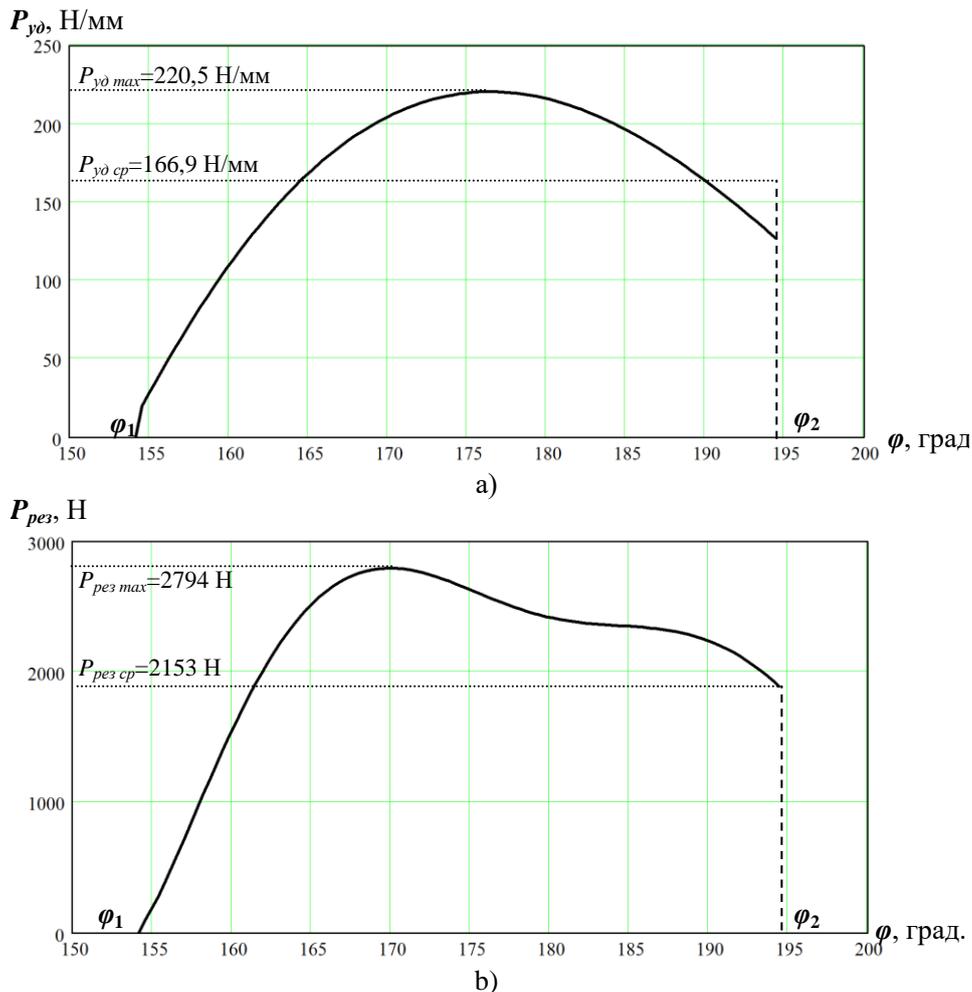
Решая последнее уравнение, можно определить угол поворота режущей кромки ножа в момент окончания процесса резания.

Построены диаграммы зависимости удельной и полной сил резания в зависимости от угла поворота режущей кромки  $\varphi$  (рис. 5).

На силу резания влияние оказывают следующие показатели: передний  $\delta_n$  и задний  $\delta_3$  углы заточки ножей, радиус  $R$  и окружная скорость  $v_0$  режущей кромки ножа, скорость подачи ветвей  $v_n$ , зазор между кромкой ножа и валом противоположного ротора  $s$  [15].

Установлены следующие значения переднего  $\delta_n = -5^\circ \dots -15^\circ$  и заднего углов заточки ножа  $\delta_3 = 60^\circ - 70^\circ$ , радиуса  $R$  режущей кромки ножа 75-125 мм, окружной скорости режущей кромки ножа  $v_0 = 8-12$  м/с, скорости резания ветвей 10-12 м/с, зазора между режущей кромкой ножа и валом противоположенного ротора  $s = 0,003$  м. С учетом этих значений скорость подачи ветвей принимается в пределах м/с.

**Выводы.** В результате проведенного математического моделирования процесса работы подборщика-измельчителя определены кинематические параметры движения рабочего органа и установлены его рациональные параметры: переднего  $\delta_n = -5^\circ \dots -15^\circ$  и заднего углов заточки ножа  $\delta_3 = 60^\circ - 70^\circ$ , радиуса  $R$  режущей кромки ножа 75-125 мм, окружной скорости режущей кромки ножа  $v_0 = 8-12$  м/с, скорости резания ветвей 10-12 м/с, скорость подачи ветвей  $v_n = 1,4-2,1$  м/с, зазора между режущей кромкой ножа и валом противоположенного ротора  $s = 0,003$  м.



**Рисунок 5.** Диаграммы зависимости удельной и полной сил резания в зависимости от угла поворота режущей кромки  $\varphi$  :

а) удельной силы резания  $P_{y\partial}$  ; б) полной силы резания  $P_{рез}$

**Figure 5.** Diagrams of the dependence of the specific and total cutting forces depending on the angle of rotation of the cutting edge  $\varphi$  :

а) specific cutting force  $P_{y\partial}$  ; б) full cutting force  $P_{рез}$

### Список литературы

1. Свирский Г. Г., Черненко Н. Г. Геометрические и весовые параметры валка сучьев в садах в связи с механизацией их измельчения // Сб. науч. тр. ВНИИ садоводства им. И. В. Мичурина. 1984. Вып. 42. С. 98–102.
2. Преображенский К. Н. Биологическая утилизация древесины на мелиорируемых землях. Москва: Росагропромиздат, 1988. 186 с.
3. Лучков П. Г., Шомахов Л. А., Медовник А. Н., Шомахов А. Р. Использование древесины срезанных ветвей яблони для мульчирования почвы в садах. Краснодар: Типография агрофирмы «Центральная», 2001. 113 с.
4. Шекихачев Ю. А., Шомахов Л. А. Эффективный способ борьбы с эрозией почв в условиях горного садоводства // Почвозащитные адаптивные технологии горного и предгорного садоводства: материалы Международной науч. конф. в рамках СНГ. Нальчик: Изд. центр «Эль-Фа», 1997. С. 32–36.

5. Балкаров Р.А., Заммоев А.У. Утилизация древесины срезанных ветвей плодовых деревьев в горном и предгорном садоводстве. // Экология южного региона: матер. Регион. научн. конф. молодых ученых Горского государственного агроуниверситета. Владикавказ: Горский ГАУ, 2002. С. 105–107.
6. Шомахов Л. А., Заммоев А. У. Мульчирование террас измельченной древесиной срезанных ветвей плодовых деревьев // Проблемы экологизации современного садоводства и пути их решения: материалы Международной науч. конф. Краснодар: КубГАУ, 2004. С. 14–18.
7. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М. [и др.] Высокопродуктивные экологически чистые технологии и технические средства по уходу за плодовыми насаждениями в интенсивном горном садоводстве Кабардино-Балкарской республики. Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. 193 с. EDN: BVIEYK
8. Долгов И. А., Овчаров А. А. Теоретический анализ сил, действующих на нож измельчающего барабана кустореза-измельчителя. // Проектирование рабочих органов почвообрабатывающих, уборочных с.-х. машин и агрегатов для кормопроизводства: материалы межвуз. сб. тр. Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1984. С. 3–10.
9. Кротов А. М. Технологии и технические средства для обрезки и утилизации виноградной лозы и ветвей плодовых деревьев // Садоводство и виноградарство. 1992. Т. 11-12. С. 7–9.
10. Медовник А. Н. Совершенствование машиной технологии утилизации обрезков кроны плодовых деревьев для улучшения качественных и технико-экономических показателей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1999. 25 с.
11. Токарев В. Т. Обоснование параметров вальцового измельчителя садовых обрезков: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1989. 25 с.
12. Завражнов А. И., Манаенков К. А., Ланцев В. Ю. К вопросу утилизации отходов обрезки в садах // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 145-летию со дня рождения И. В. Мичурина и 90-летию профессора В. И. Будаговского «Интенсивное садоводство». Мичуринск, 2000. Ч. II. С. 67–70.
13. Балкаров Р. А., Шомахов Л. А. Механизация трудоемких процессов в садоводстве // Основные направления научного обеспечения агропромышленного комплекса Кабардино-Балкарской Республики: матер. межвуз. научн.-практич. конф. Кабардино-Балкарской государственной сельскохозяйственной академии. Нальчик: КБГСХА, 2000. С. 145–148.
14. Макуашев И. О., Хажметова Б. Л., Хажметов Л. М. Технология измельчения отходов садоводства при движении по междурядью // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. С. 122–124. EDN: YVBKCP
15. Хажметов Л. М., Дзуганов В. Б., Апхудов Т. М. и др. Энергоемкость процесса измельчения срезанных ветвей двухвалковым роторным измельчителем // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 2(40). С. 114–121. DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-114-121. EDN: NOQIZA

## References

1. Svirsky G.G., Chernenko N.G. Geometric and weight parameters of felling branches in gardens in connection with the mechanization of their grinding. *Sb. nauch. tr. VNIi sadovodstva im. I. V. Michurina* [Collection of Scientific research Institute of Horticulture named after I.V. Michurin], 1984. Iss. 42. Pp. 98–102. (In Russ.)
2. Preobrazhensky K.N. *Biologicheskaya utilizatsiya drevesiny na melioriruyemykh zemlyakh* [Biological utilization of wood on reclaimed lands]. Moscow: Rosagropromizdat, 1988. 186 p. (In Russ.)
3. Luchkov P.G., Shomakhov L.A., Medovnik A.N., Shomakhov A.R. *Ispol'zovaniye drevesiny srezannykh vetvey yabloni dlya mul'chirovaniya pochvy v sadakh* [The use of wood from cut branches of apple trees for mulching soil in gardens]. Krasnodar: Tipografiya agrofirmy "Tsentral'naya", 2001. 113 p. (In Russ.)
4. Shekikhachev Yu.A., Shomakhov L.A. An effective way to combat soil erosion in conditions of mountain gardening. *Pochvozashchitnyye adaptivnyye tekhnologii gornogo i predgornogo sadovodstva: materialy Mezhdunarodn. nauch. konf. v ramkakh SNG* [Soil-protective adaptive technologies of mountain and foothill gardening: materials of the international scientific conference within the CIS]. Nalchik: Izd. tsentr "El'-Fa", 1997. Pp. 32–36. (In Russ.)

5. Balkarov R.A., Zammoev A.U. Recycling of wood from cut branches of fruit trees in mountain and foothill gardening. *Ekologiya yuzhnogo regiona: mater. Region. nauchn. konf. molodykh uchenykh Gorskogo gosudarstvennogo agrouniversiteta* [Ecology of the southern region: material. Region. scientific conf. young scientists of Gorsky State Agrarian University]. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University, 2002. Pp. 105–107. (In Russ.)
6. Shomakhov L.A., Zammoev A.U. Mulching of terraces with crushed wood from cut branches of fruit trees. *Problemy ekologizatsii sovremennogo sadovodstva i puti ikh resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauch. konf* [Problems of ecologization of modern horticulture and ways to solve them: materials of the international scientific conference]. Krasnodar: KubGAU, 2004. Pp. 14–18. (In Russ.)
7. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M. [et al.]. *Vysokoproduktivnyye ekologicheski chistyye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva po ukhodu za plodovymi nasazhdeniyami v intensivnom gornom sadovodstve Kabardino-Balkarskoy respubliki* [Highly productive environmentally friendly technologies and technical means for caring for fruit plants in intensive mountain gardening of the Kabardino-Balkarian Republic. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University, 2022. 193 p. (In Russ.). EDN: BVIEYK
8. Dolgov I.A., Ovcharov A.A. Theoretical analysis of the forces acting on the blade of the chopping drum of a brushcutter-shredder. *Proyektirovaniye rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh, uborochnykh s.-kh. mashin i agregatov dlya kormoproizvodstva: materialy mezhvuzovskiy sbornik trudov* [Design of working bodies for soil cultivation and agricultural harvesting. machines and units for feed production: materials from the interuniversity collection of works]. Rostov-on-Don: RISHM, 1984. Pp. 3–10. (In Russ.)
9. Krotov A.M. Technologies and technical means for pruning and recycling of vines and branches of fruit trees. *Horticulture and viticulture*. 1992;11-12:7–9. (In Russ.)
10. Medovnik A.N. *Sovershenstvovaniye mashinoy tekhnologii utilizatsii obrezkov krony plodovykh derev'yev dlya uluchsheniya kachestvennykh i tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of utilization of fruit tree crown trimmings by machine to improve quality and technical and economic indicators: abstract of thesis. diss. ...cand. tech. Sci.]. Krasnodar, 1999. 25 p. (In Russ.)
11. Tokarev V.T. *Obosnovaniye parametrov val'tsovogo izmel'chitelya sadovykh obrezkov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. Nauk* [Justification of the parameters of a roller shredder of garden trimmings: abstract. diss. ... cand. tech. Sci.]. Krasnodar, 1989. 25 p. (In Russ.)
12. Zavrazhnov A.I., Manaenkov K.A., Lantsev V.Yu. On the issue of waste disposal of pruning in gardens. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya I.V. Michurina i 90-letiyu professora V.I. Budagovskogo "Intensivnoye sadovodstvo"* [Materials of the international scientific and practical conference of young scientists dedicated to the 145th anniversary of the birth of I.V. Michurin and the 90th anniversary of Professor V.I. Budagovsky "Intensive gardening". Michurinsk, 2000. Part II. Pp. 67–70. (In Russ.)
13. Balkarov R.A., Shomakhov L.A. Mechanization of labor-intensive processes in gardening. *Osnovnyye napravleniya nauchnogo obespecheniya agropromyshlennogo kompleksa Kabardino-Balkarskoy Respubliki: mater. mezhvuz. nauchn.-praktich. konf. Kabardino-Balkarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Main directions of scientific support of the agro-industrial complex of the Kabardino-Balkarian Republic: materials of the interuniversity scientific and practical conference of the Kabardino-Balkarian State Agricultural Academy]. Nalchik: KBGSHA, 2000. Pp. 145–148. (In Russ.)
14. Makuashev I.O., Khazhmetova B.L., Khazhmetov L.M. Technology of shredding gardening waste when moving along the aisle. *Aktual'nyye problemy agrarnoy nauki: prikladnyye i issledovatel'skiye aspekty. Materialy III Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of agricultural science: applied and research aspects. Materials of the III All-Russian (national) scientific and practical conference]. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University, 2023. Pp. 122–124. (In Russ.). EDN: YVBKCP
15. Khazhmetov L.M., Dzuganov V.B., Uphudov T.M. [et al.]. Energy consumption of the process of crushing cut branches with a two-roll rotary shredder. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2023;2(40):114–121. DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-114-121. EDN: NOQIZA

**Сведения об авторах**

**Хажметов Луан Мухажевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», SPIN-код: 6145-0808, Scopus ID: 57205436522, Researcher ID: AAU-4007-2019

**Апхудов Тимур Муаедович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического обслуживания и ремонта машин в АПК, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 7421-4358, Scopus ID: 57219057974

**Заммоев Аслан Узеирович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом механизации трудоемких процессов в садоводстве, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного садоводства», SPIN-код:6317-3115

**Макуашев Инал Олегович** – аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова»

**Information about the authors**

**Luan M. Khazhmetov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 6145-0808, Scopus ID: 57205436522, Researcher ID: AAU-4007-2019

**Timur M. Aphudov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Maintenance and Repair of Machines in the Agroindustrial Complex, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 7421-4358, Scopus ID: 57219057974

**Aslan U. Zammoev** – Candidate of Technical Sciences, Leading researcher, Head of the Department of mechanization of labor-intensive processes in Horticulture, North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Gardening, SPIN-code: 6317-3115

**Inal O. Makuashev** – Post graduate student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov

---

**Авторский вклад.** Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

**Author's contribution.** All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

---

*Статья поступила в редакцию 15.05.2024;  
одобрена после рецензирования 31.05.2024;  
принята к публикации 10.06.2024.*

*The article was submitted 15.05.2024;  
approved after reviewing 31.05.2024;  
accepted for publication 10.06.2024.*