

## К вопросу изучения процесса измельчения кабачков

**Н. П. Аюгин**✉, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин»

**Н. М. Семашкин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

**В. И. Курдюмов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

**В. С. Приказчиков**, студент 5 курса инженерного факультета

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

✉nikall85g@yandex.ru

**Резюме.** Работа посвящена изучению и обобщению основных факторов, влияющих на энергетические показатели процесса измельчения растительных культур: скорость резания, толщина, угол заточки и острота ножа, а также угол скольжения. Для проведения исследования процесса резания была спроектирована и изготовлена лабораторная установка, работа которой основана на принципе действия ротационного копра. Изготовлено четыре типа режущих элементов (нож с односторонней заточкой, нож с двусторонней заточкой, гребенчатый нож с односторонней заточкой и П-образный нож) толщиной от 1 мм до 8 мм, с углом заточки от 10 до 70 градусов, возможностью регулировки угла скольжения от 0 до 50 градусов, остротой режущей кромки от 20 мкм до 200 мкм при скорости резания, изменяющейся от 1 м/с до 30 м/с. В качестве исследуемого материала были использованы кабачки сорта «Цукеша». Среди изготовленных ножей наименьшее усилие резания наблюдается при использовании ножей с односторонней заточкой толщиной 2 мм и углом заточки 10 градусов. При увеличении скорости ножа до 25 м/с наблюдается снижение удельного усилия резания в 2,3...2,8 раза от максимальных значений, но увеличение скорости резания до 30 м/с не приводит к дальнейшему снижению данного показателя. При угле скольжения ножа в интервале 10...40 градусов наблюдается снижение удельного усилия резания до 20 %. Снижение остроты режущей кромки ножа с 20 мкм до 200 мкм приводит к увеличению усилия резания кабачков до 1,9 раза.

**Ключевые слова:** кабачок, резание, ротационный копер, удельное усилие резания, нож

**Для цитирования:** Аюгин Н. П., Семашкин Н. М., Курдюмов В. И., Приказчиков В. С. К вопросу изучения процесса измельчения кабачка // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 182-191. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-182-191

## On the issue of studying the process of zucchini grinding

**N. P. Ayugin**✉, **N. M. Semashkin**, **V. I. Kurdyumov**, **V. S. Prikazchikov**

Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1; ✉nikall85g@yandex.ru

**Abstract.** The work is devoted to the study and generalization of the main factors affecting the energy parameters of the process of grinding of plant crops: cutting speed, thickness, sharpening angle and sharpness of the knife, as well as the sliding angle. To study the cutting process, a laboratory device was designed and manufactured, its operation is based on the principle of a rotary pile driver. Four types of cutting elements were produced (a knife with single-sided sharpening, a knife with double-sided sharpening, a comb knife with single-sided sharpening and a U-shaped knife) with a thickness from 1 mm to 8 mm, with a sharpening angle from 10 to 70 degrees, the ability to adjust the sliding angle from 0 to 50 degrees, the sharpness of the cutting edge from 20 μm to 200 μm at a cutting speed varying from 1 m/s to 30 m/s. Zucchini of Tsukesha variety were used as the test material. Among the manufactured knives, the lowest cutting force is observed when using knives with single-sided sharpening of 2 mm thickness and a sharpening angle of 10 degrees. With an increase in the knife speed to 25 m/s, a decrease in the specific cutting force by 2.3 ... 2.8 times from the maximum values is observed, but an increase in the cutting speed to 30 m/s does not lead to a further decrease in this parameter. At a knife sliding angle in the range of 10...40 degrees, a decrease in the specific cutting force of up to 20% is observed. A decrease in the sharpness of the knife cutting edge from 20 μm to 200 μm leads to an increase in the cutting force of zucchini up to 1.9 times.

**Keywords:** zucchini, cutting, rotary pile driver, specific cutting force, knife

**For citation:** Ayugin N. P., Semashkin N. M., Kurdyumov V. I., Prikazchikov V. S. On the issue of studying the process of zucchini grinding // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;4(68): 182-191 doi:10.18286/1816-4501-2024-4-182-191

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00057,  
<https://rscf.ru/project/24-26-00057/>.

### Введение

Исследования по изучению и обобщению основных факторов, влияющих на энергоёмкость измельчения кормов, позволяют определить основные направления развития соответствующих машин с целью создания современного, эффективного и конкурентоспособного отечественного оборудования, в основе которого лежит принцип резания. Данное оборудование может быть использовано в кормоприготовительных линиях стационарных кормоцехов, в личных подсобных хозяйствах, а новые технические решения основных рабочих органов могут быть использованы в измельчающих аппаратах комбайнов и мобильных измельчителях для животноводческих ферм. Направление исследования входит в перечень приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г.).

К основным факторам, влияющим на энергетические затраты при измельчении кормов, в том числе и кабачков, относят скорость резания [1, 2], толщину ножа [3, 4], его остроту, угол заточки [5, 6], а также угол скольжения ножа [7].

Кабачок относится к кормовым бахчевым культурам, и поскольку он является менее теплолюбивым по сравнению с другими бахчевыми, например, с арбузом и тыквой, его можно выращивать на большей части Российской Федерации (южнее 69

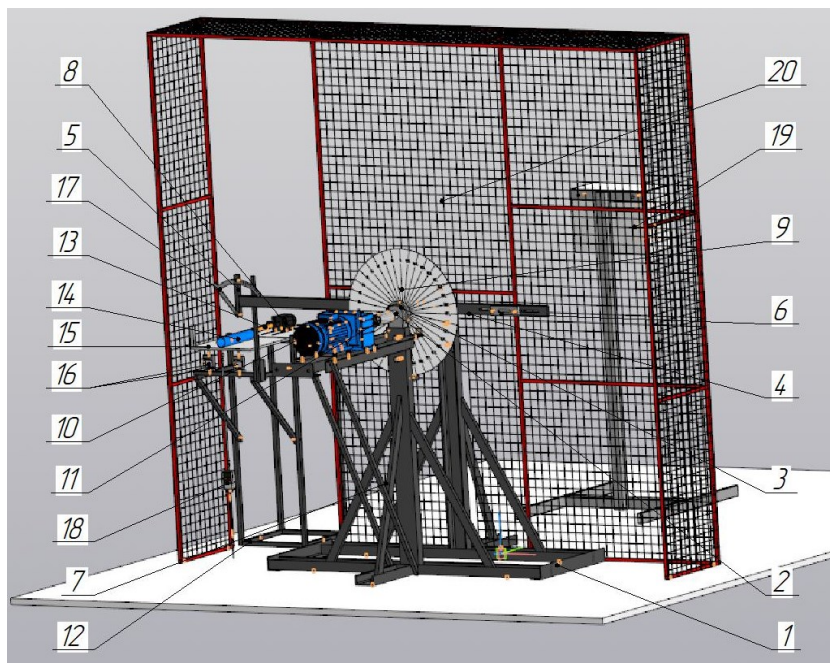
градусов северной широты). Кроме того, данная культура достаточно урожайная (26...60 т/га), а в 1 ц кабачков содержится 6,5...9,5 кормовых единиц и до 1 кг перевариваемого протеина [8, 9, 10]. Добавление в рацион крупного рогатого скота кабачков улучшает усвоение грубых кормов. Также данная культура богата минеральными солями, углеводами и витаминами [11, 12].

Всестороннее изучение процесса измельчения растительных материалов, в том числе используемых в кормопроизводстве, является ключевым фактором в создании машин и оборудования для подготовки кормов к скармливанию, в которых реализован принцип энергосбережения, а также оборудования для измельчения продуктов питания в пищевой промышленности.

Цель исследования – изучение и обобщение основных конструктивных и режимных параметров режущего аппарата, влияющих на удельное усилие резания кабачков (скорость резания, толщина, угол заточки, угол скольжения и острота ножа).

### Материалы и методы

Для изучения процесса резания и изучения влияния вышеуказанных факторов на кафедре «Технология производства и ремонт машин» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ была разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 1), работа которой основана на принципе действия ротационного копра [13].



1 – рама; 2 – приводной вал; 3 – самоустанавливающийся подшипник; 4 – маховик; 5 – фиксатор ножа; 6 – противовес; 7 – кронштейн для инфракрасных датчиков; 8 – соленоид; 9 – лимб; 10 – мотор-редуктор; 11 – обгонная муфта; 12 – подставка; 13 – штанга; 14 – фиксатор растительного материала; 15 – платформа; 16 – S-образные тензометрические датчики; 17 – нож; 18 – динамометр; 19 – пульт управления; 20 – защитное ограждение

Рис. 1. 3-D модель лабораторной установки

С целью обеспечения синхронизации движения ножа и соленоида на платформе Arduino IDE, а также для контроля частоты вращения маховика и линейной скорости ножа после осуществления реза была написана программа для ПЭВМ, позволяющая управлять процессом исследования на установке и контролировать ее основные режимы работы.

Использование разработанной лабораторной установки и оснащение ее сменными ножами различной конфигурации позволяет варьировать кинематические и динамические параметры, влияющие на энергетические затраты при измельчении.

При проведении лабораторных исследований было изготовлено четыре типа режущих элементов

(рис. 2): нож с односторонней заточкой (а), гребенчатый нож с односторонней заточкой (б), нож с двусторонней заточкой (г) и П-образный нож (д). Использовались ножи толщиной от 1 мм до 8 мм с углом заточки от 10 до 70 градусов и остротой режущей кромки от 20 мкм до 200 мкм. При этом установка позволяла регулировать угол скольжения от 0 до 50 градусов, а скорость резания – от 1 м/с до 30 м/с.

Для исследования процесса резания были использованы кабачки сорта «Цукеша» средней влажности 92,4 %.

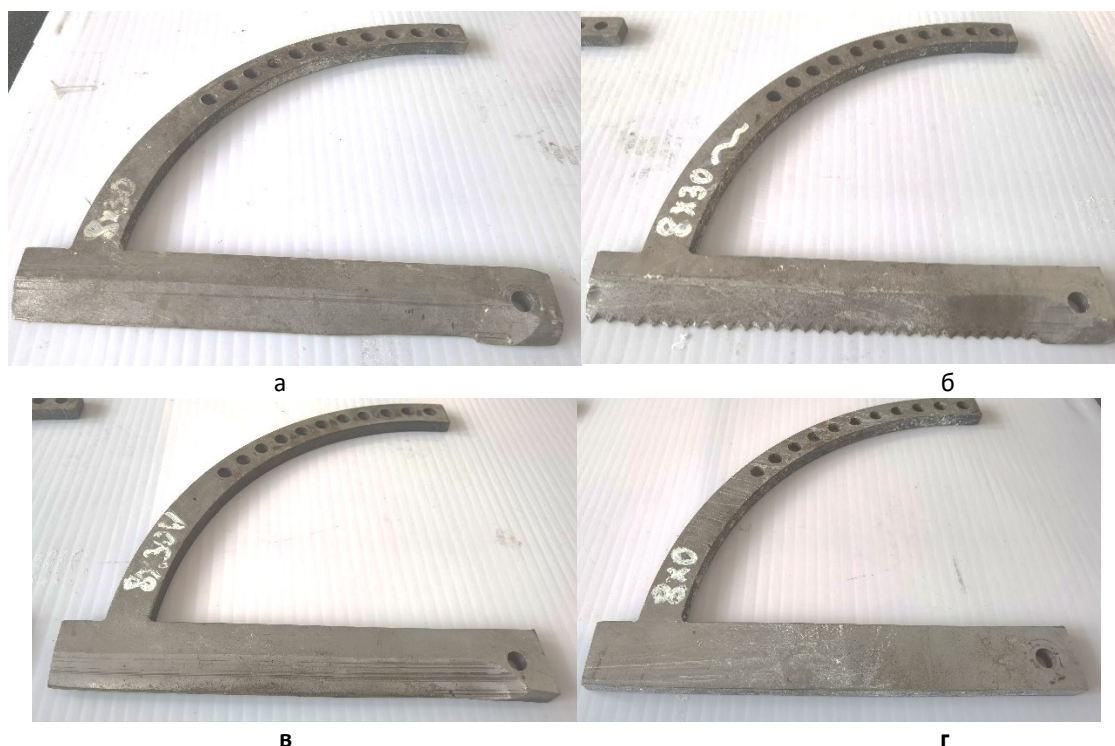


Рис. 2. Ножи, использованные при проведении исследований (обозначения в тексте)

При проведении исследований было обнаружено, что при прочих равных условиях (форма, толщина, острота и угол заточки ножа, угол скольжения и скорость резания) ножи с односторонней заточкой показали аналогичные результаты работы, что и ножи с двусторонней заточкой, поэтому в дальнейших исследованиях ножи с двусторонней заточкой не использовались.

Усилия резания растительных материалов определяли по показаниям тензодатчиков, подключенных к персональному компьютеру через модуль аналогового преобразователя QMS85 (АЦП) с использованием программных продуктов «QMLab», «QMPарset». Поскольку процесс резания растительного материала непродолжительный, для получения достаточного количества данных использовали частоты дискретизации АЦП 10 кГц и 20 кГц.

С целью снижения погрешности измерения при проведении исследования нами были использованы

тензодатчики номинальной нагрузочной способностью 50, 100, 200 и 500 Н.

Для замера площади среза использовали фотокамеру, изображения с которой обрабатывали в программе ImageJ.

Остроту режущей кромки ножей определяли методом снятия оттисков.

#### Результаты

На рисунке 3 представлен график изменения удельного усилия резания кабачков ножом с односторонней заточкой под углом 30 градусов при угле скольжения 0 градусов и остроте лезвия 10 мкм на скорости ножа от 1 м/с до 30 м/с и толщине ножа от 1 мм до 8 мм.

Вне зависимости от толщины ножа при увеличении скорости резания с 1 м/с до 5 м/с наблюдается увеличение удельного усилия резания кабачка на 10...40 % в зависимости от толщины ножа. При увеличении линейной скорости ножа до 25 м/с наблюдается снижение удельного усилия резания в

2,3...2,8 раза от максимальных (пиковых) значений, но дальнейшее увеличение скорости резания (до 30 м/с) не приводит к снижению удельного усилия резания.

При увеличении угла заточки максимальные значения удельного усилия резания смещались в

сторону меньшей скорости и наоборот, при уменьшении угла заточки до 10 градусов максимальные значения наблюдали при скорости 7...8 м/с.

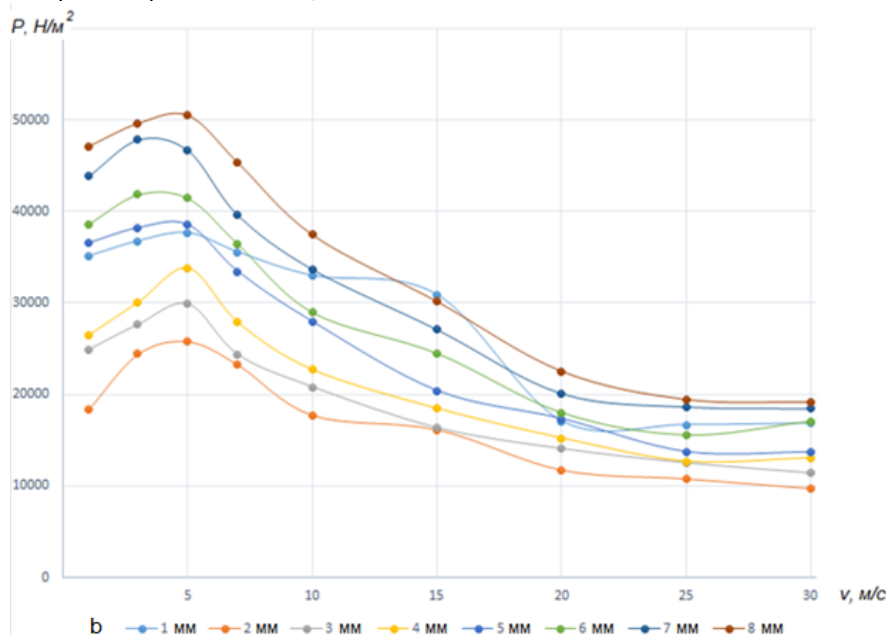


Рис. 3. Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости ножа и его толщины

При толщине ножа 1 мм удельное усилие резания больше, чем при толщине ножа 2, 3, 4 мм, что связано с его недостаточной жесткостью и деформацией (кручения) при взаимодействии с измельчаемым материалом. По этой причине в последующем нож этой толщины в эксперименте не использовали.

Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости ножа и его толщины имеет вид:

$$P = 61226,84 + 2506,972v - 38496,4b - 447,892v^2 + 13327,67b^2 + 19,50369v^3 - 1773,47b^3 - 0,26729v^4 + 83,89431b^4, \quad (1)$$

где  $P$  - удельное усилие резания кабачка,  $\text{Н/м}^2$ ;  $v$  - скорость ножа,  $\text{м/с}$ ;  $b$  - толщина ножа,  $\text{мм}$ .

Величина достоверности аппроксимации  $D$  уравнения регрессии (1) составляет 0,927.

На рисунке 4 представлена зависимость удельного усилия резания кабачков ножом толщиной 4 мм с заточкой под углом 30 градусов, остротой 10 мкм на скоростях ножа 5, 10, 20 и 30 м/с и при угле скольжения ножа, изменяющимся от 0 до 50 градусов.

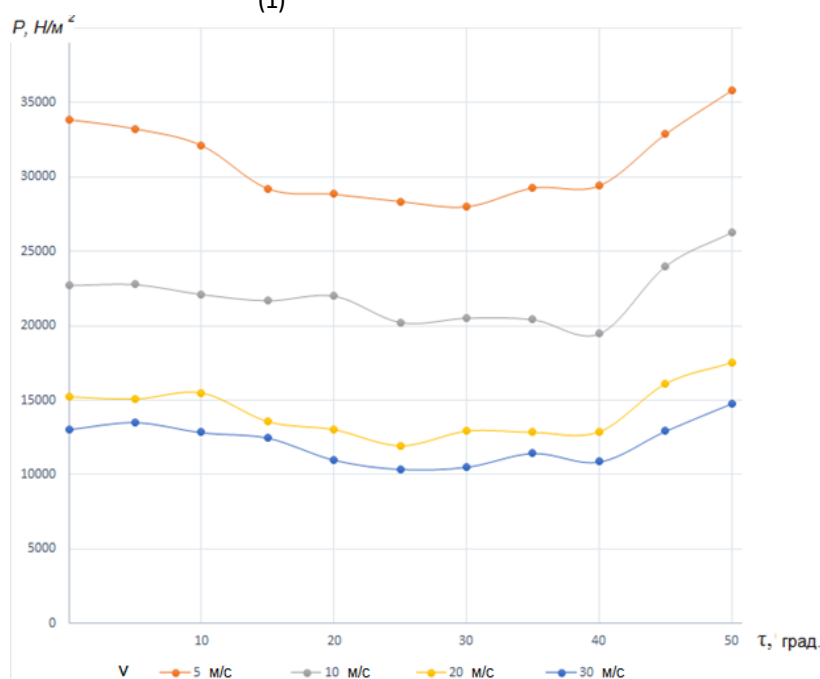


Рис. 4. Зависимость удельного усилия резания кабачков от угла скольжения  $\tau$  и скорости ножа

Увеличение угла скольжения ножа  $\tau$  независимо от скорости ножа в интервале от 10 до 40 градусов приводит к снижению удельного усилия резания до 23,2 %, что связано с трансформацией угла заточки. Увеличение угла скольжения от 40 до 50 градусов приводит к резкому увеличению удельного усилия резания, которое на 6...15 % превышает этот показатель, замеренный при исходном угле скольжения ножа, равном 0 градусов. Данное обстоятельство связано с увеличением площади соприкосновения ножа с измельчаемым материалом. Аналогичная картина наблюдается и при использовании ножей в интервале толщины от 2 мм до 8 мм.

Зависимости удельного усилия резания кабачков от угла скольжения и скорости ножа имеет вид:

$$P = 46400,8 - 19,1205\tau - 3360,27v - 10,3638\tau^2 + 122,765v^2 + 0,234513\tau^3 - 1,5715v^3, \quad (2)$$

где  $\tau$  – угол скольжения ножа, град.

Полученное уравнение регрессии почти точно соответствует полученным экспериментальным данным, поскольку  $D = 0,99$ .

На рисунке 5 представлена зависимость удельного усилия резания кабачков ножом толщиной 4 мм при угле скольжения 0 градусов, угле заточки, меняющимся от 10 до 70 градусов, при скоростях ножа 5, 10, 20 и 30 м/с. Анализ рисунка показал, что по мере увеличения угла заточки ножа от 10 до 70 градусов наблюдается увеличение удельного усилия резания кабачка при скорости ножа 5 м/с в 3,5 раза, при скоростях резания 10, 20 и 30 м/с – 5...5,5 раза. При этом большой разброс значений удельного усилия резания связан со сложностью обеспечения неизменной остроты режущей кромки ножа, которая также оказывает немаловажное значение на энергоемкость процесса.

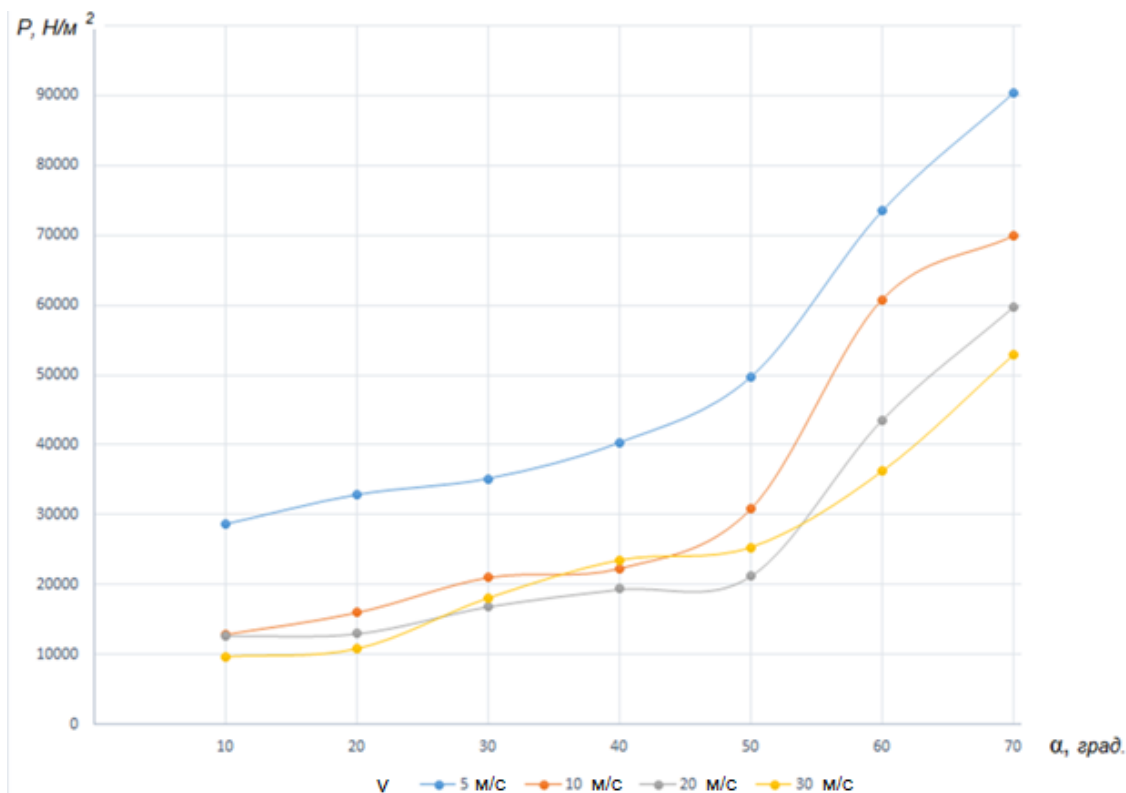


Рис. 5. Зависимость удельного усилия резания кабачков от угла заточки  $\alpha$  и скорости ножа

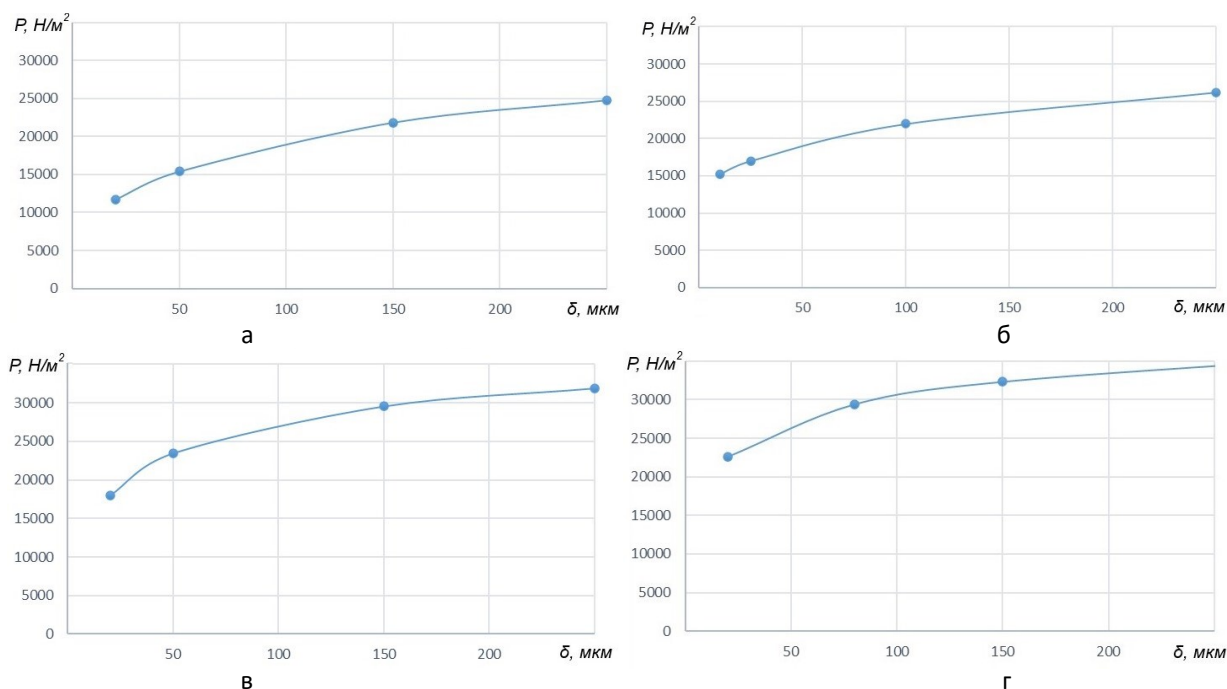
Уравнение регрессии зависимости удельного усилия резания кабачка от угла заточки  $\alpha$  и скорости ножа имеет вид:

$$P = 54491,21801 - 780,5668347\alpha - 3326,77848v + 18,04736296\alpha^2 + 69,52333452v^2, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол заточки ножа, град.

Величина достоверности аппроксимации уравнения регрессии (3) составляет 0,94.

На рисунке 6 представлено изменение удельного усилия резания кабачков при резании ножами толщиной 2, 4, 6, 8 мм, остротой от 10 мкм до 250 мкм с углом заточки 30 градусов при скорости резания 20 м/с и угле скольжения 0 градусов.



а – толщина ножа  $b = 2 \text{ мм}$ ; б –  $b = 4 \text{ мм}$ ; в –  $b = 6 \text{ мм}$ ; г –  $b = 8 \text{ мм}$

Рис. 6. Зависимость удельного усилия резания кабачков от остроты режущей кромки ножа

Данные, представленные на рисунке 6, свидетельствуют о том, что снижение остроты лезвия (увеличение толщины режущей кромки ножа) с 20 мкм до 200 мкм приводит к увеличению усилия резания кабачка в 1,6...1,9 раза в зависимости от толщины ножа.

Зависимость удельного усилия резания кабачка от остроты режущей кромки ножа и его толщины (при  $D = 0,986$ ) имеет вид:

$$P = 6803,755 + 111,9475\delta + 1580,234b - 0,22031\delta^2 + 26,38622b^2, \quad (4)$$

где  $\delta$  – острота режущей кромки ножа, град.

На рисунке 7 представлен график изменения удельного усилия резания кабачков гребенчатым ножом, заточенным под углом 30 градусов, при угле скольжения 0 градусов в зависимости от скорости резания и толщины ножа.

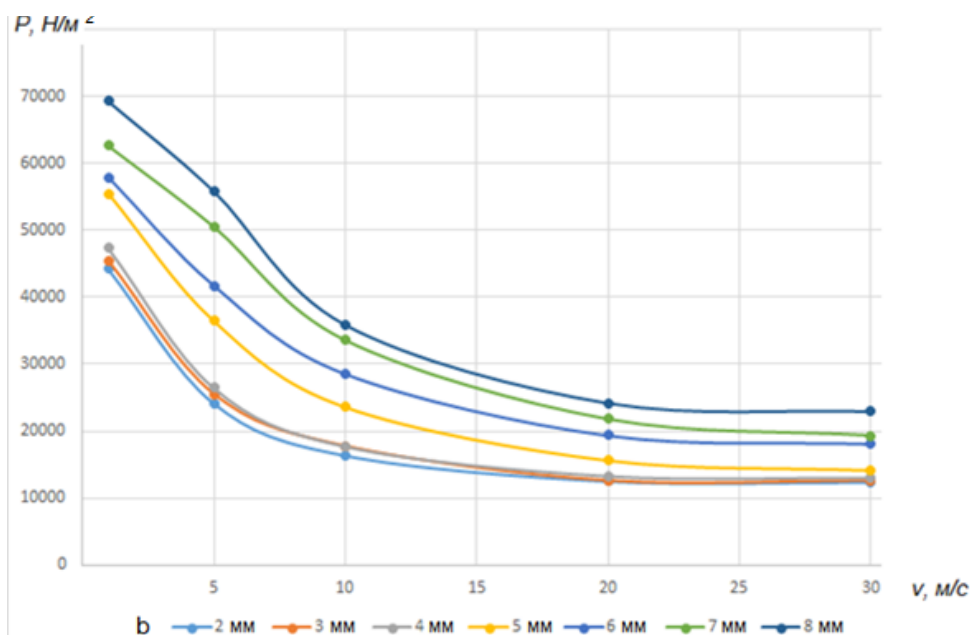


Рис. 7. Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости ножа и его толщины (гребенчатый нож)

Данные, представленные на рисунке 7, свидетельствуют о том, что при резании гребенчатым ножом снижение удельного усилия

резания наблюдается при скорости от 1 м/с до 25 м/с. Удельное усилие резания кабачка при скорости гребенчатого ножа 25...30 м/с выше, чем

при резании ножом, изображенном на рисунке 2а, на 16...40 %. Данное обстоятельство обусловлено конфигурацией ножа, так как кольцевые прорезы в лезвии гребенчатого ножа имеют больший угол заточки, чем зубцы, и, как следствие, вызывают большую деформацию материала при воздействии на него клина.

Несмотря на то, что гребенчатый нож показал большие значения удельного усилия резания по сравнению с ножом, показанном на рисунке 2а, однако при увеличении угла скольжения нож гребенчатой конфигурации в значительно меньшей степени смещает разрезаемый материал в сторону от первоначального места его положения.

Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости и толщины гребенчатого ножа при величине достоверности аппроксимации 0,947 имеет следующий вид:

$$P = 46644,35 - 3506,41v - 230,734b + 75,38438v^2 + 374,2762b^2. \quad (5)$$

На рисунке 8 представлена зависимость удельного усилия резания кабачков гребенчатым ножом толщиной 4 мм с заточкой под углом 30 градусов при скоростях ножа 5, 10, 20 и 30 м/с и угле скольжения ножа, меняющемся от 0 до 50 градусов.

Данные, представленные на рисунке 8, свидетельствуют, что при угле скольжения 30 градусов на скоростях ножа 5 м/с и 10 м/с по сравнению с  $\tau = 0$  градусов наблюдается снижение удельного усилия резания на 18 % и 7 % соответственно. Дальнейшее увеличение угла скольжения ножа приводит к увеличению удельного усилия резания. При скоростях ножа 20 м/с и 30 м/с и увеличении угла скольжения удельное усилие резания имеет тенденцию к увеличению и при достижении  $\tau = 50$  градусов значение  $P$  превышает начальное, измеренное при 0 градусов, на 27...47 %.

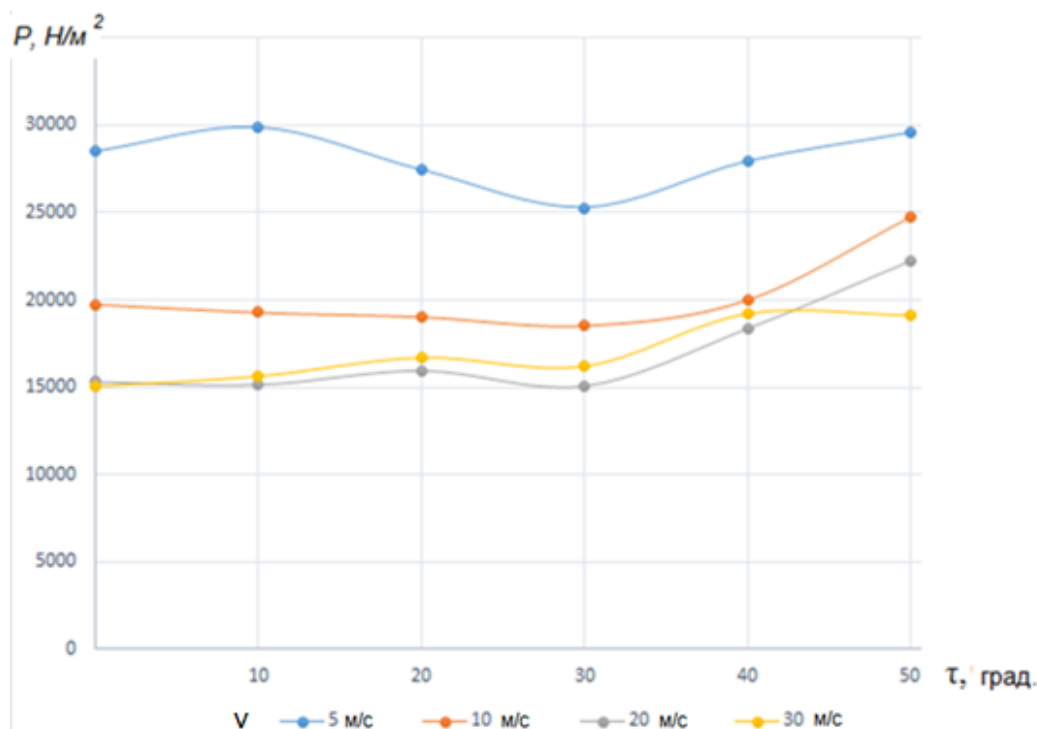


Рис. 8. Зависимость удельного усилия резания кабачков от угла скольжения и скорости ножа (гребенчатый нож)

Зависимости удельного усилия резания кабачков от скорости резания и угла скольжения гребенчатого ножа ( $D = 0,944$ ) имеет вид:

$$P = 42017,65 + 69,29224\tau - 3774,91v - 6,90199\tau^2 + 178,1597v^2 + 0,145318\tau^3 - 2,70198v^3. \quad (6)$$

При измельчении растительных материалов ударом разрушающие элементы изготавливают П-

образными (в виде молотков). Достоинством данной конфигурации разрушающих элементов является отсутствие необходимости их заточки, простота и технологичность изготовления [14, 15, 16].

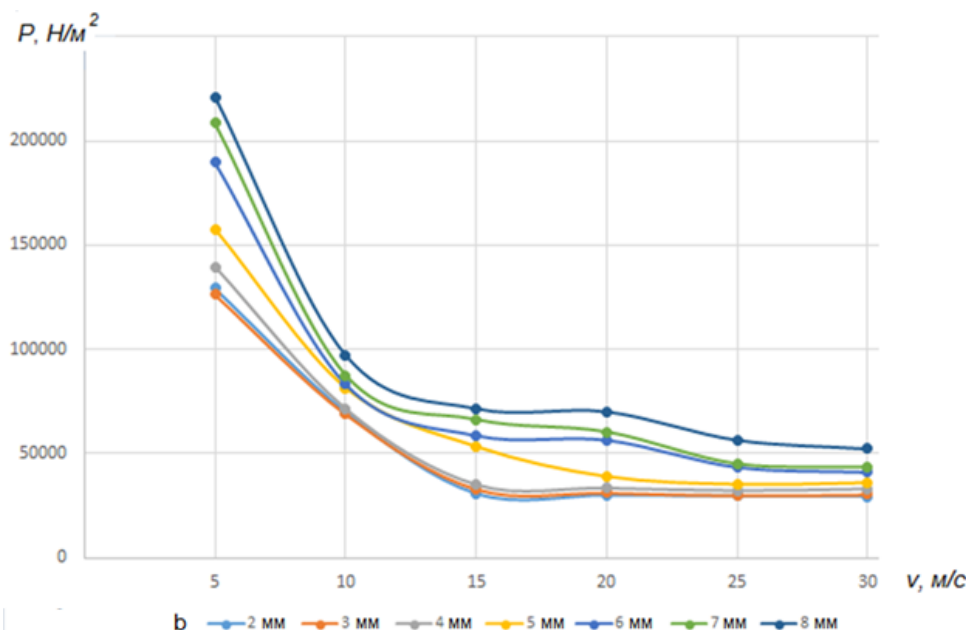


Рис. 9. Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости П-образного ножа и его толщины

Зависимость удельного усилия резания кабачков от скорости и толщины П-образного ножа имеет вид:

$$P = 322436,8 - 37717,8v - 21850,2b + 1709,651v^2 + 5566,254b^2 - 25,4086v^3 - 320,945b^3. \quad (7)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения регрессии (7) составляет 0,955.

Динамика снижения удельного усилия резания кабачков при использовании П-образных ножей аналогична динамике, наблюдаемой при использовании гребенчатых ножей и ножей с односторонней заточкой. Использование П-образных ножей приводит к смятию растительных волокон и, как следствие, по сравнению с остальными типами ножей, удельное усилие разрушения материала при скорости ножа 30 м/с в 2,1 раза выше по сравнению с гребенчатым ножом и в 2,5 раза по сравнению с ножом с односторонней заточкой.

#### Обсуждение

Опубликованные работы по исследуемой тематике не отражают комплексного влияния основных факторов процесса резания кормов на удельные энергозатраты. При этом характер влияния данных факторов имеет схожую тенденцию на скоростях ножа не выше 7 м/с [17, 18]. Кроме того, ранее проведенные исследования не раскрывают влияние скорости резания, угла заточки, угла скольжения, остроты режущей кромки ножа на энергетические показатели процесса резания кабачков [19, 20, 21].

#### Заключение

Для измельчения бахчевых культур, к которым относится кабачок, с энергетической точки зрения

наиболее целесообразным является использование ножей толщиной 2 мм с односторонней заточкой режущей кромки.

Наиболее значимым фактором, влияющим на удельное усилие резания ножа, является угол заточки ножа. Уменьшение угла заточки с 70 градусов до 10 градусов позволяет снизить удельное усилие резания кабачка до 5,5 раза. Следующим по значимости фактором является скорость ножа. Увеличение скорости ножа с 5 м/с до 25 м/с позволяет снизить удельное усилие резания кабачка в 2,8 раза. Снижение толщины ножа с 8 мм до 2 мм позволяет снизить удельное усилие резания кабачка до 1,8 раза. Снижение остроты режущей кромки с 200 мкм до 20 мкм позволяет снизить удельное усилие резания до 1,9 раза. Оптимизация значения угла скольжения ножа позволяет снизить удельное усилие резания до 23,2 %.

При увеличении скорости ножа с углом заточки 30 градусов с 1 м/с до 5 м/с удельное усилие резания кабачка увеличивается до 30 %, однако при уменьшении угла заточки и толщины ножа верхняя граница данного интервала расширяется до 8 м/с. При превышении ножом скорости 25 м/с снижения удельного усилия резания кабачков не наблюдается.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при проектировании рабочих органов измельчающих аппаратов машин и оборудования для подготовки кормов к скармливанию, комбайнов, а также оборудования для измельчения продуктов питания в пищевой промышленности при реализации в них принципа энергосбережения.

#### Литература

1. Хабарова В. В., Богатов А. В., Зотов Е. И. Анализ факторов, определяющих энергозатраты с вибрациями при измельчении корнеплодов и бахчевых // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2006. № 1 (2). С. 67-70.

2. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Анализ факторов, влияющих на энергоёмкость резания // Нива Поволжья. 2008. №3 (8). С. 57-59.
3. Ayugin N., Isaychev V., Khalimov R., Semashkin N. Method and results of studying the influence of grinder knife parameters on specific work of feed cutting BIO Web of Conferences 37, 00022 (2021). doi: 10.1051/bioconf/20213700022.
4. Заплетников И. Н., Шеина А. В., Гордиенко А. В. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2013. С. 52-61.
5. Заплетников И. Н., Шеина А. В. Зависимость реологических характеристик овощей от скорости резания в овощерезательных машинах // Вест. ДонНУЭТ. 2013. С. 82-90.
6. Подход к расчету удельной работы разрушения материала при резании рыбы / О. В. Агеев, В. А. Наумов, Ю. А. Фатыхов и др. // Известия КГТУ. 2021. № 62. С. 67-79. doi: 10.46845/1997-3071-2021-62-67-79.
7. Садовников М. А., Шапоров М. Н. Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур и качественные показатели ее работы // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 127-131.
8. Топорова Л. В., Сыроватский М. В., Топорова И. В. Актуальное решение дефицита микроэлементов в рационах лактирующих коров // Научное обеспечение развития животноводства в Российской Федерации. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ВИЖ им. академика Л. К. Эрнста. 2019. С. 464-467.
9. Туманова М. И., Тимофеев А. С. Кормление КРС // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 4-2 (75). С. 199-201.
10. Симонов Г. А., Магомедов М., Алигазиева П. Кормление КРС полнорационной смесью эффективнее // Комбикорма. 2013. № 10. С. 63-64.
11. Гетерозисные F1 гибриды кабачка / А. В. Медведев, С. В. Кузьмин, А. В. Тихонова и др. // Картофель и овощи. 2019. № 5. С. 38-40. doi:10.25630/PAV.2019.49.75.009
12. Оценка продовольственной безопасности России / И. Н. Сафиуллин, Б. Г. Зиганшин, Э. Ф. Амирова и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021 Т. 16 № 2(62). С. 124-132. doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132
13. Работа лабораторной установки для изучения процесса резания растительных материалов / Н. П. Аюгин, Н. М. Семашкин, Д. Б. Романов, и др. // В сборнике: Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Ульяновск. 2024. С. 418-424.
14. Исследование устройства для дробления зерна / Б. М. Сабиров, Б. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 17, № 1 (69). С. 75 -79. doi: 10.12737/2073-0462-2023-75-79
15. Шапоров М. Н., Семин Д. В., Садовников Д. А. Определение силовых параметров процесса резания очищенной мякоти плодов бахчевых // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. ВолГАУ. Волгоград. 2012 №2 (26). С. 137-141.
16. Определение энергоёмкости процесса измельчения резанием в измельчителе кормов / Р. С. Пополдnev, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 4(72). С. 82-88.
17. Брусенков А. В., Ведищев С. М. Экспериментальное исследование усилий резания лезвием корнеклубнеплодов // Вопросы современной науки и практики. 2011. №2(33). Университет им. В.И. Вернадского. С. 64-67.
18. Антонов Н. М., Лебедь П.И., Искунов Ю. В. Результаты экспериментальных исследований по определению усилий резания плодов и корнеплодов // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. ВолГАУ. Волгоград. 2012 №2 (26). С. 137-141.
19. Study of the influence of geometric knife parameters on specific work of feeds cutting / N. P. Ayugin, A. V. Morozov, N. M. Semashkin, et al. // AIP Conf. Proc. 2022. 2503. P. 030015. doi: 10.1063/5.0099463
20. Оптимальные усилия резания корнеплодов / Ю. М. Исаев, Е. И. Зотов, В. В. Хабарова и др. // Успехи современного естествознания. 2009. № 5. С. 23.
21. Саввина Е. А., Морозов В. Б., Морозова Т. Г. Экспериментально-расчётное обоснование геометрических параметров резания корнеплодов // Агротехника и энергообеспечение. 2017. № 4 (17). С. 20-27.

#### References

1. Khabarova V.V., Bogatov A.V., Zotov E.I. Analysis of factors determining energy consumption with vibrations in case of grinding of root crops and melons // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2006. No. 1 (2). P. 67-70.
2. Kurdyumov V. I., Ayugin P. N., Ayugin N. P. Analysis of factors influencing the energy intensity of cutting // Niva of the Volga Region. 2008. No. 3 (8). P. 57-59.
3. Method and results of studying the influence of grinder knife parameters on specific work of feed cutting / N. Ayugin. V. Isaychev, R. Khalimov, et al. // BIO Web of Conferences 37. 2021. P. 00022. doi: 10.1051/bioconf/20213700022

4. Zapletnikov I. N., Sheina A. V., Gordienko A. V. Experimental studies of the cutting process of plant materials // Current issues of modern science. 2013. P. 52-61.
5. Zapletnikov I.N., Sheina A.V. Dependence of the rheological characteristics of vegetables on the cutting speed in vegetable cutting machines // Vestnik of Donetsk National University of Economics and Trade. 2013. P. 82-90.
6. Approach to calculating the specific work of material destruction when cutting fish / O. V. Ageev, V. A. Naumov, Yu. A. Fatykhov et al. // Vestnik of KSTU. 2021. No. 62. P. 67-79. doi: 10.46845/1997-3071-2021-62-67-79
7. Sadovnikov M. A., Shaprov M. N. Machine for cutting peeled pulp of cucurbits crops and quality parameters of its performance // Agrotechnics and energy supply. 2014. No. 1 (1). P. 127-131.
8. Toporova L. V., Syrovatsky M. V., Toporova I. V. Actual solution to microelement deficiency in lactating cows' diets // Scientific support for livestock development in the Russian Federation. Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Academician L. K. Ernst. 2019. P. 464-467.
9. Tumanova M. I., Timofeev A. S. Feeding of cattle // New science: Theoretical and practical view. 2016. No. 4-2 (75). P. 199-201.
10. Simonov G. A., Magomedov M., Aligazieva P. Feeding of cattle with a complete mixture is more effective // Combined feed. 2013. No. 10. P. 63-64.
11. Heterotic F1 hybrids of squash / A. V. Medvedev, S. V. Kuzmin, A. V. Tikhonova, et al. // Potatoes and vegetables. 2019. No. 5. P. 38-40. doi: 10.25630/PAV.2019.49.75.009
12. Assessment of food security in Russia / I. N. Safiullin, B. G. Ziganshin, E. F. Amirova, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2021 Vol. 16. No. 2(62). P. 124-132. doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132
13. Operation of a laboratory setup for studying the cutting process of plant materials / N. P. Ayugin, N. M. Semashkin, D. B. Romanov, et al. // In the collection: Agrarian science and education at the present stage of development: experience, problems and ways of their solution. Proceedings of the XIV International scientific and practical conference. Ulyanovsk. 2024. P. 418-424.
14. Study of a device for crushing of grain / B. M. Sabirov, B. G. Ziganshin, A. V. Dmitriev, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2023. Vol. 17. No. 1 (69). P. 75-79. doi: 10.12737/2073-0462-2023-75-79
15. Shaprov M. N., Semin D. V., Sadovnikov D. A. Specification of the power parameters of the cutting process of peeled pulp of cucurbits crops // Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. VolSAU. Volgograd. 2012. No. 2 (26). P. 137-141.
16. Determining the energy consumption of the process of grinding by cutting in a feed grinder / R. S. Popoldnev, B. G. Ziganshin, A. V. Aleshkin A., et al. // Vestnik of Kazan state agrarian university. 2023. Vol. 18. No. 4(72). P. 82-88. doi: 10.12737/2073-0462-2023-82-88
17. Brusenkov A.V., Vedishchev S.M. Experimental study of the forces of root crop cutting with a blade // Issues of modern science and practice. 2011. No. 2 (33). University named after V.I. Vernadsky. P. 64-67.
18. Antonov N.M., Lebed P.I., Iskusnov Yu. V. Results of experimental studies on specification of the cutting forces of fruits and root crops // Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. VolSAU. Volgograd. 2012 No. 2 (26). P. 137-141.
19. Study of the influence of geometric knife parameters on specific work of feeds cutting / N. P. Ayugin, A. V. Morozov, N. M. Semashkin, et al. // AIP Conf. Proc. 2022. 2503. P. 030015. doi: 10.1063/5.0099463.
20. Suitable cutting efforts of root crops / Yu. M. Isaev, E. I. Zotov, V. V. Khabarova, et al. // Advances in modern natural science. 2009. No. 5. P. 23.
21. Savvina E. A., Morozov V. B., Morozova T. G. Experimental and computational justification of geometric parameters of root crop cutting // Agrotechnics and energy supply. 2017. No. 4 (17). P. 20-27.