

Определение удельного усилия резания початков 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 скорости резания, толщины, угла заточки, остроты режущей кромки ножа и угла скольжения ножа на удельное усилие резания початков кукурузы. Исследования проведены на ротационном копре с использованием нескольких типов ножей, отличающихся формой режущей кромки. Данная работа направлена на обобщение влияния основных факторов, от которых зависят энергетические показатели измельчения початков гибрида кукурузы «Краснодарский 230 АМБ». Резание осуществляли ножами толщиной 2...8 мм, углом заточки 10...70 градусов, углом скольжения 0...50 градусов, остротой режущей кромки ножа 20...200 мкм, скорость резания варьировалась в интервале от 1 до 30 м/с. Увеличение скорости резания початков кукурузы 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 71,3 %. При скорости ножа от 1 м/с до 5 м/с увеличение угла скольжения от 0 градусов до 35 градусов приводит к снижению удельного усилия резания початков кукурузы на 35 %, а при скорости ножа 10 м/с на 20 %. Увеличение скорости ножа от 20 м/с до 30 м/с и угла скольжения от 0 градусов до 50 градусов приводит к возрастанию удельного усилия резания початков кукурузы в среднем в 2,4 раза. Снижение остроты режущей кромки ножа от 20 мкм до 200 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания початков кукурузы в среднем на 82 %, а увеличение толщины ножа от 2 мм до 8 мм приводит к возрастанию удельного усилия резания початков кукурузы до 2 раз.

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

Для цитирования: Аюгин Н. П. Определение удельного усилия резания початков кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №2 (70). С. 212-220. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-212-220

Identification of the specific cutting force of corn cobs

N.P. Ayugin✉

FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉nikall85g@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to the analysis of the influence of cutting speed, thickness, sharpening angle, sharpness and sliding angle of the knife on the specific cutting force of corn cobs. The studies were carried out on a rotary body using several types of knives with different cutting edge shapes. This work is aimed at generalizing the influence of the main factors on which the chopping energy parameters of cobs of "Krasnodar 230 AMB" hybrid corn depend. Cutting was performed with 2-8 mm thick knives, sharpening angle of 10-70 degrees, sliding angle of 0-50 degrees, cutting edge sharpness of 20-200 μm , cutting speed varied in the range from 1 to 30 m/s. Increase of the cutting speed of corn cobs to 30 m/s using knives with single-sided sharpening at an angle of 30 degrees and thickness from 2 to 8 mm leads to a decrease in the specific cutting force by 71.3%. At a knife speed from 1 m/s to 5 m/s, an increase in the sliding angle from 0 degrees to 35 degrees leads to a decrease in the specific cutting force of corn cobs by 35%, and at a knife speed of 10 m/s - 20%. With an increase in the knife speed from 20 m/s to 30 m/s and a sliding angle from 0 degrees to 50 degrees, the specific cutting force of corn cobs increases by an average of 2.4 times. A decrease in the knife sharpness from 20 μm to 200 μm leads to an increase in the specific cutting force of corn cobs by an average of 82%, and an increase in the knife thickness from 2 mm to 8 mm leads to an increase in the specific cutting force of corn cobs by up to 2 times.

Keywords: corn cobs, grinding, specific cutting force, knife thickness, cutting edge sharpness, sliding angle, sharpening angle, cutting speed.

For citation: Ayugin N. P. Identification of the specific cutting force of corn cobs // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;2(70): 212-220 doi:10.18286/1816-4501-2025-2-212-220

Введение

Измельчение кормов является важным этапом в технологическом процессе подготовки кормов к скормливанию животным. Неизмельченные или недостаточно измельченные корма хуже перевариваются и усваиваются организмом животных, а также могут вызывать расстройства пищеварения, особенно у молодняка. Размер частиц корма должен соответствовать физиологическим особенностям и возрасту животных, обеспечивая оптимальное взаимодействие с пищеварительными ферментами [1].

Выбор оборудования и методов измельчения зависит от типа корма, вида животных и требуемой степени измельчения [2]. На энергетические показатели измельчения кормов оказывает влияние большое число факторов, к базовым относят: скорость резания, угол заточки ножа, угол скольжения, толщина ножа и острота режущей кромки ножа [3, 4, 5].

Кукурузное зерно заслуженно занимает ведущие позиции в кормопроизводстве. Початки и зёрна кукурузы обладают высокой питательной ценностью и могут быть ценным источником энергии и питательных веществ для различных видов животных.

Зерно кукурузы содержит значительное количество углеводов, преимущественно в виде крахмала, что делает их отличным источником энергии. Содержание белка в зёрнах кукурузы может варьироваться, но в среднем оно составляет около 10...12 %. Кроме того, кукуруза содержит витамины (особенно витамины группы В) и минералы, такие как калий, магний, фосфор и железо [6, 7, 8].

Высокая энергетическая ценность зерна делает кукурузу подходящим компонентом рациона для животных, нуждающихся в большом количестве энергии, например, для откорма свиней и крупного рогатого скота. В одном килограмме зерна содержится 1,34 кормовых единиц и 78 г протеина [9, 10]. Кукуруза может быть использована в качестве основного источника энергии в рационах животных, однако важно учитывать её относительно низкое содержание белка и балансировать рацион за счёт других источников белка, таких как бобовые культуры или специальные белковые добавки.

Початки кукурузы могут быть использованы в кормлении животных в целом виде, но преимущественно после измельчения или плющения. Это позволяет улучшить переваримость и усвояемость питательных веществ. Переваримость кукурузного зерна достаточно велика, крупный рогатый скот и свиньи усваивают его на 90 %. Кукурузные початки могут быть включены в рационы крупного рогатого скота, овец и других травоядных животных как источник клетчатки и энергии.

Цель исследования – изучение и обобщение влияния основных конструктивных и режимных параметров режущего аппарата измельчителя на удельное усилие резания початков кукурузы.

Материалы и методы

Исследование влияния скорости резания, толщины, угла заточки, угла скольжения и остроты режущей кромки ножа на удельное усилие резания початков кукурузы

проводили на ротационном копре (рис. 1) при скорости резания от 1 м/с до 30 м/с [11].



Рис. 1. Ротационный копер

Были использованы ножи с односторонней заточкой, гребенчатые и П-образные. Их толщина варьировалась в интервале от 2 мм до 8 мм, угол заточки в диапазоне от 10 градусов до 70 градусов, а острота режущей кромки ножа от 20 мкм до 200 мкм.

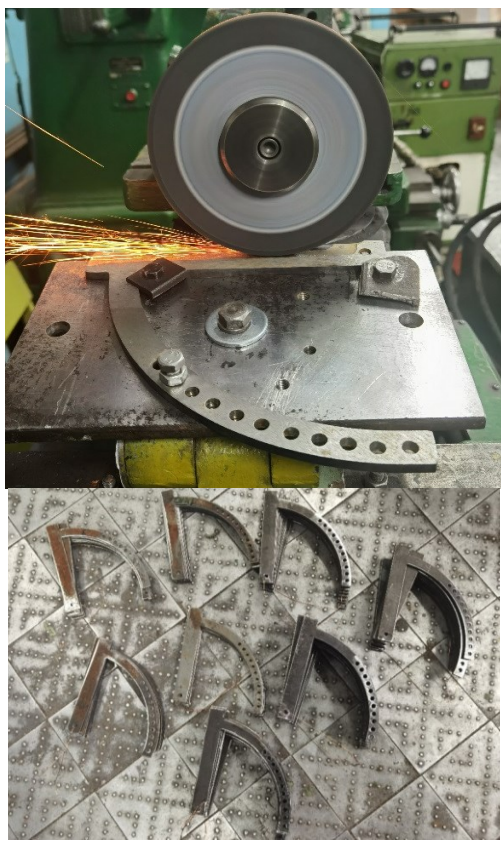


Рис. 2. Заточка ножей, используемых при проведении исследований

Площадь среза определяли по фотографии в программе ImageJ. Удельное усилие резания рассчитывали путем деления усилия резания на площадь среза.

Значение усилия резания початков кукурузы определяли на основании показаний тензодатчиков, подключенных к персональному компьютеру через модуль аналого-цифрового преобразователя QMS85 с использованием программных продуктов QMLab и QMPArset. Результаты экспериментов обработаны в программе «Statistica».

При определении усилия резания использовали початки гибрида кукурузы «Краснодарский 230 АМБ», влажностью 70,2 % в фазе молочно-восковой спелости.

Результаты

На рисунке 3 представлен график изменения удельного усилия резания початков 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.

Согласно полученным результатам увеличение скорости ножа от 4 м/с до 30 м/с приводит к снижению удельного усилия резания початков кукурузы от 68 % до 74,6 %.

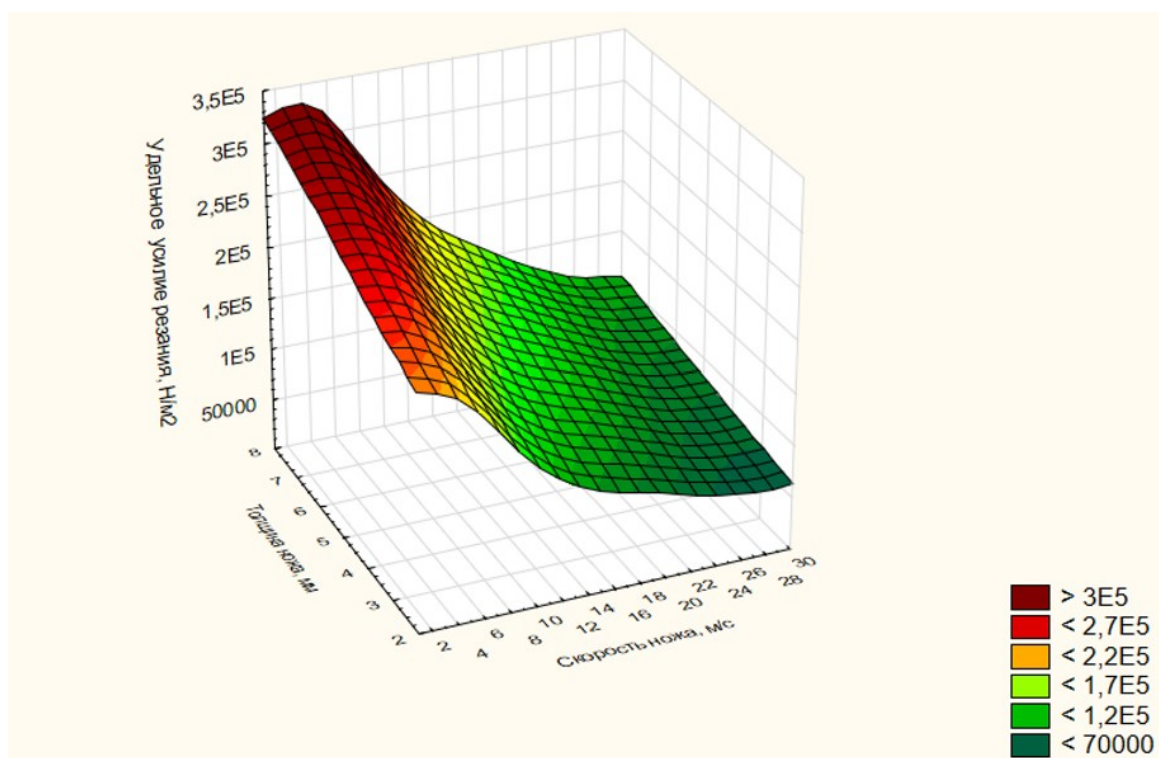


Рис. 3. Влияние скорости резания и толщины ножа на удельное усилие резания початков кукурузы

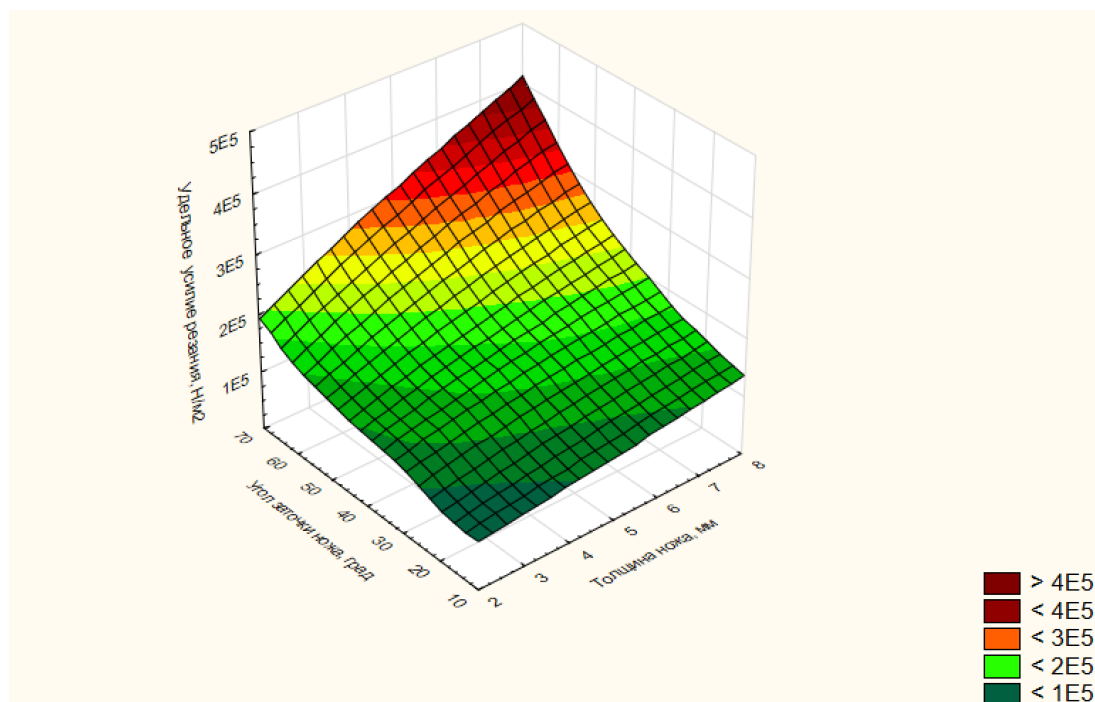


Рис. 4. Влияние толщины и угла заточки ножа на удельное усилие резания початков кукурузы при угле заточки ножа 30 градусов

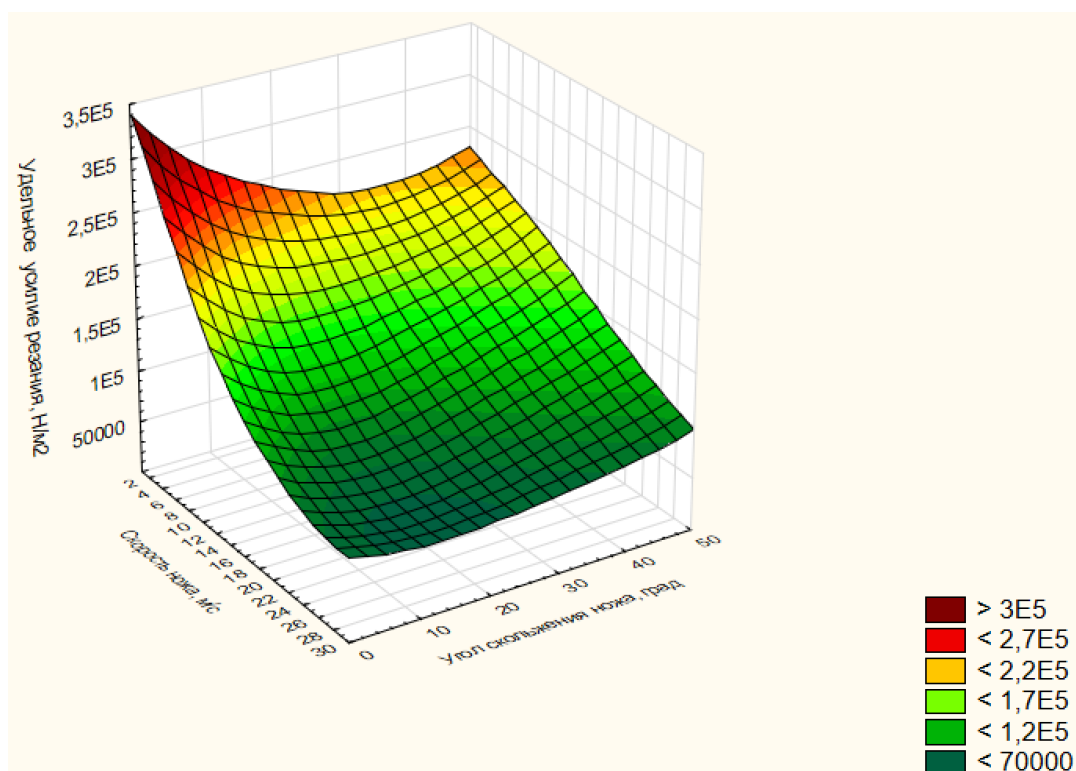


Рис. 5. Влияние скорости и угла скольжения ножа на удельное усилие резания початков кукурузы

Увеличение толщины ножа от 2 мм до 8 мм приводит к увеличению удельного усилия резания початков кукурузы от 30 % до 2 раз в зависимости от значения угла заточки. По мере увеличения угла заточки разница наиболее существенна (рис. 4).

Согласно полученным данным (рис. 5) при скорости ножа от 1 м/с до 5 м/с увеличение угла

скольжения от 0 градусов до 35 градусов приводит к снижению удельного усилия резания початков кукурузы на 35 %, а при скорости ножа 10 м/с на 20 %. Увеличение скорости ножа от 20 м/с до 30 м/с и угла скольжения от 0 градусов до 50 градусов приводит к возрастанию удельного усилия резания початков кукурузы в среднем в 2,4 раза.

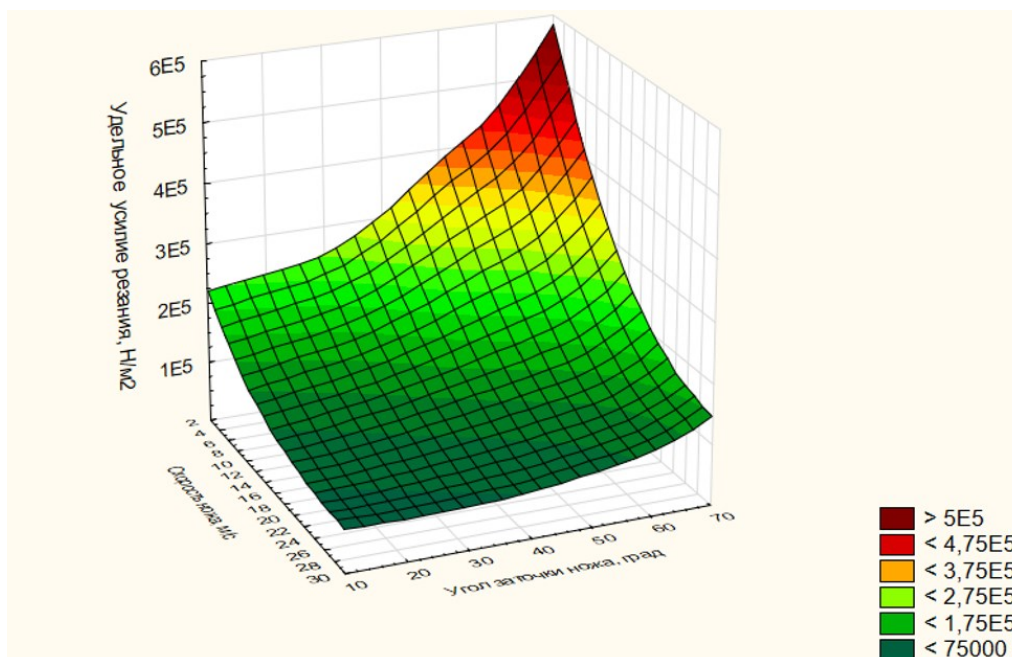


Рис. 6. Влияние скорости ножа и угла заточки ножа на удельное усилие резания початков кукурузы

Увеличение угла заточки ножа от 10 градусов до 70 градусов приводит к возрастанию удельного усилия резания початков кукурузы в 2...2,6 раза (рис. 6).

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

$$P = 245235,6 - 12948,7v + 13877,2b - 2133,8\alpha - 2110,5\tau + 104,6v^2 + 2,8v^3 - 108,7b^2 + 57,7\alpha^2 + 52,2\tau^2 - 0,2\tau^3, (1)$$

где P – удельное усилие резания початков кукурузы, H/m^2 ; v – скорость резания (ножа), $\text{м}/\text{с}$; b –

толщина ножа, мм ; τ – угол скольжения ножа, град.; α – угол заточки ножа, град.

Значение коэффициента детерминации для уравнения (1) составляет 0,83, в то время как коэффициент корреляции равен 0,91.

На графике (рис. 7) изображено изменение удельного усилия резания початков кукурузы при использовании ножей толщиной 4 мм , с остротой режущей кромки ножа от 20 мкм до 200 мкм и углом заточки 30 градусов, при скорости резания 25 $\text{м}/\text{с}$ и угле скольжения 0 градусов.

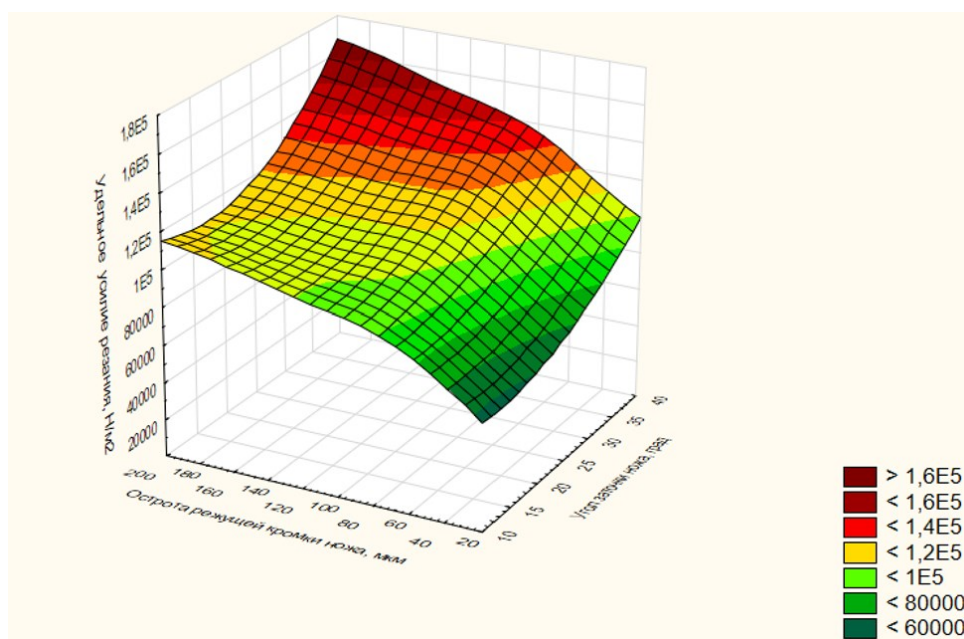


Рис. 7. График зависимости удельного усилия резания початков кукурузы от угла заточки и остроты режущей кромки ножа

Снижение остроты режущей кромки ножа от 20 мкм до 200 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания початков кукурузы от 72 % до 92 % в зависимости от угла заточки ножа.

Уравнение регрессии, отражающее влияние остроты режущей кромки ножа, толщины ножа, угла заточки и скорости резания на удельное усилие резания початков кукурузы, имеет следующий вид:

$$P = 62769,51 - 745,12v + 8247,48b - 7,65\alpha + 202,20\delta - 14,90v^2 -$$

$$- 0,39v^3 + 309,73b^2 + 12,74\alpha^2 + 0,15\delta^2, (2)$$

где δ – острота режущей кромки ножа, град.

Значение коэффициента детерминации для уравнения (2) составляет 0,81, в то время как коэффициент корреляции равен 0,9.

На рисунках 8 и 9 представлено изменение удельного усилия резания початков кукурузы при использовании гребенчатых ножей.

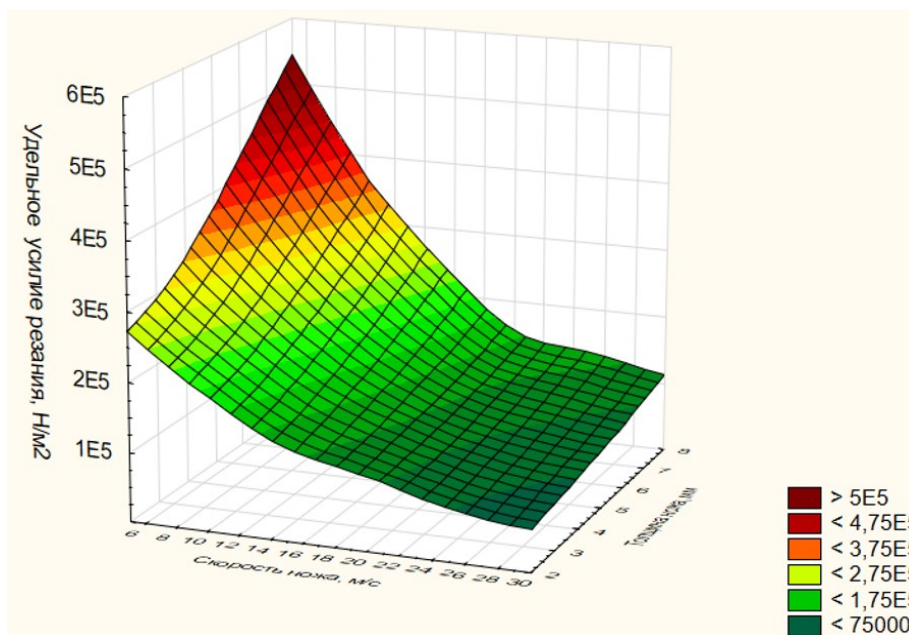


Рис. 8. График зависимости удельного усилия резания початков кукурузы от скорости и толщины гребенчатого ножа при угле заточки 30 градусов

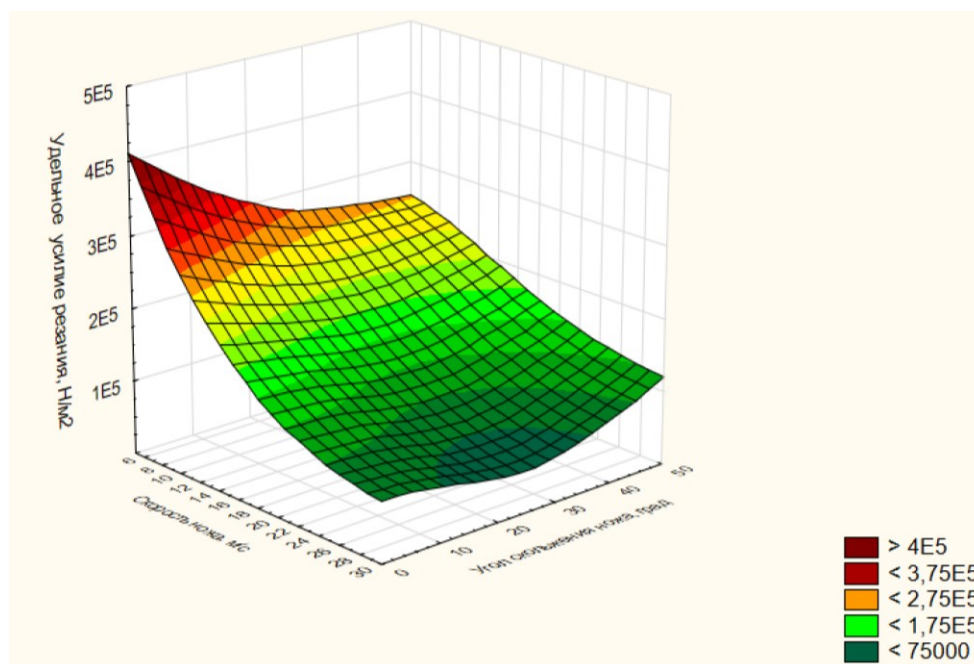


Рис. 9. График зависимости удельного усилия резания початков кукурузы гребенчатыми ножами от скорости и угла скольжения ножа

При резании початков кукурузы гребенчатым ножом на скорости от 1 м/с до 5 м/с с увеличением угла скольжения от 0 до 50 градусов наблюдается

снижение удельного усилия резания початков кукурузы на 34 %, а при скорости ножа 10 м/с на 27 %. При достижении ножом скорости от 20 м/с до 30 м/с

оптимальное значение угла скольжения наблюдается в интервале от 20 градусов до 30 градусов, при этом удельное усилие резания початков кукурузы снижается в среднем на 17 %. Увеличение угла скольжения гребенчатого ножа до 50 градусов приводит к увеличению удельного усилия резания на 58 % по сравнению с оптимальным значением угла скольжения.

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

кукурузы при использовании гребенчатого ножа, имеет вид:

$$P = 457887,8 - 27959,2v + 2257,2b - 1352,2\tau + 480,7v^2 + 1284,0b^2 - 33,4\tau^2 + 1,2\tau^3, (3)$$

Значение коэффициента детерминации для уравнения (3) составляет 0,94, а коэффициент корреляции – 0,89.

На рисунке 10 изображен график зависимости толщины ножа и скорости резания при использовании П-образных ножей.

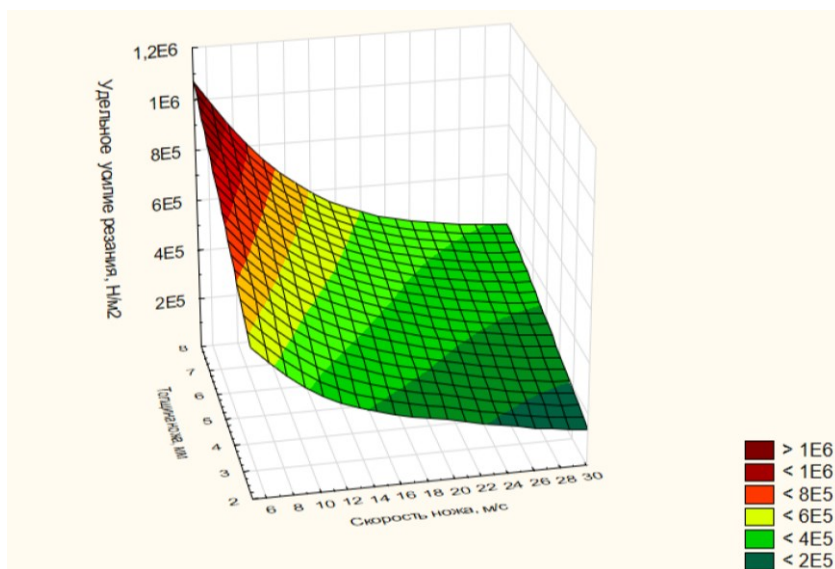


Рис. 10. График зависимости удельного усилия резания от скорости и толщины П-образного ножа при резании початков кукурузы

При использовании П-образного ножа при измельчении початков кукурузы по мере увеличения скорости ножа происходит снижение удельного усилия резания. При повышении скорости ножа от 5 м/с до 30 м/с удельное усилие резания в зависимости от толщины ножа снижается в 2,5...3 раза. При увеличении толщины ножа от 2 мм до 8 мм удельное усилие резания увеличивается в среднем на 65 %.

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

$$P = 771793,3 - 57694,6v + 72204,7b + 1054,9v^2 - 2048,9b^2, (4)$$

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

Обсуждение

Опубликовано значительное количество исследований, сосредоточенных на анализе влияния угла скольжения ножа на энергетические характеристики при резке кукурузы [12, 13, 14].

Согласно данным, представленным в различных литературных источниках [15, 16, 17], обнаружено, что повышение скорости резания приводит к снижению энергетических затрат на процесс измельчения, что коррелируется с полученными

результатами. Исследования [18, 19, 20] подтверждают, что с увеличением скорости резания затраты энергии на измельчение снижаются. Опубликованные ранее исследования отражают влияние отдельных параметров процесса резания в узком диапазоне и не раскрывают комплексного влияния скорости резания, угла заточки, угла скольжения, остроты режущей кромки ножа и толщины ножа на энергетические показатели измельчения.

Заключение

Проведенное исследование влияния различных параметров ножей на удельное усилие резания початков кукурузы выявило ряд закономерностей, имеющих важное практическое значение.

1. Установлено, что скорость резания оказывает существенное влияние на снижение усилия, так увеличение скорости резания от 1 м/с до 30 м/с позволяет снизить удельное усилие резания початков кукурузы до 3 раз, в то время, как увеличение толщины ножа от 2 мм до 8 мм приводит к его возрастанию до 2 раз.

2. Оптимизация углов заточки и скольжения ножа и подбор подходящей остроты режущей кромки ножа позволяют значительно снизить энергозатраты на процесс измельчения початков кукурузы. Увеличение угла заточки ножа от

10 градусов до 70 градусов приводит к увеличению удельного усилия резания початков кукурузы в 2...2,6 раза. При скорости ножа от 1 м/с до 5 м/с оптимальное значение угла скольжения ножа составляет 35 градусов, при скорости резания от 20 м/с до 30 м/с – 15 градусов. Снижение остроты режущей кромки ножа от 20 мкм до 200 мкм приводит к увеличению удельного усилия резания початков кукурузы до 92 %.

3. Полученные уравнения регрессии позволяют прогнозировать удельное усилие резания в зависимости от сочетания различных факторов, что открывает возможности для оптимизации конструкции измельчительных машин и выбора наиболее эффективных режимов работы. Высокие значения коэффициентов детерминации (0,81...0,98) свидетельствуют о достаточно высокой точности полученных математических моделей.

Литература

1. Туманова М. И., Тимофеев А. С. Кормление КРС // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 4-2 (75). С. 199-201.
2. 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.
3. Пардаев О. Р., Турдалиев З., Ачилов Э. Разработка и исследование инновационного устройства для измельчения и сепарации зерна из очищенных початков кукурузы // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 5(122). С. 23-25
4. 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.
5. Определение энергоемкости процесса измельчения резанием в измельчителе кормов / Р. С. Пополднеев, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 4(72). С. 82-88.
6. 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
7. Новиков В.М. Эффективность возделывания перспективных гибридов кукурузы в условиях Смоленской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8(39). С. 44-46.
8. Кравченко Р.В. Агробιοлогическое обоснование получения стабильных урожаев зерна кукурузы в условиях степной зоны Центрального Предкавказья: монография. Ставрополь, 2010. 208 с
9. 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
10. 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.
11. К вопросу изучения процесса измельчения кабачка / Н. П. Аюгин, Н. М. Семашкин, В. И. Курдюмов и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024 №4 (68). С. 182-191. doi:10.18286/1816-4501-2024-2-14
12. Определение углов скольжения лезвия в процессе опорного резания / Г. И. Малинов, В. Ф. Кондрашов, Т. А. Гаврилов // Ученые записки ПетрГУ. 2012. № 8 (129). С. 40–42.
13. 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.
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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
18. Заплетников И. Н., Шеина А. В., Гордиенко А. В. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2013. № 3. С. 52-61
19. Pardayev O. R., Achilov E.T. Optimizing the main structural dimensions and operating modes of the device that separates the seeds of agricultural crops from the ears and pods // Экономика и социум. 2023. No. 3-1(106), P. 172-175.

20. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 311 С.

References

1. Tumanova M. I., Timofeev A. S. Feeding of cattle // *New Science: Theoretical and Practical View*. 2016. No. 4-2 (75). P. 199-201.
2. Timofeev M. N., Frolov V. Yu., Morozova N. Yu. Analysis of technical means for grinding feed and their classification // *Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2017. No. 132. P. 399-424.
3. Pardaev O. R., Turdaliev Z., Achilov E. Development and study of an innovative device for grinding and separating grain from peeled corn cobs // *Univsum: technical sciences: electronic scientific journal*. 2024. Vol. 5(122). P. 23-25
4. Justification of the design parameters of knives when cutting a flat layer of product / S. V. Vendin, V. A. Samsonov, Yu. V. Saenko, et al. // *Vestnik of the All-Russian Research Institute of Animal Breeding Mechanization*. 2019. No. 4 (36). P. 101-104.
5. 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.
6. Assessment of food security of 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
7. Cultivation efficiency of promising corn hybrids in the conditions of Smolensk region / V. M. Novikov et al. // *International Research Journal*. 2015. No. 8 (39). P. 44-46.
8. Kravchenko R.V. Agrobiological substantiation of obtaining stable yields of corn grain in the steppe zone of the Central Ciscaucasia: monograph. Stavropol, 2010. 208 p.
9. 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/bio-conf/20201700007
10. 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.
11. On the issue of studying the process of squash grinding / N. P. Ayugin, N. M. Semashkin, V. I. Kurdyumov, et al. // *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024, No. 4 (68). P. 182-191. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-14.
12. Specification of blade sliding angles during support cutting / G. I. Malinov, V. F. Kondrashov, T. A. Gavrilov, et al. // *Scientific Notes of PetrSU*. 2012. No. 8 (129). P. 40-42.
13. 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.
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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
18. 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
19. Pardayev O. R., Achilov E. T. Optimizing the main structural dimensions and operating modes of the device that separates the seeds of agricultural crops from the ears and pods // *Economy and Society*. 2023. No. 3-1 (106). P. 172-175.
20. Reznik N. E. Theory of blade cutting and the basics of calculating cutting devices. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 311 p.