

## Изучение процесса резания кормовой свеклы

**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»

**Д. Б. Романов**, 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 систематизации основных факторов (скорость резания, толщина ножа, угол заточки и угол скольжения ножа, острота режущей кромки лезвия ножа, температура исходного материала), влияющих на удельное усилие резания кормовой свеклы. 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 2 мм до 8 мм, с углом заточки от 10 до 70 градусов, при угле скольжения ножа от 0 до 50 градусов и остроте режущей кромки лезвия ножа от 10 мкм до 200 мкм. Скорость резания изменяли от 1 м/с до 30 м/с. В качестве исследуемого материала была использована кормовая свекла сорта Линда. Результаты экспериментов показали, что наименьшее усилие резания наблюдали при использовании ножей с односторонней заточкой толщиной 2 мм при угле заточки 10 градусов. При увеличении скорости ножа до 25 м/с отмечается снижение удельного усилия резания  $P$  на 59,4 %, однако увеличение скорости резания до 30 м/с не приводит к дальнейшему  $P$ . При угле скольжения ножа в интервале 10...30 градусов наблюдается снижение удельного усилия резания на 31,7 %. По мере снижения остроты режущей кромки ножа с 10 мкм до 200 мкм усилие резания кормовой свеклы увеличивается в среднем на 32 %.

**Ключевые слова:** удельное усилие резания, кормовая свекла, нож, угол заточки, угол скольжения, острота режущей кромки, температура растительного материала

**Для цитирования:** Аюгин Н. П., Семашкин Н. М., Курдюмов В. И., Романов Д. Б. Изучение процесса резания кормовой свеклы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 173-181. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-173-181

## Study of the process of feed beetroot cutting

**N. P. Ayugin**✉, **N. M. Semashkin**, **V. I., Kurdyumov**, **D.B. Romanov**

1FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉nikall85g@yandex.ru

**Abstract.** The work is devoted to the study and systematization of the main factors (cutting speed, knife thickness, sharpening angle and sliding angle of the knife, sharpness of the cutting edge of the blade knife, temperature of the source material) that affect the specific cutting force of feed beetroot. To conduct a study of the cutting process, a laboratory setup was designed and produced, the operation of which 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 2 mm to 8 mm, with a sharpening angle from 10 to 70 degrees, with a sliding angle of the knife from 0 up to 50 degrees and the sharpness of the cutting edge of the knife blade from 10  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$ . The cutting speed was varied from 1 m/s to 30 m/s. Feed beetroot of Linda variety was used as the test material. The results of the experiments showed that the lowest cutting force is observed when using knives with single-sided sharpening, 2 mm thick, at a sharpening angle of 10 degrees. With an increase in the knife speed to 25 m/s, a decrease in the specific cutting force  $P$  by 59.4% is observed, however, an increase in the cutting speed to 30 m/s does not lead to further  $P$ . With a knife sliding angle in the range of 10...30 degrees, a decrease in the specific force of cutting by 31.7% is observed. As the sharpness of the knife cutting edge decreases from 10  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$ , the cutting force of feed beetroot increases by an average of 32%.

**Keywords:** specific cutting force, feed beetroot, knife, sharpening angle, sliding angle, sharpness of the cutting edge, temperature of plant material.

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

### Введение

Технология подготовки кормов к скармливанию, а также уборка урожая и переработка сельхозпродукции в большинстве случаев подразумевают резание и (или) измельчение растительных материалов. Необходимость операции измельчения во многих технологических процессах привела к созданию большого количества разнообразных измельчающих аппаратов, использующих различные принципы разрушения растительных материалов: от резания лезвием ножа до дробления ударом. В связи с этим существует необходимость комплексного изучения процесса измельчения растительных материалов с целью усовершенствования как самого процесса, так и измельчителей и их рабочих органов.

Энергетические затраты на измельчение кормов обусловлены их физико-механическими свойствами, режимными параметрами измельчителя, конструктивными параметрами ножей, т.е. скоростью резания [1, 2], типом режущих элементов [3, 4], геометрическими характеристиками ножей [5, 6, 7], а также температурой измельчаемого материала [8].

В период лактации с целью повышения молочной продуктивности в рационе коров используют кормовую свеклу до 15...30 кг на голову. При соблюдении агротехнических требований урожайность кормовой свеклы достигает 500...700 ц/га. В рацион коров включают как ботву, так и корнеплоды в свежем и силосованном видах [9, 10].

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ, в которых рассматриваются вопросы снижения энергоемкости измельчения различных растительных материалов, полученные в них данные отражают взаимодействие лишь отдельных факторов.

Цель исследования – изучение и систематизация основных факторов (скорость резания, толщина ножа, угол заточки ножа, угол скольжения ножа, острота режущей кромки лезвия ножа, температура измельчаемого материала), влияющих на удельное усилие резания кормовой свеклы.

### Материалы и методы

Для изучения процесса резания растительных материалов была разработана и изготовлена лабораторная установка, принцип действия которой сходен с принципом действия ротационного копра [11].

При проведении лабораторных исследований было использовано несколько типов ножей: нож с односторонней заточкой, гребенчатый нож с односторонней заточкой, нож с двухсторонней заточкой и П-образный нож. Толщину ножей варьировали от 2 мм до 8 мм, угол заточки – от 10 до 70 градусов, а остроту режущей кромки – от 10 мкм до 200 мкм. При этом установка позволяла регулировать угол скольжения ножа от 0 до 50 градусов, а скорость резания – от 1 м/с до 30 м/с.

Остроту режущей кромки ножей определяли методом снятия оттисков.

При проведении поисковых экспериментов 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 двухсторонней заточкой, поэтому в дальнейших исследованиях ножи с двухсторонней заточкой не использовали.

Опыты проводили с использованием кормовой свеклы сорта Линда, средней влажностью 90,2%. Учитывая размеры, корнеплод перед проведением опытов разрезали на 4 части (рис.1).



Рис. 1. Подготовка к проведению опытов по определению удельного усилия резания кормовой свеклы сорта Линда

Усилие резания растительных материалов оценивали по показаниям двух S-образных тензодатчиков, установленных под платформой, на которую укладывали образцы кормовой свеклы.

Показания с тензодатчиков поступали на измерительную систему QMBox-1 с модулем АЦП QMS85 (тензостанция), которая предназначена для динамических тензоизмерений с частотой до 250 кГц.

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

**Результаты**

Скорость ножа является одним из ключевых параметров, оказывающих влияние на энергетические показатели процесса резания растительных материалов (рис. 2).

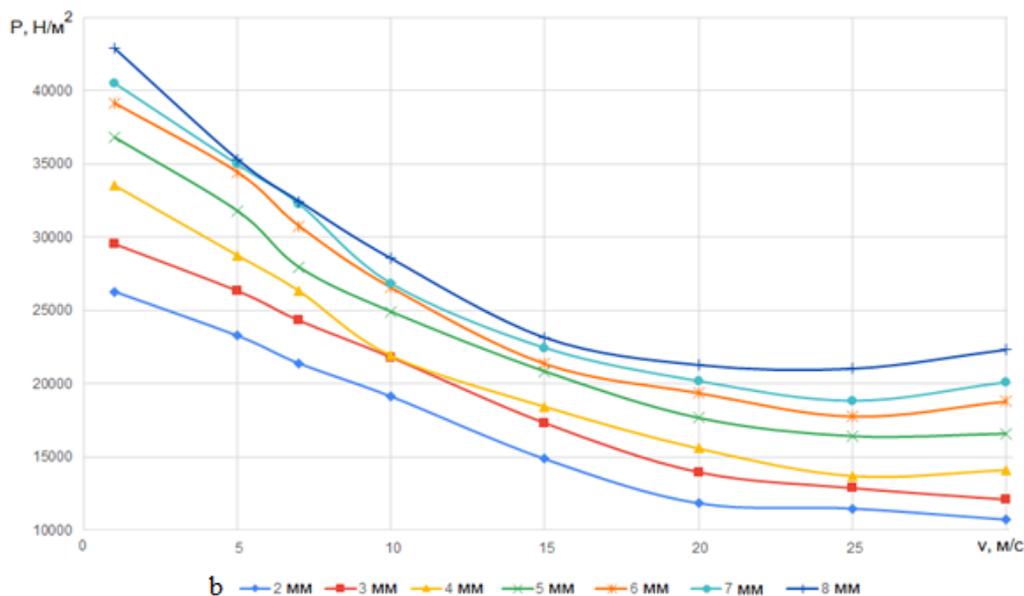


Рис. 2. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости и толщины ножей с односторонней заточкой 30 градусов, углом скольжения 0 градусов при остроте режущей кромки лезвия 20 мкм

При увеличении скорости резания с 1 м/с до 25 м/с удельное усилие резания кормовой свеклы снижается в среднем на 54,9 % поскольку происходит локализованное разрушение материала, минимизируется распределение сжимающего усилия на близлежащие волокна растительного материала. При увеличении линейной скорости ножа от 25 м/с до 30 м/с наблюдается незначительное увеличение удельного усилия резания на 2,3 %.

Увеличение угла скольжения ножа  $\tau$  до 30...40 градусов приводит к снижению удельного усилия резания кормовой свеклы при скорости резания 5 м/с на 41,7 %, 10 м/с – 30,7 %, 20 м/с – 30,2 %, 30 м/с – 24,2 % по сравнению со значением, соответствующим  $\tau = 0$  градусов (ри. 3). Снижение усилия резания связано с трансформацией угла заточки ножа.

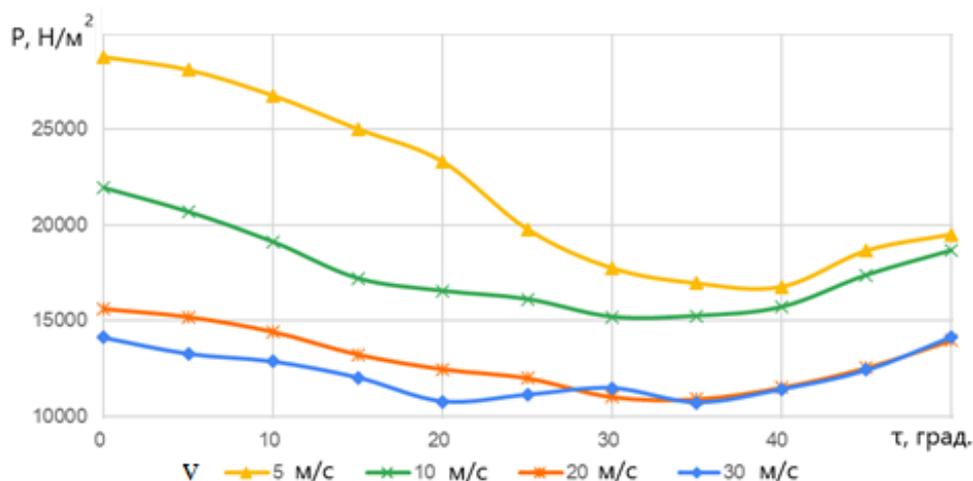


Рис. 3. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от угла скольжения  $\tau$  и скорости ножа толщиной 4 мм, заточенного под углом 30 градусов с остротой режущей кромки 10 мкм

#### 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

При дальнейшем увеличении угла скольжения до 50 градусов удельное усилие резания возрастает на всех скоростях резания, что обусловлено увеличением силы трения между ножом и измельчаемым материалом за счет большей площади соприкосновения.

Увеличение угла заточки ножа от 10 до 70 градусов приводит к увеличению удельного

усилия резания кормовой свеклы при скорости ножа 5 м/с и 10 м/с в 4,1...4,4 раза, при скорости резания 20 м/с и 30 м/с – 6,5...7,1 раза (рис. 4). При превышении угла заточки ножа более 35 градусов фаска ножа начинает ломать корнеплод, особенно это выражено по мере увеличения скорости ножа.

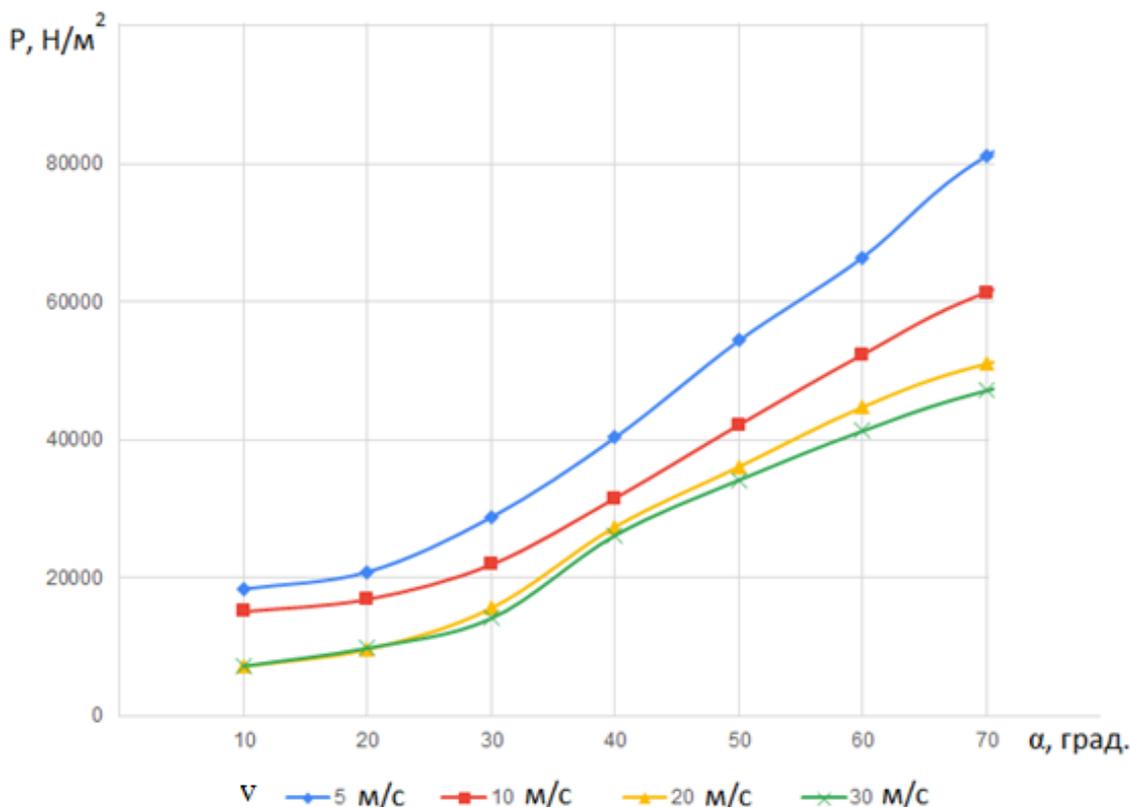


Рис. 4. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от угла заточки  $\alpha$  и скорости ножа толщиной 4 мм при угле скольжения 0 градусов

Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости резания, толщины ножа, угла заточки ножа и угла скольжения ножа имеет вид:

$$P = 10243,67 - 2194,73v + 4692,38b + 192,30\alpha - 443,06\tau + 69,52v^2 - 0,76v^3 - 178,79b^2 + 9,58\alpha^2 + 8,17\tau^2, \quad (1)$$

где  $P$  - удельное усилие резания кормовой свеклы,  $\text{Н/м}^2$ ;  $v$  - скорость резания,  $\text{м/с}$ ;  $b$  - толщина ножа,  $\text{мм}$ ;  $\alpha$  - угол заточки ножа,  $\text{град.}$ ;  $\tau$  - угол скольжения ножа,  $\text{град.}$

Значение коэффициента корреляции, равное 0,9038, указывает на то, что связь между выбранными факторами и удельным усилием резания сильная.

Снижение остроты лезвия (увеличение толщины режущей кромки ножа) с 10 мкм до 200 мкм приводит к увеличению усилия резания в среднем на 32 % (рисунок 5).

Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от остроты режущей кромки ножа, толщины, угла заточки и скорости резания имеет вид:

$$P = 18607,98 - 2890,62v + 3869,17b - 168,76\alpha + 52,75\delta + 113,41v^2 - 1,48v^3 - 184,91b^2 + 15,79\alpha^2 - 0,09\delta^2, \quad (2)$$

где  $\delta$  - острота режущей кромки ножа,  $\text{мкм}$ .

Значение множественного коэффициента корреляции, равное 0,9864, свидетельствует о наличии тесной связи между выбранными факторами и удельным усилием резания.

Температура растительного материала также оказывает существенное влияние на изменение удельного усилия резания (рис.6).

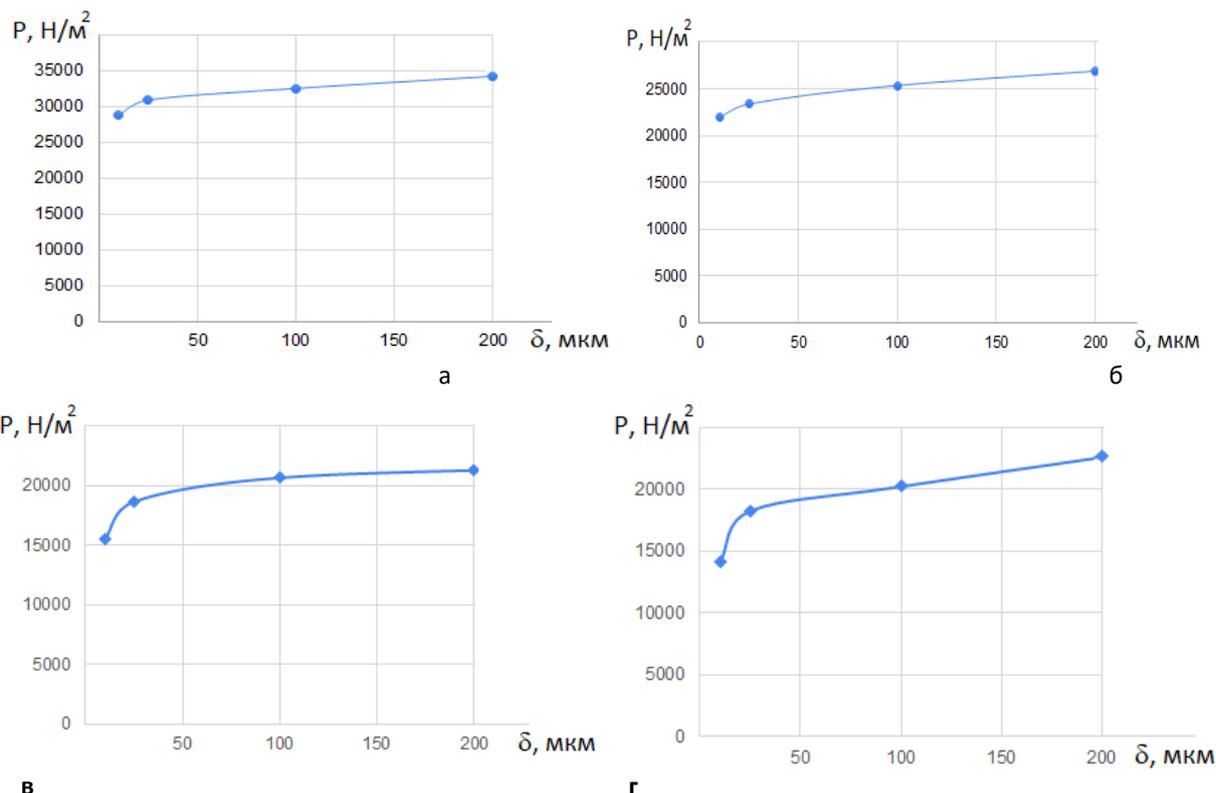


Рис. 5. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от остроты режущей кромки ножа при толщине ножа 4 мм, угле заточки 30 градусов и угле скольжения 0 градусов и скоростях резания в: а – 5 м/с; б – 10 м/с; в – 20 м/с; г – 30 м/с

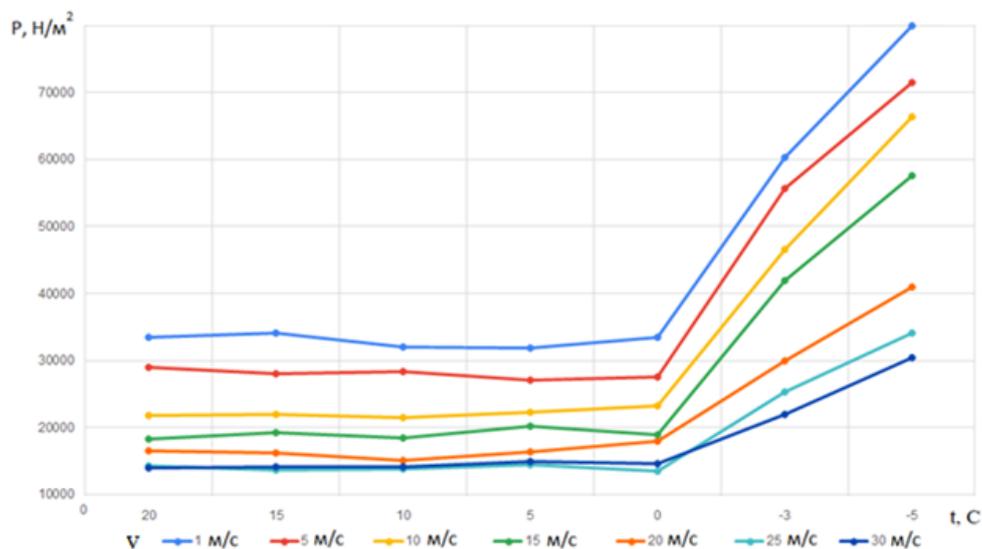


Рис. 6. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от температуры кормовой свеклы и скорости ножа толщиной 4 мм при угле скольжения 0 градусов и угле заточки лезвия ножа 30 градусов

Снижение температуры от 20 °С до 0 °С не оказывает заметного изменения удельного усилия резания. При температуре ниже -2 °С влага, находящаяся в кормовой свекле, кристаллизуется в лед, в результате чего удельное усилие резания кормовой свеклы возрастает в 2,1...3 раза.

Зависимость удельного усилия резания от скорости резания и температуры кормовой свеклы имеет вид:

$$P = 48337,46 - 1535,23v - 2741,01t + 19,83v^2 + 119,68t^2, \quad (3)$$

где  $t$  – температура кормовой свеклы, °С.

Коэффициент корреляции, равный 0,903, указывает на значительную связь между выбранными факторами и удельным усилием резания.

Наряду с вышерассмотренными факторами на удельное усилие резания существенное влияние оказывает также конфигурация ножа – наличие или отсутствие на фаске ножа кольцевых канавок в виде гребенки (рис. 7).

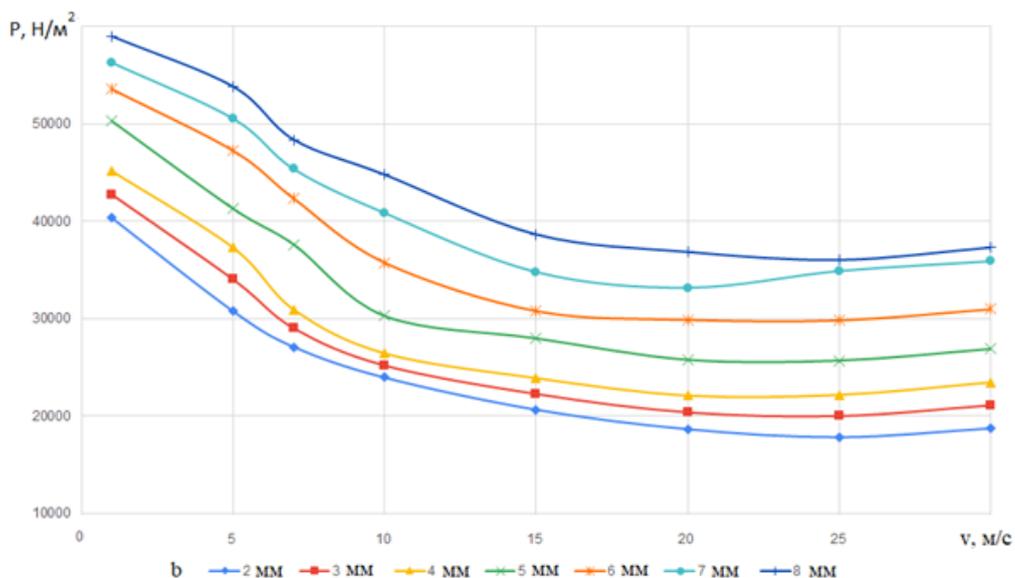


Рис. 7. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости резания и толщины гребенчатого ножа при угле заточки 30 градусов и угле скольжения ножа 0 градусов

При резании гребенчатым ножом с увеличением скорости ножа от 1 м/с до 20 м/с наблюдается снижение удельного усилия резания кормовой свеклы в среднем на 46,2 %. Дальнейшее увеличение скорости ножа приводит к незначительному увеличению удельного усилия резания.

Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости резания, угла

скольжения и толщины гребенчатого ножа имеет вид:

$$P = 41748,75 - 2896,61v + 1925,26b - 155,83t + 82,35v^2 - 0,52v^3 + 106,00b^2 + 0,34t^2 + 0,08t^3. \quad (4)$$

На рисунке 8 представлена зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости П-образного ножа и его толщины. Достоинство этой конфигурации ножей – отсутствие необходимости их заточки, простота и технологичность изготовления [12].

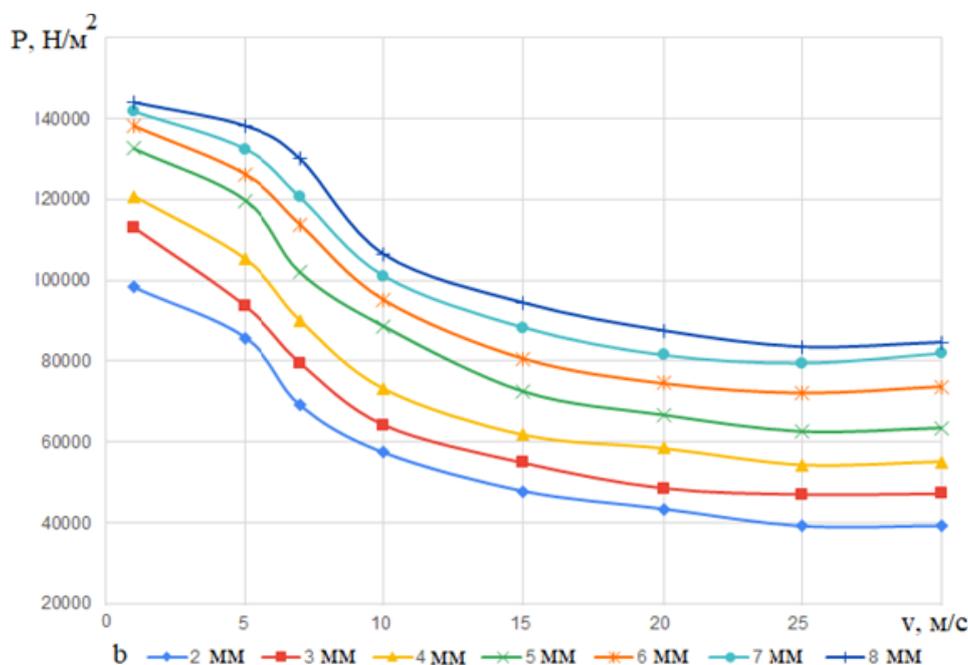


Рис. 8. Зависимость удельного усилия резания кормовой свеклы от скорости П-образного ножа (без заточки) и его толщины

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

$$P = 112767 - 11633,1v + 11403,4b + 464,4v^2 - 6,2v^3 - 289,8b^2. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции уравнения регрессии составляет 0,995.

Динамика снижения удельного усилия резания кормовой свеклы при использовании П-образных ножей аналогична динамике, наблюдаемой при использовании гребенчатых ножей и ножей с односторонней заточкой. При достижении скорости ножа  $v = 20$  м/с удельное усилие резания  $P$  снижается на 48,1 % по сравнению с  $P$ , полученном при  $v = 1$  м/с. Однако использование П-образных ножей приводит к смятию растительных волокон и, как следствие, по сравнению с остальными типами ножей, удельное усилие разрушения материала у них в среднем в 2,6 раза выше по сравнению с гребенчатым ножом и в 3,7 раза по сравнению с ножом с односторонней заточкой.

#### Обсуждение

Опубликованные работы по исследуемой тематике отражают взаимодействие лишь основных факторов в фрагментированном виде (определенный угол заточки, угол скольжения, толщина ножа, скорость резания и температура растительного материала). Результаты исследований, приведенные авторами [13, 14 15], показывают, что с увеличением скорости резания затраты энергии на процесс измельчения уменьшаются, однако, в данных исследованиях не отражены энергетические затраты при измельчении кормовой свеклы.

Исследования [16, 17, 18], посвященные определению влияния угла скольжения ножа на удельную работу резания корнеплодов, подтверждают снижение затрат энергии при достижении угла скольжения 30 градусов, но эти исследования выполнены на маятниковых копрах, где скорость резания ограничена 7 м/с.

Кроме того, ранее проведенные исследования [19, 20] не раскрывают комплексного влияния

скорости резания, угла заточки, угла скольжения, остроты режущей кромки ножа и температуры кормовой свеклы на энергетические показатели процесса резания.

#### Заключение

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Для измельчения кормовой свеклы с энергетической точки зрения наиболее целесообразным является использование ножей толщиной 2 мм с односторонней заточкой и остротой режущей кромки 10 мкм.

2. При резании кормовой свеклы факторы, влияющие на изменение удельного усилия резания, по значимости располагаются в следующем порядке: угол заточки ножа, его скорость, угол скольжения, толщина ножа и острота режущей кромки. Увеличение угла заточки от 10 градусов до 70 градусов приводит к возрастанию удельного усилия резания до 7,1 раза. Возрастание скорости резания до 30 м/с позволяет снизить удельное усилие резания для всех типов ножей в среднем на 52 %. При обеспечении оптимального угла скольжения  $\tau$  в интервале 30...40 градусов удельное усилие резания кормовой свеклы снижается в среднем на 32,8 % по сравнению с  $\tau=0$  градусов. Увеличение толщины ножа в интервале от 2 мм до 8 мм приводит к увеличению удельного усилия резания кормовой свеклы на 63...80 % в зависимости от типа ножа. Снижение остроты режущей кромки с 10 мкм до 200 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания кормовой свеклы на 32 %.

3. Температура кормовой свеклы в интервале от 20 °С до 0 °С не оказывает существенного влияния на изменение удельного усилия резания, но при опускании температуры ниже -2 °С в свекле происходит кристаллизация влаги, в результате чего удельное усилие резания увеличивается в 2,1...3 раза.

#### Литература

1. Результаты производственных испытаний экспериментального измельчителя корнеплодов / В. В. Новиков, В. С. Зотеев, О. А. Камышева и др. // Известия Оренбургского ГАУ. № 2(64). С. 75–77.
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. Method and results of studying the influence of grinder knife parameters on specific work of feed cutting / N. Ayugin, V. Isaychev, R. Khalimov R., et all. // BIO Web of Conferences 37..2021. P. 00022 doi: 10.1051/bioconf/20213700022
4. Определение энергоёмкости процесса измельчения резанием в измельчителе кормов / Р. С. Пополднев, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 4(72). С. 82-88.
5. Заплетников И. Н., Шеина А. В. Зависимость реологических характеристик овощей от скорости резания в овощерезательных машинах // Вест. ДонНУЭТ. 2013. С. 82-90.
6. Булатов С.Ю., Смирнов Р. А. Анализ факторов, влияющих на рабочий процесс измельчителя корнеплодов // Вестник НГИЭИ. Вып. № 10 (29). 2013. С. 15 - 23.

#### **4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)**

7. Конструктивные особенности ножа устройства для измельчения корнеклубнеплодов / С. Н. Шуханов, Г. Ф. Ханхасаев, В. Д. Коваливнич и др. // Материалы международной научно-практической конференции (Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники). Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. С. 407-408.

8. Механизированная заготовка и подготовка к скармливанию кормовой свёклы / Г. П. Юхин, В. М. Мартынов, П. И. Огородников и др. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6. С. 98-100.

9. Бекнозарова З. Ф., Турдибаева М. У. Выращивание сахарной свеклы // Молодой ученый. 2016. № 12 (116). С. 1055-1057.

10. Спичак В. В., Сапронов Н. М., Салтык И. П. Сахарная свекла - сырье для производства сахара. Курск: Росийский НИИ сахарной промышленности, 2008. 263 с.

11. 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.

12. 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

13. Кузьмов Н. Т. Влияние скоростного режима на затраты энергии при измельчении силоса // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1973. № 3. С. 24–25.

14. Schuldt S. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 230. P. 55-62.

15. 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.

16. Антонов Н. М., Лебедь П. И., Искуснов 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.

17. 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. 2503. 2022. P. 030015. doi: 10.1063/5.0099463

18. Модернизация технических средств для измельчения корнеклубнеплодов / С. Н. Шуханов, П. А. Болоев, В. Д. Коваливнич и др. // Аграрная наука. 2015. № 5. С. 30 -31

19. Оптимальные усилия резания корнеплодов / Ю. М. Исаев, Е. И. Зотов, В. В. Хабарова и др. // Успехи современного естествознания. 2009. № 5. С. 23

20. 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. Results of production tests of an experimental root crop chopper / V.V. Novikov, V.S. Zoteev, O.A. Kamyshева, et al. // Vestnik of Orenburg State Agrarian University. No. 2(64). P. 75–77.

2. Kurdyumov V. I., Ayugin P. N., Ayugin N. P. Analysis of factors affecting cutting energy intensity // 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. Specification of the energy intensity of the grinding process by cutting in a feed grinder / R. S. Popoldnev, B. G. Ziganshin, A. V. Aleshkin, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2023. Vol. 18. No. 4(72). P. 82-88.

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. Bulatov S. Yu., Smirnov R. A. Analysis of factors influencing the working process of a root crop chopper // Vestnik of Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics. Issue No. 10 (29), 2013. P. 15-23.

7. Design features of the knife of the device for chopping of root crops / S.N. Shukhanov, G.F. Khankhasaev, V.D. Kovalivnich et al. // Materials of the international scientific and practical conference (Improving the design, operation and technical service of automotive and agricultural machinery). Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2013. P. 407-408.

8. Mechanized harvesting and preparation for feeding of fodder beet / G. P. Yukhin, V. M. Martynov, P. I. Ogorodnikov et al. // Vestnik of Orenburg State Agrarian University. 2016. No. 6. P. 98-100.

9. Beknozharova Z. F., Turdibaeva M. U. cultivation of sugar beetroot // Young scientist. 2016. No. 12 (116). P. 1055-1057.

10. Spichak V. V., Saprionov N. M., Saltyk I. P. Sugar beetroot - raw material for sugar production. Kursk: Russian Research Institute of Sugar Industry, 2008. 263 p.
11. Operation of a laboratory setup for studying the process of cutting 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 solutions. Proceedings of the XIV International scientific and practical conference. Ulyanovsk. 2024. Pp. 418-424.
12. Study of the device for grain crushing / 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
13. Kuzmov N.T. Influence of the speed mode on energy costs when crushing silage // Mechanization and electrification of socialist agriculture. 1973. No. 3. P. 24–25.
14. Schuldt S. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 230. P. 55–62.
15. Brusenkov A. V., Vedishchev S. M. Experimental study of the forces of cutting root crops with a blade // Issues of modern science and practice. 2011. No. 2 (33). Vernadsky University. P. 64–67.
16. Antonov N. M., Lebed P. I., Iskusnov Yu. V. Results of experimental studies to determine 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.
17. 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. 2503. 2022. P. 030015. doi: 10.1063/5.0099463
18. Modernization of technical means for crushing root crops / S. N. Shukhanov, P. A. Boloev, V. D. Kovalivnich, et al. // Agrarian science. 2015. No. 5. P. 30-31
19. Suitable cutting efforts for root crops / Yu. M. Isaev, E. I. Zotov, V. V. Khabarova et al. // Advances in modern natural science. 2009. No. 5. P. 23
20. Savvina E. A., Morozov V. B., Morozova T. G. Experimental and computational justification of geometric parameters for cutting root crops // Agrotechnics and energy supply. 2017. No. 4 (17). P. 20-27