

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

doi:10.18286/1816-4501-2025-2-203-211

УДК 631.363.2

К вопросу определения удельного усилия резания стеблей кукурузы

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

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

✉nikall85g@yandex.ru

Резюме. Работа посвящена анализу влияния базовых факторов, влияющих на энергетические показатели резания стеблей гибрида кукурузы «Краснодарский 230 АМБ». В число этих факторов входят: скорость резания, толщина, угол заточки и острота режущей кромки ножа, а также угол скольжения. Исследования проведены на ротационном копре с использованием нескольких типов ножей, отличающихся формой режущей кромки и типом заточки. Резание осуществляли ножами толщиной 2...8 мм с шагом 1 мм, углом заточки 10...80 градусов с шагом 10 градусов, углом скольжения 0...50 градусов с шагом 5 градусов, остротой режущей кромки ножа 20...250 мкм, скорость резания варьировалась в интервале от 1 до 30 м/с. Увеличение скорости резания стеблей кукурузы с 1 м/с до 30 м/с при использовании ножей с односторонней заточкой под углом 30 градусов и толщиной от 2 до 8 мм приводит к снижению удельного усилия резания на 80 %. При угле скольжения 50 градусов наблюдается уменьшение удельного усилия резания в среднем на 44,2 % по сравнению с углом скольжения 0 градусов. С точки зрения обеспечения минимального усилия резания целесообразна заточка ножа под углом 10 градусов, но в этом случае наблюдается относительно быстрое затупление режущей кромки ножа. Увеличение угла заточки до 30 градусов обеспечивает лучшую износостойкость режущей кромки ножа, но приводит к увеличению удельного усилия резания в среднем на 58 %. Снижение остроты режущей кромки ножа от 20 мкм до 250 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания стеблей кукурузы в среднем – 111 %, а увеличение толщины ножа от 2 мм до 8 мм приводит к увеличению удельного усилия резания стеблей кукурузы в 2,04...2,45 раза в зависимости от скорости резания.

Ключевые слова: измельчение, удельное усилие резания, стебли кукурузы, толщина ножа, острота режущей кромки ножа, угол скольжения, угол заточки, скорость резания

Для цитирования: Аюгин Н. П. К вопросу определения удельного усилия резания стеблей кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №2 (70). С. 203-211. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-203-211

On the issue of identification of the specific cutting force of corn stalks

N. P. Ayugin✉

FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural University

432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉nikall85g@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to the analysis of the influence of basic factors affecting energy parameters of cutting stalks of "Krasnodar 230 AMB" hybrid corn. These factors include cutting speed, thickness, sharpening angle and knife sharpness, as well as sliding angle. The studies were conducted on a rotary cutter using several types of knives with different cutting edge shapes and sharpening types. Cutting was performed with knives of 2-8 mm thick with a 1 mm pitch, sharpening angle of 10-70 degrees with a 10 degree pitch, sliding angle of 0-50 degrees with a 5 degree pitch, cutting edge sharpness of 20-250 μm , cutting speed varied in the range from 1 to 30 m/s. An increase in the cutting speed of corn stalks from 1 m/s to 30 m/s using knives with single-sided sharpening at an angle of 30 degrees and a thickness of 2 to 8 mm leads to a decrease in the specific cutting force by 80%. At a sliding angle of 50 degrees, a decrease in the specific cutting force is observed by an average of 44.2% compared to a sliding angle of 0 degrees. In terms of ensuring minimum cutting force, it is advisable to sharpen the knife at an angle of 10 degrees, but in this case, the cutting edge of the knife becomes relatively dull. Increasing the sharpening angle to 30 degrees ensures better wear resistance of the cutting edge of the knife, but leads to an increase in the specific cutting force by an average of 58%. Reducing the sharpness of the knife from 20 μm to 200 μm leads to an increase in the specific cutting force of corn stalks by an average

of 111%, and increasing the thickness of the knife from 2 mm to 8 mm leads to an increase in the specific cutting force of corn stalks by 2.04...2.45 times, depending on the cutting speed.

Keywords: chopping, specific cutting force, corn stalks, knife thickness, cutting edge sharpness, sliding angle, sharpening angle, cutting speed

For citation: Ayugin N. P. On the issue of identification of the specific cutting force of corn stalks // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;2(70): 203-211 doi:10.18286/1816-4501-2025-2-203-211

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

Введение

Измельчение кормов представляет собой ключевой этап в кормлении сельскохозяйственных животных. Этот процесс не только облегчает усвоение питательных веществ, но и имеет множество других аспектов, влияющих на здоровье и продуктивность животных [1, 2].

Исследования показывают, что у животных, кормящихся измельченными кормами, лучшие результаты по сравнению с животными, получавшими корма в неизмельченном виде. Согласно исследованиям [3, 4], было установлено, что жвачные, которые получали корма в измельченном виде, показывали общую продуктивность на 15 % выше по сравнению с животными, поедавшими корма в неизмельченном виде.

При измельчении увеличивается площадь поверхности корма, что способствует более активному взаимодействию с ферментами, выделяющимися в процессе пищеварения [5]. Измельчение также позволяет добиться равномерного перемешивания компонентов кормосмеси, что важно для создания сбалансированного рациона животных [6].

На энергетические показатели измельчения кормов оказывает влияние большое число факторов: скорость резания, угол заточки ножа, угол скольжения, толщина ножа и острота режущей кромки ножа [7, 8, 9].

Одним из ключевых компонентов кормовых рационов для молочного стада является кукурузный силос [10, 11]. Кукуруза считается ведущей силосной культурой в мировом сельском хозяйстве, занимая первое место среди всех силосных культур и прекрасно сохраняясь на любом этапе спелости. В структуре зимних объемистых кормов кукурузный силос составляет примерно 44 % [12].

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

Материалы и методы

Изучение влияния вышеуказанных факторов на удельное усилие резания стеблей кукурузы осуществляли на ротационном копре (рис. 1). Для расчета удельного усилия резания, определяемого как отношение усилия резания к площади среза, использовали показания тензодатчиков и

фотоизображения каждого среза, запечатленные фотокамерой [13].

При проведении исследований использовали ножи с односторонней заточкой, гребенчатые и П-образные ножи толщиной от 2 мм до 8 мм.

Ножи с односторонней заточкой и гребенчатые ножи были заточены под углом от 10 до 80 градусов, с остротой режущей кромки ножа в диапазоне от 20 до 250 мкм. Скорость резания варьировалась от 1 м/с до 30 м/с.



Рис. 1. Ротационный копёр

При лабораторном исследовании были использованы стебли гибрида кукурузы «Краснодарский 230 АМБ» средней влажностью 83,6 %.

Результаты

На рисунке 2 представлен график изменения удельного усилия резания стеблей кукурузы ножом

с односторонней заточкой под углом 30 градусов при угле скольжения равным 0 градусов и остроте режущей кромки ножа 20 мкм, скорости резания от 1 м/с до 30 м/с и толщине ножа от 2 мм до 8 мм.

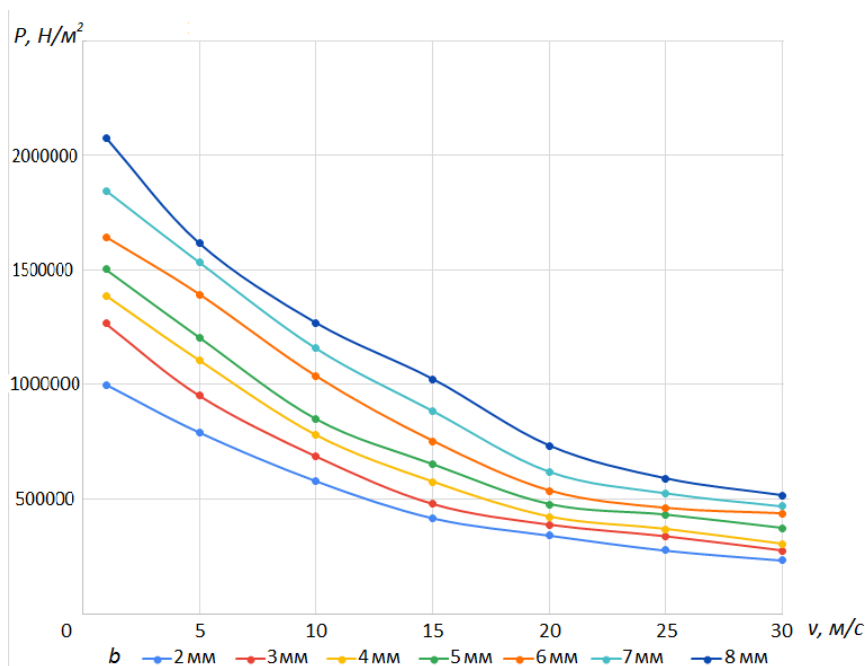


Рис. 2. Влияние скорости резания и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы

При увеличении скорости резания стеблей кукурузы от 1 м/с до 30 м/с наблюдается снижение удельного усилия резания на 76...84 % (в зависимости от толщины ножа).

Увеличение толщины ножа от 2 мм до 8 мм приводит к увеличению удельного усилия резания стеблей кукурузы в 2,04...2,45 раза в зависимости от скорости резания.

На рисунке 3 представлена зависимость влияния скорости резания в интервале от 1 м/с до 30 м/с и угла скольжения ножа в интервале от 0 до 50 градусов при резании ножом толщиной 2 мм, углом заточки 30 градусов, остротой режущей кромки ножа 10 мкм на удельное усилие резания стеблей кукурузы.

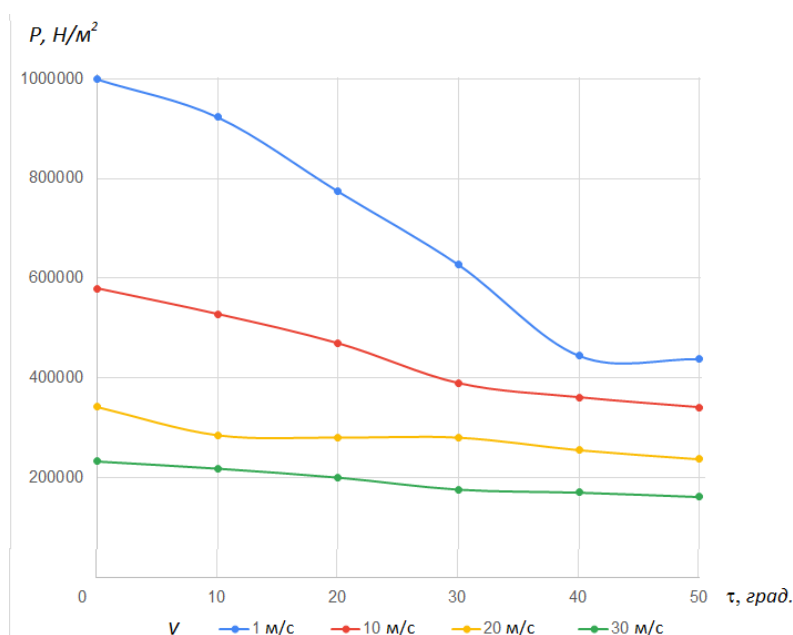


Рис. 3. Влияние скорости резания v и угла скольжения τ на удельное усилие резания стеблей кукурузы

При увеличении угла скольжения ножа с 0 до 50 градусов на скорости резания 1 м/с и 10 м/с наблюдается снижение удельного усилия резания стеблей кукурузы на 56,1 % и 41,1 % соответственно. При скорости резания от 20 м/с до 30 м/с среднее снижение удельного усилия резания составляет 30,5 %. Выявленная зависимость характерна и для ножей большей толщины.

На рисунке 4 представлено влияние скорости резания и угла заточки ножа толщиной 2 мм при

угле скольжения 0 градусов на удельное усилие резания стеблей кукурузы. В ходе экспериментов скорость резания варьировалась от 1 до 30 м/с, а угол заточки лезвия ножа составлял 10...80 градусов. Аналогичные исследования с ножами толщиной до 8 мм продемонстрировали схожие зависимости между скоростью резания и углом заточки на удельное усилие резания.

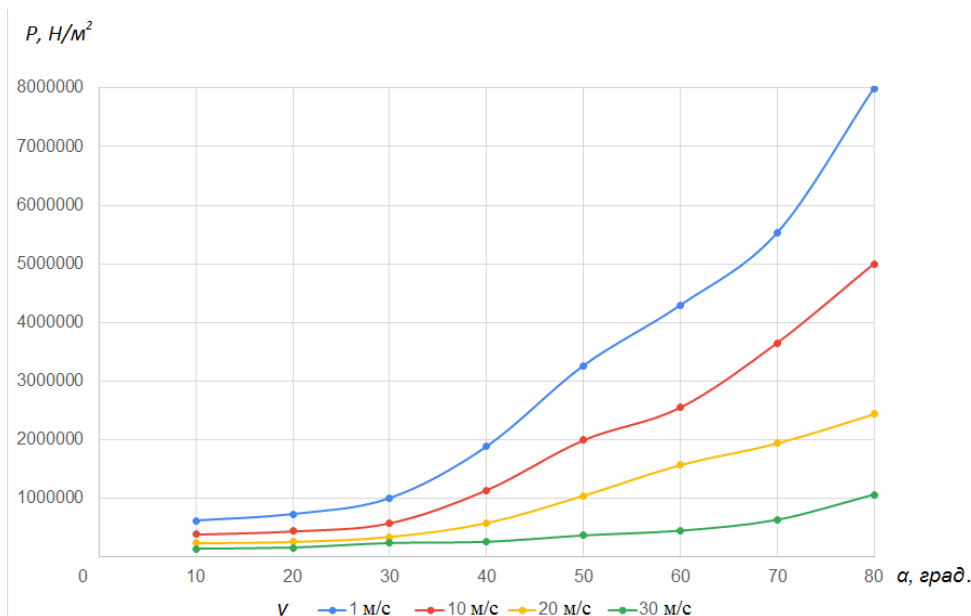


Рис. 4. Влияние скорости резания и угла заточки ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы

Увеличение угла заточки ножа с 10 до 80 градусов приводит к тому, что удельное усилие резания стеблей кукурузы увеличивается в 13 раз при скорости 1 м/с, до 7,6 раза при скорости 30 м/с.

С точки зрения обеспечения минимального усилия резания целесообразна заточка ножа под углом 10 градусов, но в этом случае наблюдается относительно быстрое затупление режущей кромки ножа. Увеличение угла заточки до 30 градусов обеспечивает лучшую износостойкость режущей кромки ножа, но приводит к увеличению удельного усилия резания в среднем на 58 %.

Уравнение регрессии, характеризующее влияние скорости резания, толщины ножа, угла скольжения и угла заточки на удельное усилие резания стеблей кукурузы, имеет вид:

$$P = 1760650 - 125551v + 20616b - 45100\alpha - 10111\tau + 3380v^2 - 40v^3 + 8203b^2 + 1251\alpha^2 - 200\tau^2 + 5\tau^3, \quad (1)$$

где P - удельное усилие резания стеблей кукурузы, Н/м²; v - скорость резания (ножа), м/с; b - толщина ножа, мм; τ - угол скольжения ножа, град.; α - угол заточки ножа, град.

Значение коэффициента детерминации для уравнения (1) составляет 0,76, в то время как коэффициент корреляции равен 0,87.

На графиках (рис. 5) изображено изменение удельного усилия резания стеблей кукурузы при

использовании ножей толщиной 2, 4 и 8 мм, с остротой режущей кромки ножа от 20 до 250 мкм и углом заточки 30 градусов, при скорости резания 20 м/с и угле скольжения 0 градусов.

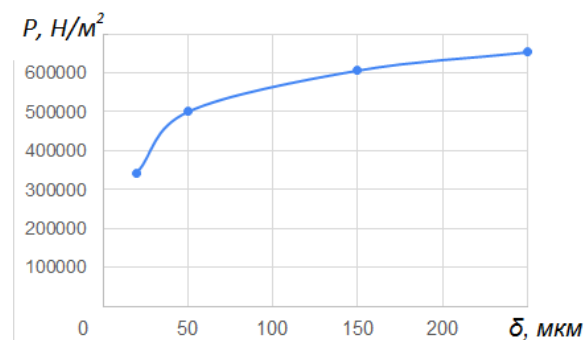
С увеличением толщины режущей кромки от 20 до 250 мкм при скорости резания 20 м/с, угле скольжения 0 градусов происходит увеличение удельного усилия резания стеблей кукурузы от 50 % до 2,1 раза, в зависимости от толщины ножа.

Уравнение регрессии, отражающее влияние остроты режущей кромки ножа (в интервале от 20 мкм до 250 мкм), толщины ножа (в диапазоне от 2 до 8 мм), угла заточки (от 10 до 40 градусов) и скорости резания (от 20 до 30 м/с) на удельное усилие резания стеблей кукурузы, имеет следующий вид:

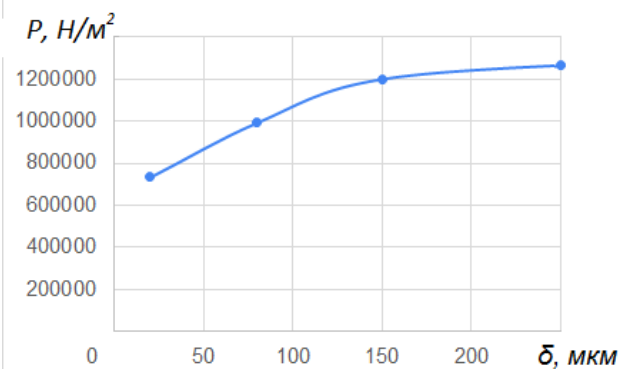
$$P = 21391,3 - 10151,7v + 79784,1b - 1266,3\alpha + 2381,7\delta - 203,0v^2 - 5,3v^3 - 1935,6b^2 + 750,8\alpha^2 - 2,1\delta^2, \quad (2)$$

где δ - острота режущей кромки ножа, град. Значение коэффициента детерминации для уравнения (2) составляет 0,61, в то время как коэффициент корреляции равен 0,78.

На рисунке 6 изображен график влияния скорости резания и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы при использовании гребенчатых ножей, имеющих угол заточки 30 градусов.



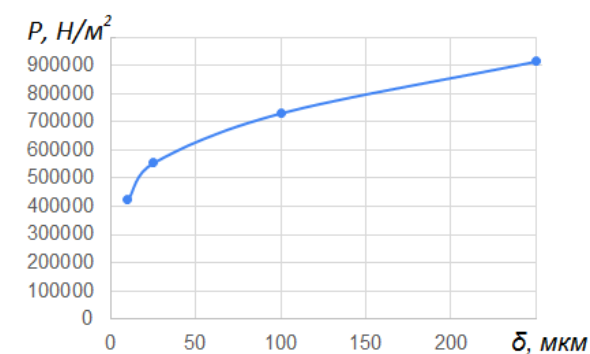
а



б

а – толщина ножа $b = 2$ мм; б – $b = 4$ мм; в – $b = 8$ мм

Рис. 5. Влияние остроты режущей кромки ножа и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы



в

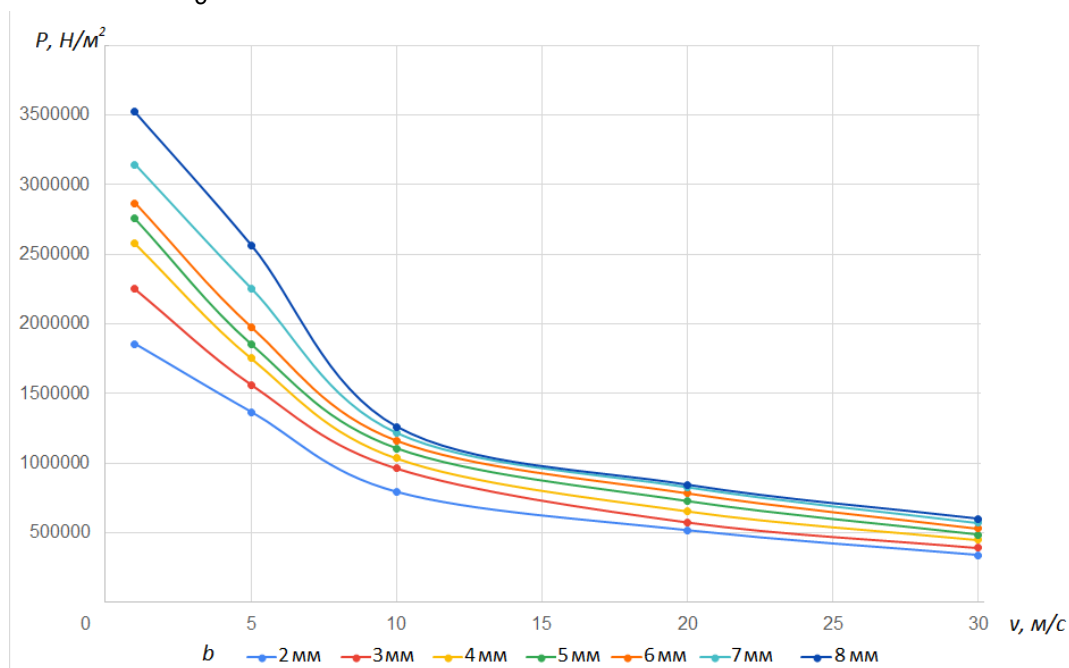


Рис. 6. Влияние скорости резания и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы гребенчатым ножом

Характер снижения удельного усилия резания стеблей кукурузы при использовании гребенчатых ножей аналогичен другим типам ножей. Использование гребенчатых ножей нерационально с точки зрения обеспечения минимального усилия резания, поскольку усилие резания в среднем на 54 % больше, чем при использовании ножей без гребенки.

На рисунке 7 изображен график влияния угла скольжения ножа в интервале от 0 градусов до 30 градусов и толщины ножа от 2 мм до 8 мм на удельное усилие резания стеблей кукурузы на скорости резания 20 м/с при использовании гребенчатых ножей.

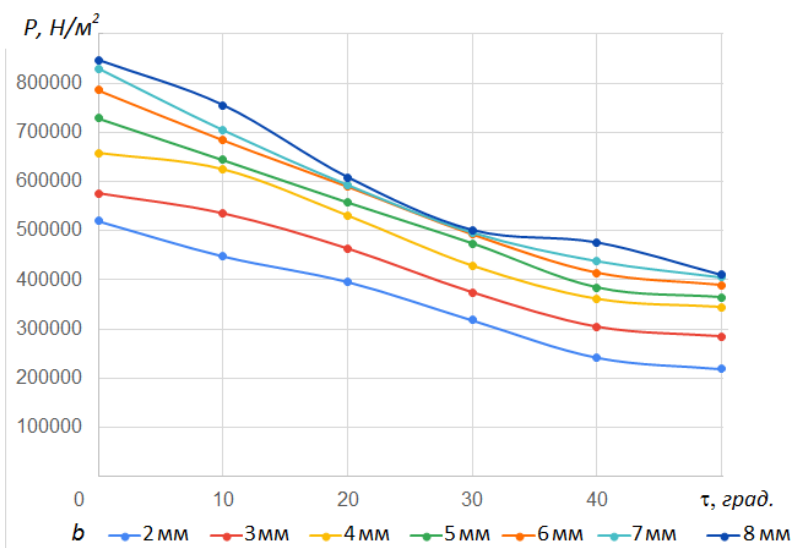


Рис. 7. Влияние скорости и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы гребенчатым ножом

При использовании гребенчатых ножей увеличение угла скольжения от 0 градусов до 50 градусов на скорости резания 20 м/с приводит к снижению удельного усилия резания стеблей кукурузы на 51 %, наличие на лезвии ножа гребенки способствует меньшему смещению растительного материала при резании по сравнению с использованием ножей без гребенки.

Уравнение регрессии, характеризующее влияние скорости резания, толщины ножа и угла скольжения на удельное усилие резания стеблей

кукурузы при использовании гребенчатого ножа, имеет вид:

$$P = 2608086 - 329698v + 114415b - 7650\tau + 15438v^2 - 242v^3 - 3701b^2 - 152\tau^2 + 3\tau^3. \quad (3)$$

Значение коэффициента детерминации для уравнения (3) составляет 0,96, а коэффициент корреляции – 0,98.

На рисунке 8 показан график зависимости толщины ножа и скорости резания при использовании П-образных ножей.

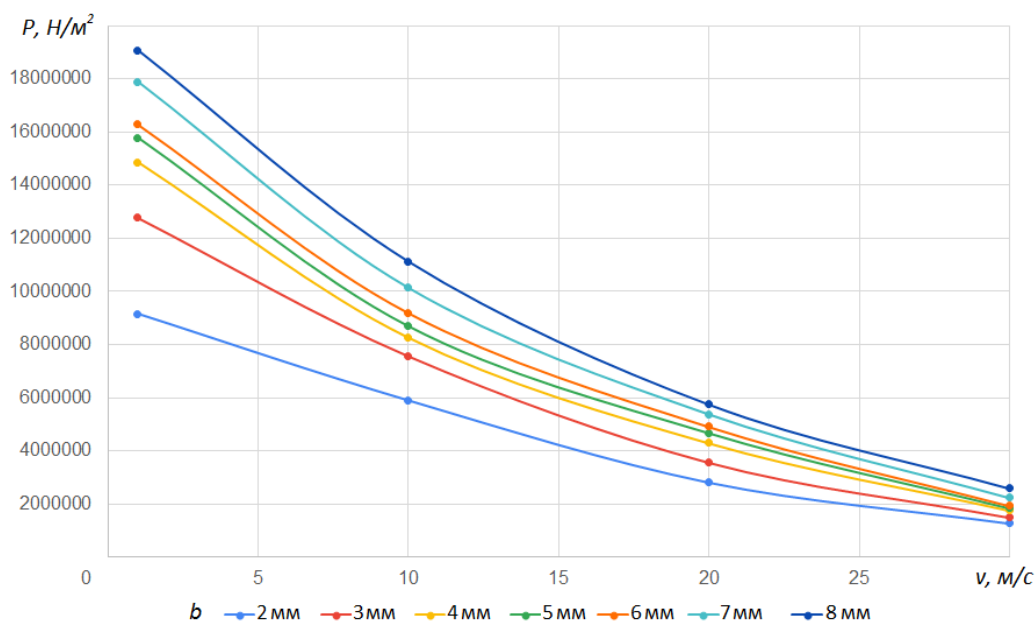


Рис. 8. Влияние скорости резания и толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы П-образными ножами

Уравнение регрессии, характеризующее влияние скорости резания, толщины ножа на удельное усилие резания стеблей кукурузы при использовании П-образного ножа, имеет вид:

$$P = 10929257 - 806400v + 1324297b + 11450v^2 - 59223b^2. \quad (4)$$

Значение коэффициента детерминации для уравнения (4) составляет 0,96, в то время как коэффициент корреляции равен 0,98.

Увеличение скорости П-образного ножа от 1 м/с до 30 м/с приводит к снижению удельного усилия резания стеблей кукурузы в 7,5...10 раз. Увеличение же толщины П-образного ножа от 2 до 8 мм ведет к росту удельного усилия резания в среднем на 90 %.

Обсуждение

Исследования, описанные в разных литературных источниках [14, 15, 16], подтверждают, что с увеличением скорости резания затраты энергии на измельчение уменьшаются, что согласуется с полученными результатами. Опубликовано большое число работ, посвященных изучению влияния угла скольжения ножа на энергетические показатели при резании различных стебельных культур [17, 18, 19]. Также авторами [20, 21] рассмотрены вопросы влияния угла заточки ножей до 30 градусов, но авторами рассматриваются параметры, влияющие на энергетические показатели измельчения в узком диапазоне, они не раскрывают комплексного влияния скорости резания, угла заточки, угла скольжения, остроты режущей кромки ножа и толщины ножа на энергетические показатели измельчения.

Характер изменения основных факторов, влияющих на удельное усилие резания, в большей степени аналогичен ранее полученным результатам, но представленные в данной работе данные отражают комплексное влияние основных конструктивных параметров ножа и скорости резания на удельное усилие резания стеблей кукурузы.

Заключение

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Литература

1. Borotov A. Cutting length the fodders of green stalks by drum chopper // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Т. 883. №. 1. P. 012160.
2. 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
3. Кравченко Р. В. Агробиологическое обоснование получения стабильных урожаев зерна кукурузы в условиях степной зоны Центральной Предкавказья: монография / Р.В. Кравченко. Ставрополь, 2010. 208 с
4. Туманова М. И., Тимофеев А. С. Кормление КРС // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 4-2 (75). С. 199-201.
5. Мискевич О. Л., Гафаров Ш. С. Кормление телят до шестимесячного возраста // Молодежь и наука. 2016. № 5. С. 2.
6. Тимофеев М. Н., Фролов В. Ю., Морозова Н. Ю. Анализ технических средств для измельчения кормов и их классификация // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. С. 399-424.
7. Малинов Г. И., Кондрашов В. Ф., Гаврилов Т. А. Определение углов скольжения лезвия в процессе опорного резания // Ученые записки ПетрГУ. 2012. № 8 (129). С. 40–42.
8. 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 al. // BIO Web of Conferences 37. 2021. P. 00022 doi: 10.1051/bioconf/20213700022
9. Антонов Н. М., Лебедь Н. И., Мамахай А. К. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 3 (43). С. 231-238.
10. Эффективность возделывания перспективных гибридов кукурузы в условиях Смоленской области / Новиков В.М. и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8(39). С. 44-46.

1. Увеличение скорости резания с 1 м/с до 30 м/с при резании стеблей кукурузы ножами с односторонней заточкой под углом 30 градусов и толщиной от 2 мм до 8 мм приводит к снижению удельного усилия резания в среднем на 80 %.

2. Увеличение угла скольжения ножа положительно сказывается на снижении удельного усилия резания: при увеличении угла скольжения от 0 до 50 градусов удельное усилие резания снижается в среднем на 44,2 %.

3. Увеличение угла заточки ножа от 10 градусов до 80 градусов приводит к увеличению удельного усилия резания стеблей кукурузы при скорости 1 м/с в 13 раз, при скорости 30 м/с – до 7,6 раза. Принимая во внимание требование снижения энергоемкости измельчения при продлении ресурса ножа, оптимальный угол заточки находится в диапазоне от 10 градусов до 30 градусов.

4. Снижение остроты режущей кромки ножа от 20 мкм до 250 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания стеблей кукурузы в среднем на 111 %, а увеличение толщины ножа с 2 мм до 8 мм ведет к возрастанию удельного усилия резания в 2,04...2,45 раза в зависимости от скорости резания.

5. Характер снижения удельного усилия резания стеблей кукурузы при использовании гребенчатых ножей аналогичен ножам без гребенки. Использование гребенчатых ножей нерационально с точки зрения обеспечения минимального усилия резания, поскольку усилие резания в среднем на 54 % больше, чем при использовании ножей без гребенки.

11. Milk productivity and milk quality when feeding cows with silostan-containing haylage/ S.V. Karamaev, A.S. Karamaeva, K. Z. Valitov et al. // In BIO Web of Conferences EDP Sciences. 2020. Vol. 17. P. 00007. doi:10.1051/bioconf/20201700007
12. Косолапов В. М., Воронкова Ф.В. Количественная и качественная характеристика сырого протеина кормовых растений, кормов и биологического материала животных и птицы. М.: Угрешская типография, 2014. 160 с.
13. 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:10.18286/1816-4501-2024-2-14.
14. 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
15. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces S. Schuldt, Y. Schneider, H. Rohm // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 230. P. 55-62. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024
16. Spagnoli A. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 101. P. 200-206. doi:10.1016/j.tafmec.2019.02.017
17. Гаврилов Т. А. Исследование влияния угла скольжения лезвия ножа на снижение работы резания // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. 2014. Т. 2. № 7. С. 31-34.
18. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов/ Н. Е.Резник.М.: Машиностроение, 1975. 311 С.
19. Садовников М.А., Шапров М.Н. Машина для резания очищенной мякоти плодов бахчевых культур и качественные показатели ее работы // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 127-131.
20. Обоснование конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта / С. В. Вендин, В. А., Самсонов, Ю. В. Саенко и др. // Вестник Всероссийского научноисследовательского института механизации животноводства. 2019. № 4(36). С. 101-104.
21. Заплетников И. Н., Шеина А. В., Гордиенко А. В. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2013. С. 52-61.

References

1. Borotov A. Cutting length the fodders of green stalks by drum chopper // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 883. No. 1. P. 012160.
2. 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.
3. Kravchenko R.V. Agrobiological substantiation of obtaining stable yields of corn grain in the conditions of the steppe zone of the Central Ciscaucasia: monograph / R.V. Kravchenko. - Stavropol, 2010. 208 p.
4. Tumanova M. I., Timofeev A. S. Feeding of cattle // New science: Theoretical and practical view. 2016. No. 4-2 (75). P. 199-201.
5. Miskevich O. L., Gafarov Sh. S. Feeding of calves up to six months old // Youth and science. 2016. No. 5. P. 2.
6. Timofeev M. N., Frolov V. Yu., Morozova N. Yu. Analysis of technical means for feed grinding and their classification // Polythematic online electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2017. No. 132. P. 399-424.
7. Malinov G. I., Kondrashov V. F., Gavrilov T. A. Specification of blade sliding angles in the process of support cutting // Scientific notes of PetrSU. 2012. No. 8 (129). P. 40-42.
8. 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 al. // BIO Web of Conferences 37. 2021. 00022 doi: 10.1051/bioconf/20213700022
9. Antonov N. M., Lebed N. I., Mamakhay A. K. Improvement of the design parameters of a fruit and root crop chopper // News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2016. No. 3 (43). P. 231-238.
10. Efficiency of cultivation of promising corn hybrids in the conditions of Smolensk region / Novikov V. M. et al. // International Research Journal. 2015. No. 8 (39). P. 44-46.
11. Milk productivity and milk quality when feeding cows with silostan-containing haylage/ S.V. Karamaev, A.S. Karamaeva, K. Z. Valitov et al. // In BIO Web of Conferences EDP Sciences. 2020. Vol. 17. P. 00007. doi:10.1051/bioconf/20201700007
12. KosoLapov V. M., Voronkova F. V. Quantitative and qualitative characteristics of crude protein of forage plants, feed and biological material of animals and poultry. Moscow: Ugreshskaya printing house, 2014. 160 p.
13. 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. No. 4 (68). P. 182-191. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-14.
14. 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

15. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces S. Schuldt, Y. Schneider, H. Rohm // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 230. P. 55-62. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024
16. Spagnoli A. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 101. P. 200-206. doi:10.1016/j.tafmec.2019.02.017
17. Gavrilov T. A. Study of the influence of the sliding angle of the knife blade on the reduction of cutting work // Collection of scientific papers of the All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Breeding. 2014. Vol. 2. No. 7. P. 31 - 34.
18. Reznik N. E. Theory of cutting with a blade and the basics of calculation of cutting devices / N. E. Reznik. Moscow: Mechanical Engineering, 1975. 311 p.
19. Sadovnikov M. A., Shaprov M. N. Machine for cutting of peeled pulp of melons and gourds and quality parameters of its work // Agrotechnics and energy supply. 2014. No. 1 (1). P. 127-131.
20. Justification of the design parameters of knives when cutting a flat layer of product / S. V. Vendin, V. A., Samsonov, Yu. V. Saenko // Vestnik of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization. 2019. No. 4 (36). P. 101-104.
21. 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.