

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.789:621.785.532

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

## К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания

*Н.П. Аюгин<sup>1</sup>, С.А. Яковлев<sup>2</sup>, А.С. Кузин<sup>3</sup>, И.А. Калашников<sup>4</sup>*<sup>1,2,3,4</sup> Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; г. Ульяновск, Россия<sup>1</sup> [nikall85g@yandex.ru](mailto:nikall85g@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097><sup>2</sup> [jakseal@mail.ru](mailto:jakseal@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080><sup>3</sup> [sashakyzin99@mail.ru](mailto:sashakyzin99@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410><sup>4</sup> [surskboy@vk.com](mailto:surskboy@vk.com)

**Аннотация.** Упрочнение ножей и определение оптимального угла заточки в комплексе позволят продлить срок службы измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности, а также повысить эффективность их работы. Исследования проведены с целью определения оптимального угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, подвергнутых объемной закалке с последующим низким отпускком, работающих в условиях абразивного изнашивания. Для экспериментальных исследований изготовили образцы ножей из стали У7 ГОСТ 1435-99 с углами заточки 10, 20 и 30°. После проведения их объемной закалки с последующим низким отпускком по всему сечению ножей наблюдали равномерную структуру из мелкоигольчатого мартенсита. Твердость ножей составила 740 HV, что в 2,96 раза выше исходной микротвердости металла 250 HV. Микроструктурное исследование поверхности ножей выявило наличие окислов железа на глубине до 0,079 мм по причине выгорания углерода в поверхностных слоях, поэтому предложено при закалке использовать печи с «контролируемой атмосферой». Износостойкость ножей исследовали на оригинальной лабораторной установке в течение 100 ч, в качестве абразива использовали кварцевый песок. Исходная острота режущих кромок ножей до испытания соответствовала 20...35 мкм. В условиях абразивного изнашивания наименьшее снижение остроты режущей кромки (120 мкм) характерно для ножей с углом заточки 10°, наибольшее (185 мкм) – при угле 30°. Наименьший износ, измеренный по изменению ширины ножа, характерен для ножей, имеющих угол заточки 30°, а наибольший – для ножей с углом заточки 10°. При резании корнеплодов и отсутствии ударных нагрузок оптимальный угол заточки лезвий ножа составляет 10°. Увеличение скорости от 5 до 7 м/с приводит к ускорению снижения остроты режущей кромки ножа на 81,5%. Полученные результаты исследований могут использоваться при проектировании измельчителей кормов.

**Ключевые слова:** упрочнение ножей измельчителей кормов; острота режущей кромки ножей; износостойкость ножей; износ; абразивное изнашивание; угол заточки; оптимальный угол заточки лезвий

**Финансирование.** Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00057; <https://rscf.ru/project/24-26-00057/>

**Для цитирования:** Аюгин Н.П., Яковлев С.А., Кузин А.С., Калашников И.А. К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 54-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

## ORIGINAL ARTICLE

## On determining the sharpening angle of knife blades used in feed grinders operating under conditions of abrasive wear

*N.P. Ayugin<sup>1</sup>, S.A. Yakovlev<sup>2</sup>, A.S. Kuzin<sup>3</sup>, I.A. Kalashnikov<sup>4</sup>*<sup>1,2,3,4</sup> Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; Ulyanovsk, Russia<sup>1</sup> [nikall85g@yandex.ru](mailto:nikall85g@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097><sup>2</sup> [jakseal@mail.ru](mailto:jakseal@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080><sup>3</sup> [sashakyzin99@mail.ru](mailto:sashakyzin99@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410><sup>4</sup> [surskboy@vk.com](mailto:surskboy@vk.com)

**Abstract.** Enhancing blade durability and determining optimal sharpening angles are critical for extending the service life and increasing the efficiency of feed choppers and industrial processing machinery. This study aims

to determine the optimal sharpening angle for feed chopper blades subjected to through-hardening (volumetric quenching) followed by low-temperature tempering under abrasive wear conditions. Experimental samples were fabricated from U7 steel (GOST 1435-99) with sharpening angles of 10°, 20°, and 30°. Heat treatment produced a uniform fine-needle martensite structure across the entire cross-section. The resulting hardness was 740 HV, a 2.96-fold increase over the initial microhardness of 250 HV. Microstructural analysis revealed decarburization-induced iron oxides at depths of up to 0.079 mm; consequently, suggesting that controlled-atmosphere furnaces should be used during quenching. Wear resistance was tested over a 100-hour period using a custom-made laboratory installation with quartz sand as the abrasive medium. The initial cutting-edge radius ranged from 20 to 35 µm. Under abrasive wear, the smallest increase in edge radius (blunting) was observed in the 10° blades (120 µm), while the 30° blades showed the greatest increase (185 µm). Conversely, the 30° sharpening angle exhibited the lowest overall width wear, while the 10° angle showed the highest. For cutting root crops without impact loads, the 10° sharpening angle is optimal. Furthermore, increasing the cutting speed from 5 to 7 m/s accelerated the dulling rate by 81.5%. These findings provide a technical basis for the design and maintenance of high-efficiency feed choppers and processing equipment

**Keywords:** hardening of feed chopper knives; sharpness of the cutting edge of knives; wear resistance of knives; wear; abrasive wear; sharpening angle; optimal sharpening angle of the blades

**Funding.** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-26-00057, <https://rscf.ru/project/24-26-00057/>

**For citation:** Ayugin N.P., Yakovlev S.A., Kuzin A.S., Kalashnikov I.A. On determining the sharpening angle of knife blades used in feed grinders operating under conditions of abrasive wear. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):54-63 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

## Введение

Эффективность и долговечность режущего аппарата измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности зависят от износостойкости ножей. Ножи, используемые в измельчителях, подвергаются высоким механическим нагрузкам и быстрому износу [1, 2], поэтому исследование процесса износа ножей и разработка методов повышения их износостойкости актуальны для сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности.

Разработке и исследованию различных методов повышения износостойкости ножей измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности посвящено множество научных работ [3, 4, 5]. Однако до сих пор одним из наиболее распространенных способов повышения ресурса и износостойкости режущих рабочих органов современной техники является использование объемной закалки с последующим низким отпусканием [6, 7]. Процесс закалки позволяет просто и эффективно повысить твердость и прочность структуры материала ножа. Упрочненные ножи более устойчивы к абразивному износу, что способствует снижению эксплуатационных затрат и стабильной работе измельчителей кормов, благодаря более продолжительному сроку службы ножей до перезаточки [1].

Помимо применения упрочняющих технологий, на износостойкость ножей влияет угол заточки. Достижение оптимального угла заточки обеспечивает

баланс между остротой и прочностью лезвия, что позволяет избежать преждевременного затупления ножа при воздействии на измельчаемый материал<sup>1</sup>.

Проведенные исследования [8, 9] показывают, что оптимальный угол заточки ножа может варьироваться в зависимости от материала ножа, а также типа измельчаемого корма. Поэтому исследование износостойкости ножей измельчителей кормов и разработка методов повышения их ресурса, в том числе за счет использования упрочняющих технологий, а также определение оптимального угла заточки являются актуальной задачей. Применение ножей измельчителей кормов с повышенным ресурсом и оптимальным углом заточки позволит продлить срок службы оборудования и повысить эффективность его работы.

**Цель исследований:** определение оптимального угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, подвергнутых объемной закалке с последующим низким отпусканием, работающих в условиях абразивного изнашивания.

## Материалы и методы

Образцы ножей изготовлены из стали У7 ГОСТ 1435-99 с углами заточки 10, 20 и 30° (рис. 1). Исходная микроструктура металла

<sup>1</sup> Карпин В.Ю. Влияние угла заточки лезвия ножа на энергозатраты операции измельчения // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 3. Ч. 1. С. 163-166. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/03/48941> (дата обращения: 01.07.2024)

деталей представляет собой перлит сорбитообразный (ГОСТ 8233-56) с твердостью ~250 HV 0,3. Упрочнение ножей измельчителей кормов посредством объемной закалки осуществляли путем нагрева их в муфельной печи при температуре 800...830°C с последующим охлаждением в масле. После закалки проводили низкий отпуск ножей при температуре 150°C.

Остроту лезвия ножа определяли, исходя из замера радиуса округления режущей кромки в нормальной секущей плоскости. Для этого в свинцовую пластину толщиной 1,5 мм под углом 90° вдавливали режущую кромку исследуемого ножа. Полученный

таким образом отпечаток измерялся с помощью отсчетного микроскопа Бринелля МПБ-2 (рис. 2). Исходная острота режущей кромки ножей до проведения исследований составила 20...35 мкм.

Выбор исходных углов заточки ножей от 10 до 30° и остроты режущей кромки ножа до 50 мкм обусловлен результатами ранее проведенных исследований по определению изменения удельного усилия резания растительных материалов, выполненных на ротационном копре [10, 11, 12].

Результаты исследований по определению удельного усилия резания кормовой свеклы в зависимости от угла заточки и остроты режущей кромки

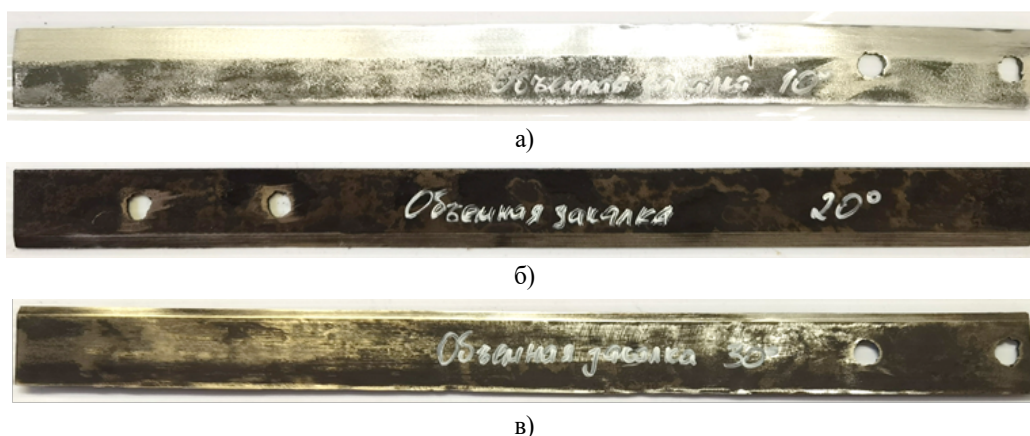


Рис. 1. Внешний вид испытуемых ножей с углом заточки 10° (а), 20° (б) и 30° (в)

Fig. 1. External view of the blades used in the tests:

a – 10° sharpening angle; b – 20° sharpening angle; c – 30° sharpening angle

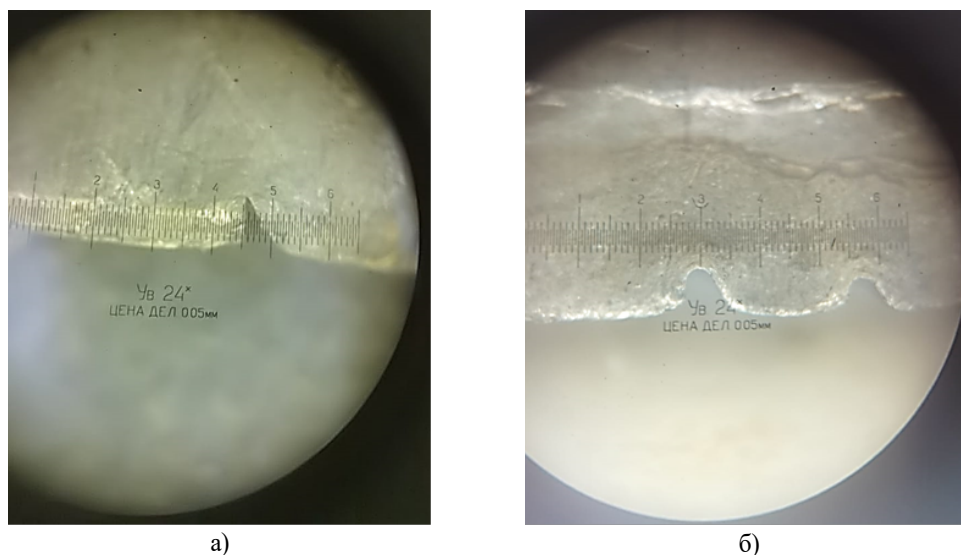


Рис. 2. Определение остроты режущей кромки ножа с углом заточки 30° по отпечатку на свинцовой пластине:

а – исходный отпечаток режущей кромки профиля ножа;  
 б – отпечаток режущей кромки профиля ножа после 100 ч испытаний

Fig. 2. Measuring the sharpness of the cutting edge of a blade with a 30° sharpening angle by the imprint on a lead plate:

а – initial imprint of the cutting edge of the blade profile;  
 б – imprint of the cutting edge of the blade profile after 100 hours of testing

ножа (рис. 3, 4), свидетельствуют о целесообразности обеспечения остроты режущей кромки от 20 до 50 мкм и минимально возможного угла заточки ножа для достижения минимальных энергозатрат измельчения. Схожие зависимости характерны и для других культур, используемых при заготовке кормов (сорго-суданковый гибрид, стебли кукурузы, початки кукурузы, кабачок, морковь, картофель, горох, люцерна).

При превышении угла заточки ножа более 35° фаска ножа начинает ломать корнеплод, что особенно выражено по мере повышения рабочей скорости ножа, поэтому значение оптимального угла заточки

ножей измельчителей кормов находится в интервале 10...30° [10].

Изменение ширины ножа в процессе изнашивания измеряли микрометром МК-50 ГОСТ 6507-90, изменение массы – лабораторными весами Ohaus Pioneer PA213.

Исследование макро- и микроструктуры металла ножей проводили в сечении микрошлифа, вырезанного с выходом на режущие кромки детали. Макроструктуру стали ножей исследовали на стереоскопическом микроскопе MEIJI RZ при помощи анализатора изображений «Комплекс программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых

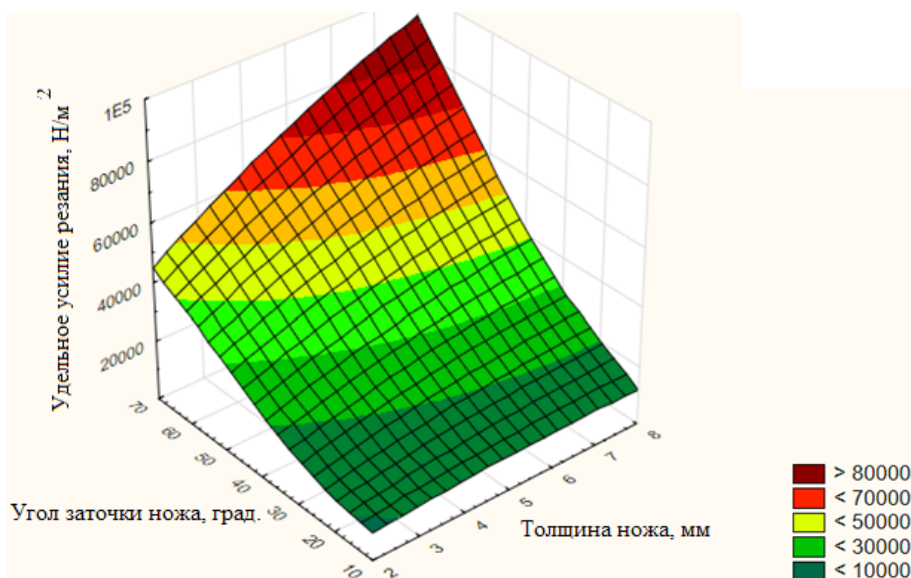


Рис. 3. Влияние толщины и угла заточки ножа на удельное усилие резания кормовой свеклы

Fig. 3. Effect of the blade's thickness and sharpening angle on the specific cutting force applied to fodder beet

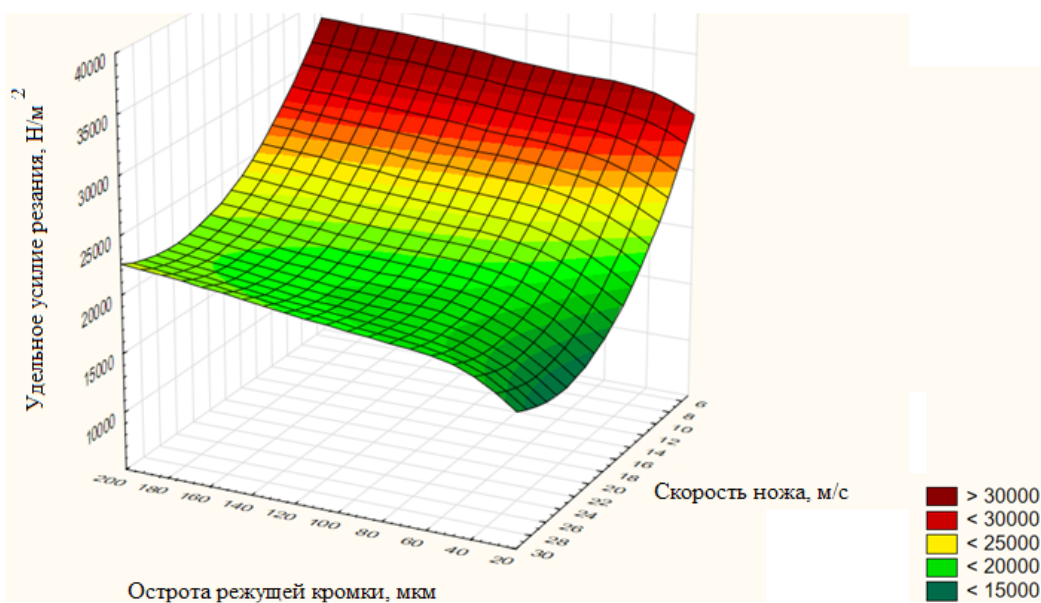


Рис. 4. График зависимости удельного усилия резания кормовой свеклы от остроты режущей кромки и скорости ножа

Fig. 4. Effect of cutting-edge sharpness and blade speed on the specific cutting force applied to fodder beet

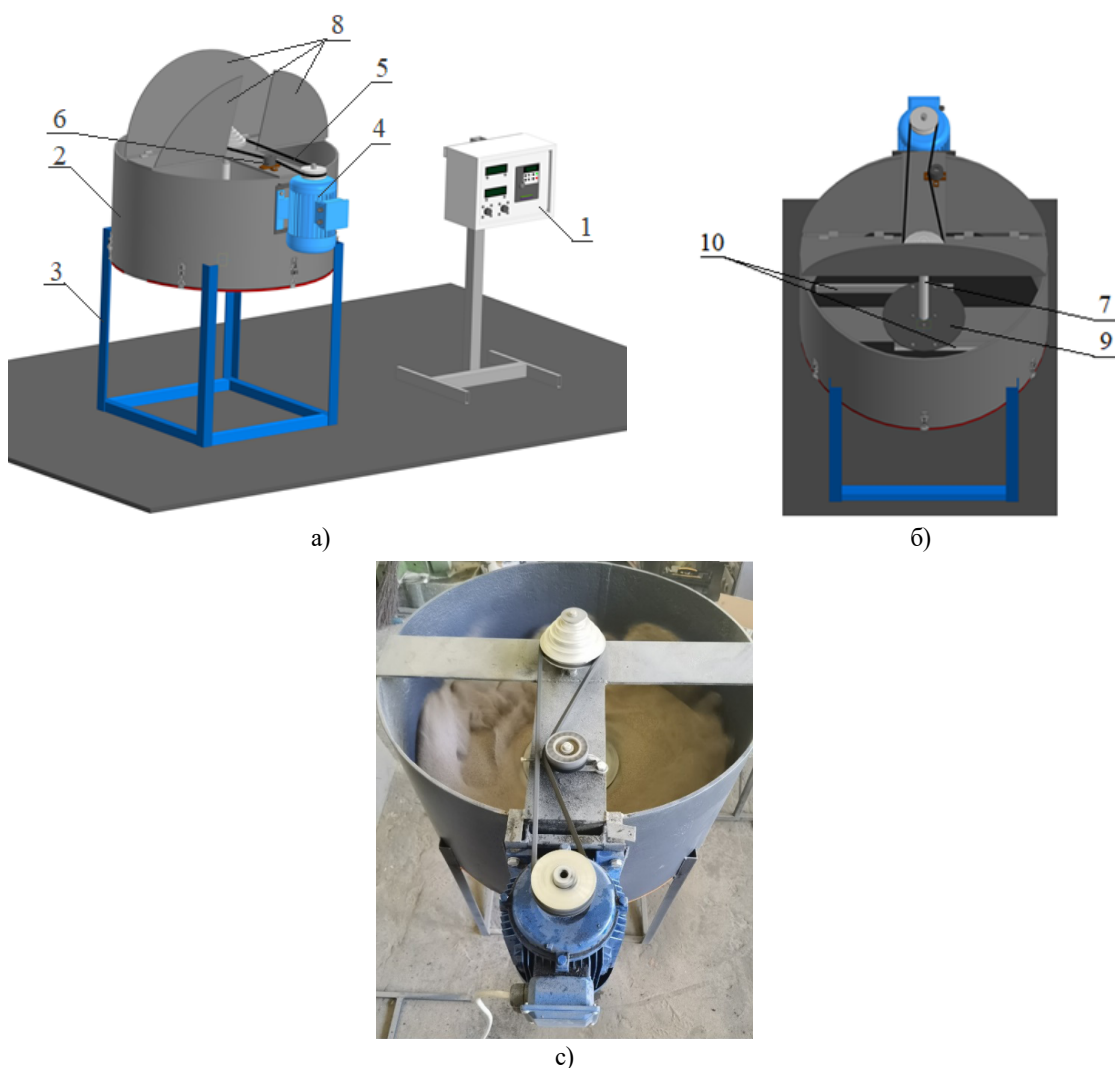
тел "Thixomet"» [7] при увеличении до 16 крат. Твердость микроструктуры ножей по методу Виккерса (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007) измеряли при нагрузке 3 Н (300 гс) [6] на микротвердомере MicroMet 5104.

Для проведения исследования износостойкости ножей была разработана оригинальная установка (рис. 5), включающая в себя пульт управления 1 и корпус 2, опирающийся на раму 3. На корпусе смонтированы крышки 8 и электродвигатель 4, который передает крутящий момент через ременную передачу 5 на вал 7 установки. Исследуемые ножи 10 фиксировали болтами на диске 9, который в свою очередь прикреплен к втулке, насаженной на вал 7. Диск имеет возможность перемещения

и фиксации на валу. На диске выполнены отверстия для установки ножей со смещением относительно оси вращения вала.

Диаметр корпуса лабораторной установки составил 900 мм, частота вращения вала – 172 мин<sup>-1</sup> (угловая скорость – 18 рад/с), диаметр диска для крепления ножей – 300 мм. На ножах были нанесены насечки, соответствующие линейной скорости ножа 5, 6 и 7 м/с при указанной его угловой скорости.

Конструкция установки позволяет приблизить условия испытания различных образцов рабочих органов сельскохозяйственной техники и машин перерабатывающей промышленности к реальным условиям эксплуатации.



**Рис. 5. Лабораторная установка для проведения исследования износостойкости ножей:**  
 а – вид установки сбоку; б – вид корпуса сверху; с – вид установки сверху (при проведении испытаний);  
 1 – пульт управления; 2 – корпус; 3 – рама; 4 – электродвигатель; 5 – ременная передача;  
 6 – натяжной ролик; 7 – вал; 8 – крышки корпуса; 9 – диск; 10 – ножи

**Fig. 5. Laboratory installation for testing the wear resistance of blades:**  
 a – side view of the installation; b – top view of the body; c – top view of the laboratory installation (during testing);  
 1 – control panel; 2 – housing; 3 – frame; 4 – electric motor; 5 – belt drive; 6 – tension roller;  
 7 – shaft; 8 – housing covers; 9 – disc; 10 – blades

Продолжительность лабораторных исследований на износостойкость ножей составила 100 ч. В качестве абразива использовали кварцевый песок.

### Результаты и их обсуждение

После объемной закалки с последующим низким отпуском по всему сечению ножа наблюдали равномерную структуру (рис. 6), представляющую собой мелкоигльчатый мартенсит (4 балла ГОСТ 8233-56) (рис. 7). Твердость структуры составила 740 HV при исходной микротвердости металла 250 HV.

Повышение микротвердости, зафиксированное после термообработки, свидетельствует о значительных изменениях в кристаллической структуре стали. Мартенситная структура, образующаяся в процессе закалки, характеризуется высокой плотностью дислокаций и внутренних напряжений, что непосредственно влияет на сопротивление материала пластической деформации. Мелкоигльчатый мартенсит, наблюдаемый в данном случае, способствует более равномерному распределению этих напряжений в объеме материала.

Низкий отпуск, проведенный после закалки, способствует снятию части внутренних напряжений, возникших в процессе мартенситного превращения, без значительного снижения твердости. Этот процесс позволяет оптимизировать баланс между твердостью и хрупкостью.

Столь значительное увеличение микротвердости (почти в 3 раза) указывает на эффективность выбранного режима термообработки для стали У7. Этот режим обеспечивает формирование оптимальной микроструктуры (сочетание высокой твердости и достаточной вязкости), необходимой для ножей, подвергающихся значительным нагрузкам в процессе эксплуатации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров термообработки (температуры закалки и отпуска, времени выдержки) на формирование микроструктуры и механические свойства стали У7 с целью оптимизации технологического процесса изготовления ножей.

Микроструктурное исследование поверхности ножей выявило наличие окислов железа на глубине до 0,079 мм по причине выгорания углерода в поверхностных слоях (рис. 8).



Рис. 6. Макроструктура ножей с углом заточки 30° после закалки и низкого отпуска, ×16  
Fig. 6. Macrostructure of blades with a 30° sharpening angle after quenching and low tempering, ×16

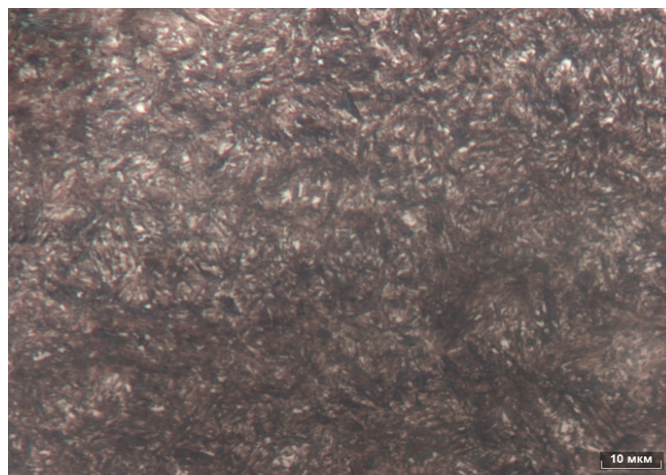
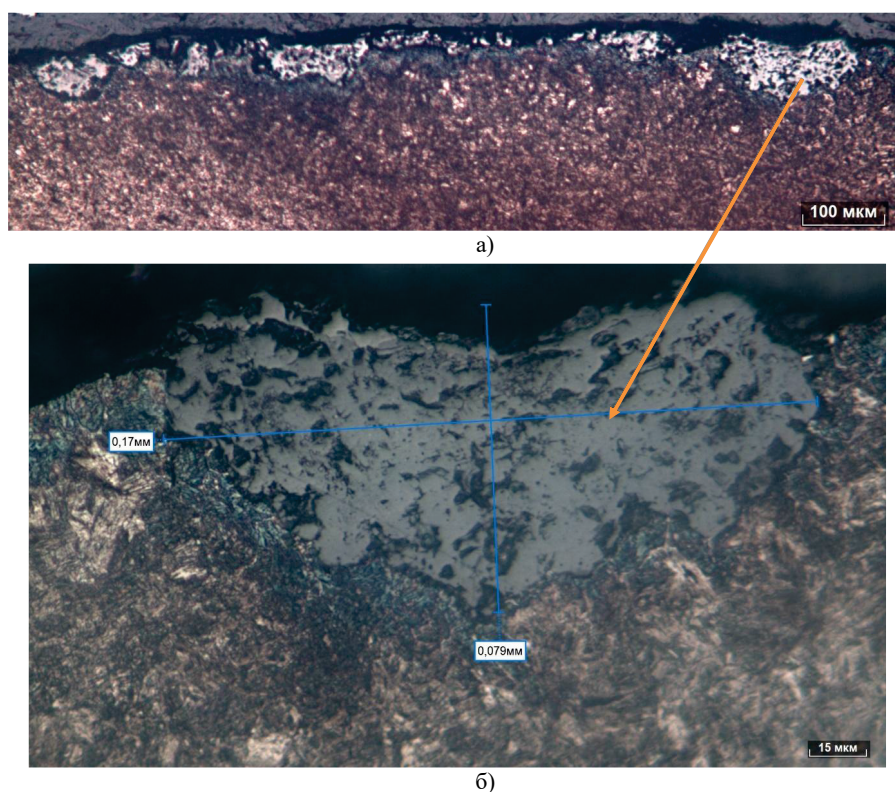


Рис. 7. Микроструктура ножа после термической обработки, ×1000  
Fig. 7. Microstructure of a blade after heat treatment, ×1000



**Рис. 8. Микроструктура поверхности ножа:**  
а –  $\times 150$ ; б –  $\times 700$

**Fig. 8. Microstructure of the blade surface:**  
а –  $\times 150$ ; б –  $\times 700$

Окисление с образованием окалины препятствует получению высокой и равномерной твердости при закалке, приводит к изменению размеров и требует увеличения припусков на механическую обработку ножей. Чтобы избежать окисления и обезуглероживания ножей при нагреве, следует под закалку использовать печи с «контролируемой атмосферой» [7].

Зависимость изменения остроты режущей кромки упрочненного ножа ( $\delta$ ) от времени проведения исследования ( $T$ ) при различных углах заточки представлена на рисунке 9. Острота режущих кромок ножей перед проведением износных испытаний составила 21...35 мкм; после 100 ч работы ножи с углами заточки 20 и 30° имели остроту лезвий 173 и 185 мкм соответственно. При этом наибольшее снижение показателя произошло в первые 20 ч. Нож с углом заточки 10° показал наилучшие результаты (120 мкм) по сравнению с остальными ножами, наибольший износ наблюдается в первые 10 ч испытаний.

Интенсивное изнашивание в начальный период исследований связано с недостаточной прочностью режущей кромки ножа и высокими удельными нагрузками, приходящимися на единицу площади. По мере увеличения износа и ширины

режущей кромки происходит снижение удельных нагрузок, что в конечном итоге приводит к снижению интенсивности изнашивания. Для сохранения остроты режущей кромки ножа и реализации эффекта самозатачивания целесообразным является замена объемной закалки на методы поверхностного упрочнения лезвия ножа на глубину от 50 до 80 мкм.

График изменения остроты лезвия ножа, заточенного под углом 20°, при скорости испытаний 5, 6 и 7 м/с свидетельствует о том, что по мере повышения скорости ножа происходит более интенсивное затупление его режущей кромки (рис. 10). После 100 ч испытаний при скорости ножа 5 м/с острота кромки снизилась до 108 мкм (в 4,9 раза), а при 7 м/с – до 196 мкм (в 5,72 раза).

График, характеризующий изменение ширины ножей в процессе исследования их износостойкости (рис. 11), свидетельствует о том, что наименьшее изменение ширины характерно для ножей с углом заточки 30°, а наибольшее – с углом заточки 10°, что в первую очередь связано с их геометрией.

Результаты исследований подчеркивают важность учета геометрических параметров ножей при оценке их износостойкости. Угол заточки является ключевым фактором, влияющим на долговечность лезвия

ножа и его способность сохранять свои первоначальные характеристики в процессе эксплуатации. Выбор угла заточки является компромиссом между остротой реза и долговечностью режущей кромки ножа.

Оптимальный угол заточки определяется прежде всего характером обрабатываемого материала и требованиями к энергоемкости процесса резания и качеству получаемого измельченного материала.

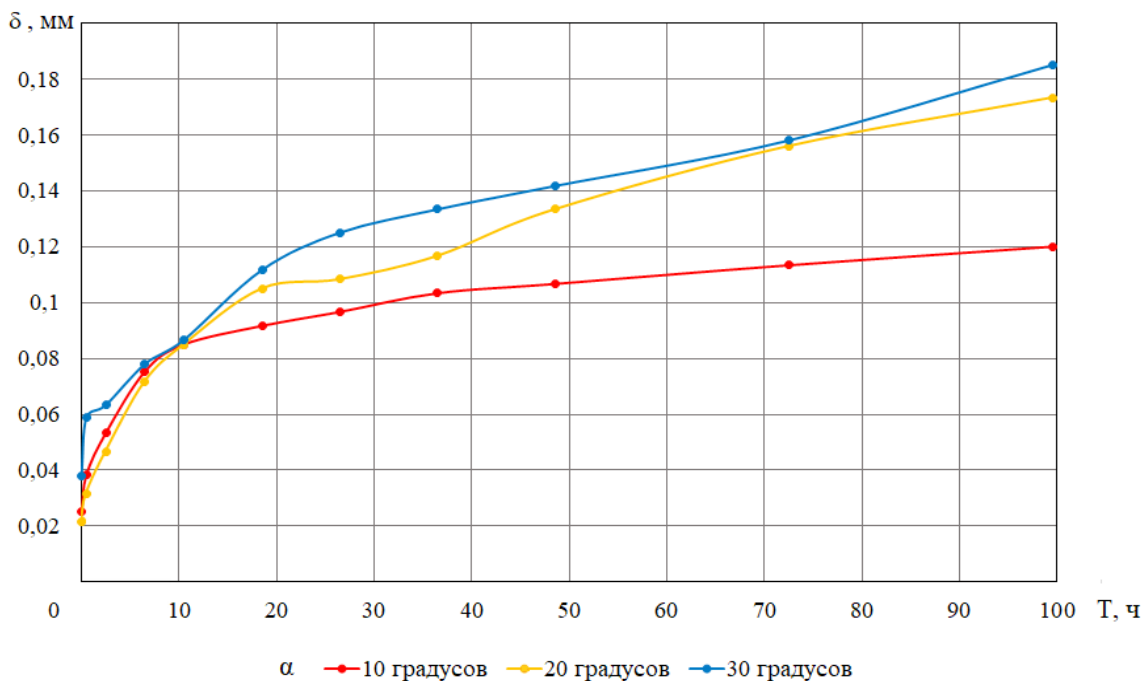


Рис. 9. Изменение остроты режущей кромки ножа ( $\delta$ ) от времени проведения исследования (Т) при углах заточки  $\alpha = 10, 20$  и  $30^\circ$  и линейной скорости ножей 6 м/с

Fig. 9. Variation in cutting-edge sharpness ( $\delta$ ) versus test time (Т) at sharpening angles  $\alpha = 10^\circ, 20^\circ,$  and  $30^\circ$  and a linear blade speed of 6 m/s

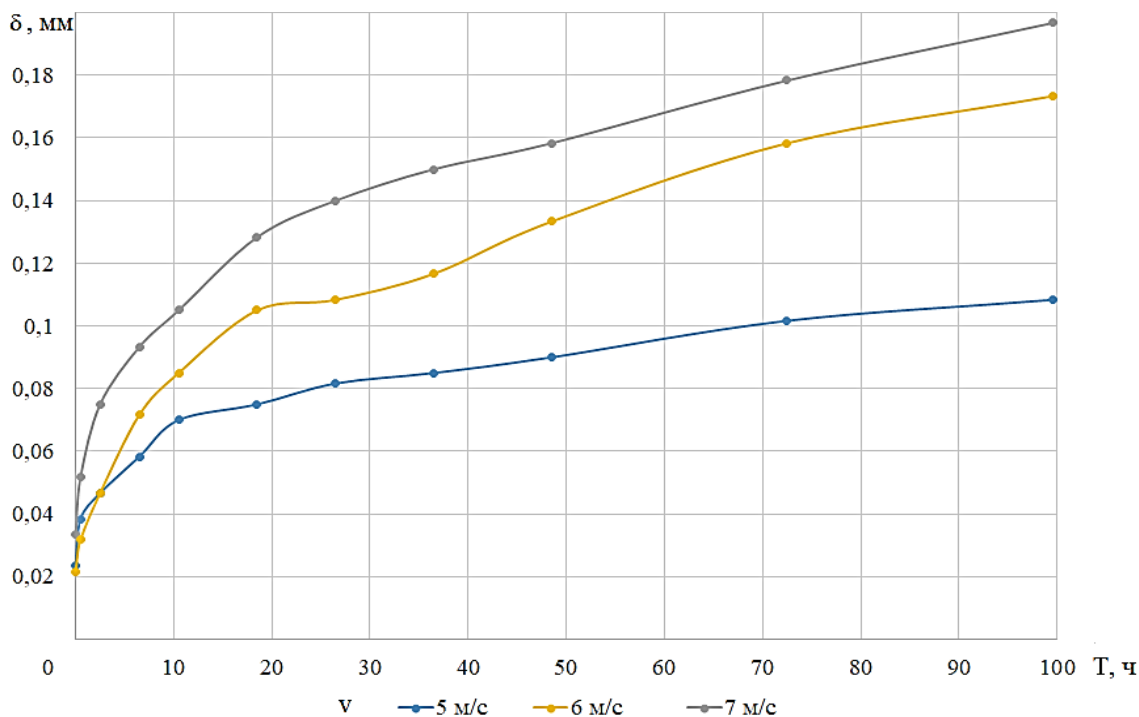
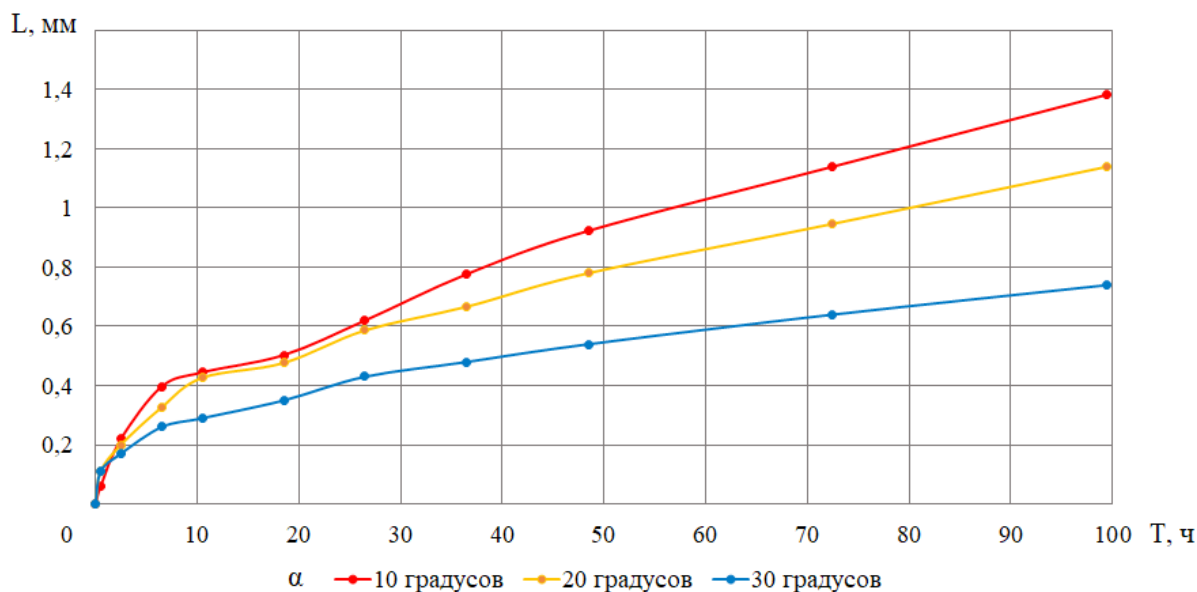


Рис. 10. Изменение остроты режущей кромки ножа ( $\delta$ ) с углом заточки  $20^\circ$  от времени проведения исследования (Т) при скорости ножа 5, 6 и 7 м/с

Fig. 10. Variation in cutting-edge sharpness ( $\delta$ ) for a  $20^\circ$  sharpening angle versus test time (Т) at blade speeds of 5, 6, and 7 m/s



**Рис. 11. Изменение ширины ножа (L) от времени проведения исследования (Т) при различных углах заточки  $\alpha$  и линейной скорости ножей 6 м/с**

**Fig. 11. Variation in blade width (L) versus test time (T) at various sharpening angles  $\alpha$  and a linear blade speed of 6 m/s**

### Выводы

1. Исследования микроструктуры ножей, изготовленных из стали У7 и прошедших объемную закалку с последующим низким отпусканием, показали, что микроструктура представляет собой мелкоигольчатый мартенсит с твердостью 740 HV, что 2,96 раза выше микротвердости ножа без его упрочнения. Изготовленные ножи, обладающие повышенной режущей способностью и износостойкостью по сравнению с ножами без упрочнения, целесообразно использовать в измельчителях кормов.

2. В условиях абразивного изнашивания наименьшее снижение остроты режущей кромки характерно

для ножей с углом заточки  $10^\circ$ , наибольшее – для ножей с углом  $30^\circ$ . Наименьший износ, определяемый по изменению ширины ножа, характерен для ножей, имеющих угол заточки  $30^\circ$ , а наибольший – при угле наклона лезвия  $10^\circ$ , что обусловлено их геометрией. При резании корнеплодов и отсутствии ударных нагрузок оптимальным является угол заточки ножа в  $10^\circ$ .

3. В условиях абразивного изнашивания скорость ножа обуславливает процесс затупления его режущей кромки. Повышение скорости от 5 до 7 м/с привело к ускорению снижения остроты режущей кромки ножа на 81,5%.

### Список источников

1. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 1. С. 97-106. <https://doi.org/10.31857/S0235711924010117>
2. Щербина В.И., Полуян В.А. Повышение износостойкости ножей барабанных измельчителей кормоуборочных комбайнов // Вестник аграрной науки Дона. 2012. № 1. С. 35-39. EDN: REUZCB
3. Сайфуллин Р.Н., Арбузов Р.Ф., Бирюков А.Л. Влияние режимов электроискровой обработки на износостойкость закаленных лезвий ножей // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 3 (152). С. 87-93. EDN: XSQZEM
4. Сайфуллин Р.Н., Арбузов Р.Ф., Бирюков А.Л. Изучение влияния времени проведения электроискрового упрочнения на износостойкость закаленных лезвий ножей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 10 (238). С. 458-463. EDN: SCOJTK
5. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Прошкин В.Е. и др. Результаты металлографических исследований режущих

### References

1. Lyalakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N., Rozhkov Y.N. Study of the wear resistance of knives during operation and assessment of effective methods for their strengthening. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2024;1:97-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0235711924010117>
2. Shcherbina V.I., Poluyan V.A. Increase of knives durability of drum-type grinders of feed harvester combines. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2012;1:35-39. (In Russ.)
3. Sayfullin R.N., Arbuzov R.F., Biryukov A.L. Influence of electric spark treatment modes on the wear resistance of hardened knives blades. *Machinery Technical Service*. 2023;61(3):87-93. (In Russ.)
4. Saifullin R.N., Arbuzov R.F., Biryukov A.L. Effect of electrospark hardening time on wear resistance of hardened knife blades. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2024;20(10):458-463. (In Russ.)
5. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Proshkin V.E. et al. Results of metallographic studies of cutting parts of cultivator sweeps made of the 30MnB5 steel. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(5):637-645. (In Russ.)

частей культиваторных лап, изготовленных из стали 30MnB5 // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 637-645. EDN: ZWB DYB

6. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Аюгин Н.П. и др. Результаты исследований структуры и микротвердости режущих частей лап культиваторов John Deere // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 12 (228). С. 538-542. EDN: AENUNN

7. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Глушенко А.А. и др. Обеспечение самозатачивания режущих частей рабочих органов сельскохозяйственной техники точечной электромеханической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 9 (201). С. 419-423. EDN: EATYJI

8. Аюгин Н.П. К вопросу определения удельного усилия резания стеблей кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2 (70). С. 203-211. EDN: HVMNSG

9. Аюгин Н.П., Семашкин Н.М., Курдюмов В.И., Приказчиков В.С. К вопросу изучения процесса измельчения кабачков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 182-191. EDN: KDZFLM

10. 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. EDN: DVDUXK

11. Аюгин Н.П. Определение удельного усилия резания початков кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2 (70). С. 212-220. EDN: DFHJRF

12. Ayugin N.P., Semashkin N.I., Romanov D.B. et al. The influence of design and kinematic parameters of the knife on the specific cutting force of the sorghum-sudan hybrid. *E3S Web of Conferences*. 2025;623:04011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562304011>

6. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Ayugin N.P. et al. Results of structure and microhardness of cutting parts of paws of John Deere cultivators. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(12):538-542. (In Russ.)

7. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Gluschenko A.A., Sotnikov M.V., Petryakov S.N. Providing self-sharpening of the cutting parts of working bodies of agricultural machinery by point electro-mechanical processing. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021;17(9):419-423. (In Russ.)

8. Ipatov A.G., Shmykov S.N., Pervushin V.F., Malinin A.V. Hardening Schumacher Pro Cut segmented knives by laser hardening. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2023;4(76):63-68. (In Russ.)

9. Karpin V.Yu. The influence of the sharpening angle of knife blade on the energy consumption of the chopping operation. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2015;3-1:163-166. (In Russ.) URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/03/48941>

10. Ayugin N.P. On the issue of identification of the specific cutting force of corn stalks. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025;2:203-211. (In Russ.)

11. Ayugin N.P., Semashkin N.M., Kurdyumov V.I., Prizkazchikov V.S. On the study of the zucchini crushing process. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024;4:182-191. (In Russ.)

12. Ayugin N.P., Semashkin N.M., Kurdyumov V.I., Romanov D.B. Study of the cutting process of fodder beet. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024;4:173-181. (In Russ.)

13. Ayugin N.P. Identification of the specific cutting force of corn cobs. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025;2:212-220. (In Russ.)

14. Ayugin N.P., Semashkin N.I., Romanov D.B. et al. The influence of design and kinematic parameters of the knife on the specific cutting force of the sorghum-sudan hybrid. *E3S Web of Conferences*. 2025;623:04011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562304011>

### Информация об авторах

<sup>1</sup> Аюгин Николай Петрович, канд. техн. наук, доцент; [nikall85g@yandex.ru](mailto:nikall85g@yandex.ru); SPIN-код: 8806-1652; <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>

<sup>2</sup> Яковлев Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор; [jakseal@mail.ru](mailto:jakseal@mail.ru); SPIN-код: 9968-2449; <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>

<sup>3</sup> Кузин Александр Сергеевич, аспирант; [sashakyzin99@mail.ru](mailto:sashakyzin99@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>

<sup>4</sup> Калашников Илья Андреевич, аспирант; [surskboy@vk.com](mailto:surskboy@vk.com)  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; Российская Федерация, 432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

### Вклад авторов

Н.П. Аюгин – концептуализация, методология, руководство исследованиями, получение финансирования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; С.А. Яковлев – верификация данных, формальный анализ, создание черновика рукописи;

А.С. Кузин – ресурсы, проведение исследований;

И.А. Калашников – визуализация, администрирование данных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 11.07.2025, после рецензирования и доработки 28.12.2025; принята к публикации 13.01.2026

### Author Information

**Nikolay P. Ayugin**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Associate Professor; [nikall85g@yandex.ru](mailto:nikall85g@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>

**Sergey A. Yakovlev**<sup>2</sup>, DSc (Eng), Professor; [jakseal@mail.ru](mailto:jakseal@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>

**Aleksandr S. Kuzin**<sup>3</sup>, postgraduate student; [sashakyzin99@mail.ru](mailto:sashakyzin99@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>

**Ilya A. Kalashnikov**<sup>4</sup>, postgraduate student; [surskboy@vk.com](mailto:surskboy@vk.com)  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; Novy Venets blvd., Ulyanovsk, 432017, Russian Federation

### Author Contribution

N.P. Ayugin – conceptualization, methodology, research supervision, resources, writing – review and editing of the manuscript; S.A. Yakovlev – data verification, formal analysis, writing – original draft;

A.S. Kuzin – resources, investigation;

I.A. Kalashnikov – visualization, data curation.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 11.07.2025; Revised 28.12.2025; Accepted 13.01.2026