

УДК 632.08

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

# **РАЗРАБОТКА РОТАЦИОННО-НОЖЕВОГО РЕЖУЩЕГО АППАРАТА С ШАРНИРНО-ПРУЖИННЫМ МЕХАНИЗМОМ ДЛЯ ЧЕКАНКИ ВИНОГРАДНОЙ ЛОЗЫ**

Трофимов Илья Михайлович  
Аспирант кафедры технических систем в агробизнесе

ORCID: 0000-0002-6755-4038

[vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Россия*

Существующие машины для обрезки виноградников не обеспечивают требуемого агротехнического качества среза, что приводит к значительным потерям урожая. Целью данной работы является разработка энергоэффективного режущего аппарата, обеспечивающего чистый и ровный срез. Предложена новая конструкция рабочего органа с шарнирно закрепленными криволинейными ножами и пружинным механизмом. Параметры обоснованы с использованием теоретической модели процесса резания, описывающей зависимость усилия от угла скольжения. Работоспособность концепции подтверждена лабораторными испытаниями. Разработанный аппарат реализует принцип "протяжного" резания. Теоретический анализ определил оптимальный диапазон угла скольжения 70–75°, обеспечивающий снижение усилия резания на 60–70% по сравнению с перпендикулярным ударным воздействием. Предварительные испытания продемонстрировали формирование высококачественных срезов без размочаливания и трещин. Полученные результаты теоретически и экспериментально доказывают перспективность предложенной конструкции для создания машины для обрезки, отвечающей современным агротехническим и энергетическим требованиям, и закладывают основу для дальнейших исследований

**Ключевые слова:** ЧЕКАНКА ВИНОГРАДА, РЕЖУЩИЙ АППАРАТ, КАЧЕСТВО СРЕЗА, УГОЛ СКОЛЬЖЕНИЯ, КРИВОЛИНЕЙНЫЙ НОЖ, ШАРНИРНО-ПРУЖИННЫЙ МЕХАНИЗМ, ПРОТЯЖНОЕ РЕЗАНИЕ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-022>

UDC 632.08

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

# **DEVELOPMENT OF A ROTARY-CUTTER CUTTING APPARATUS WITH A HINGE-SPRING MECHANISM FOR VINE SHOOTS TOPPING**

Trofimov Ilya Mikhailovich  
Postgraduate Student, Department of Technical Systems in Agribusiness

ORCID: 0000-0002-6755-4038

[vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)

*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Russia*

Existing vineyard pruning machines fail to provide the required agrotechnical cut quality, leading to significant yield losses. This work aims to develop an energy-efficient cutting apparatus that ensures a clean and even cut. A novel design of a working body with hinge-mounted curved knives and a spring mechanism is proposed. The parameters are substantiated using a theoretical model of the cutting process that describes the dependence of force on the sliding angle. The concept's viability was confirmed via laboratory tests. The developed apparatus implements a "draw-cut" (slice-cutting) principle. Theoretical analysis determined the optimal sliding angle range of 70–75°, which provides a 60–70% reduction in cutting force compared to perpendicular impact. Preliminary tests demonstrated the formation of high-quality cuts without fraying or cracking. The results theoretically and experimentally prove the potential of the proposed design for creating a pruning machine that meets modern agrotechnical and energy efficiency requirements, laying the groundwork for further research

**Keywords:** VINE PRUNING, CUTTING APPARATUS, CUT QUALITY, SLIDING ANGLE, CURVED KNIFE, HINGE-SPRING MECHANISM, DRAW-CUT, SLICE-CUTTING

**Введение.** Виноградарство является одной из ключевых отраслей сельского хозяйства в южных регионах России. Одной из наиболее трудоемких операций является чеканка – удаление верхушек и боковых побегов (пасынков). Качество ее выполнения напрямую влияет на продуктивность куста [1, 2].

Анализ существующих решений показывает их недостаточную эффективность. Машины, основанные на принципе ударного резания прямолинейными ножами, часто не обеспечивают требуемого агротехнического качества, приводя к рваным срезам, трещинам и повреждению основных лоз [3]. Сегментные аппараты склонны к забиванию зеленой массой. Альтернативные решения с косыми ножами снижают усилие, но формируют неправильный «длинный» срез [3, 4]. Таким образом, проблема заключается в отсутствии режущего аппарата, сочетающего высокое качество среза с минимальными энергозатратами.

Целью данного исследования является разработка и обоснование конструкции ротационно-ножевого режущего аппарата, реализующего принцип «протяжного» резания для чеканки виноградной лозы.

Научная новизна работы заключается в комбинации криволинейной геометрии лезвия с шарнирно-пружинным подвесом в составе ротационного рабочего органа, что впервые позволяет реализовать управляемый процесс протяжного резания для чеканки виноградной лозы, обеспечивая одновременное достижение высокого качества среза и минимальных энергозатрат.

**Методология разработки конструкции и постановки исследования.** Разработка режущего аппарата и обоснование его параметров проводилась в соответствии со следующей методологической последовательностью:

1. Формулировка требований: на основе анализа агротехнических норм и патентно-технической литературы были сформулированы целевые

показатели: качество среза (чистота, отсутствие трещин  $>30$  мм), максимальное усилие резания и минимальный процент пропущенных/поврежденных основных лоз ( $\leq 10\%$ ) [5].

2. Выявление ключевой проблемы: установлено, что основной причиной низкого качества среза является бесподпорный характер резания и неоптимальная геометрия лезвия, приводящая к перерубанию или продольному расслоению волокон [6].

3. Формулировка концепции: в качестве базового принципа работы был выбран метод «протяжного» (скользящего) резания, при котором лезвие движется под острым углом к волокнам, обеспечивая их контролируемое разрезание вместо ударного разрушения [7].

4. Теоретическое моделирование: для количественного обоснования параметров процесса использована аналитическая модель.

5. Конструкторская реализация: на основе теоретических выводов разработана и запатентована конструкция рабочего органа.

6. Качественная верификация: работоспособность концепции проверена на специально собранной лабораторной установке.

Теоретическая модель процесса резания.

Для обоснования рациональных геометрических и кинематических параметров режущего инструмента использована аналитическая модель процесса скользящего резания, подробно изложенная в [8]. Модель базируется на следующих положениях:

Объект исследования: виноградная лоза рассматривается как ортотропный вязко-упругий материал с ярко выраженной волокнистой структурой. Учтены характерные свойства лозы в период чеканки: высокая влажность ( $>80\%$ ) и диаметр в зоне резания от 2 до 20 мм.

Ключевой параметр: в качестве основного фактора, определяющего эффективность процесса, принят угол скольжения ( $\varphi$ ) – угол между вектором скорости резания и нормалью к режущей кромке лезвия.

Целевая функция: модель описывает зависимость усилия резания ( $F$ ) от угла скольжения ( $\varphi$ ) и позволяет найти условие его минимизации.

Математический аппарат: модель включает анализ сил, действующих на лезвие, с учетом его геометрии и реологических свойств материала. В результате была получена зависимость вида  $F = f(\varphi)$ , имеющая квадратичный характер. Для целей данной статьи представляется целесообразным приведение итогового расчетного выражения (1), полученного в результате преобразований модели [8]:

$$F(\varphi) = k \cdot (R_m \cdot A) / (\mu \cdot \sin\varphi + \cos\varphi), \quad (1)$$

где  $F$  – усилие резания, Н;  $k$  – эмпирический коэффициент, учитывающий свойства материала;  $R_m$  – предел прочности лозы на срез, Па;  $A$  – площадь контакта лезвия с материалом, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент трения лезвия о материал.

Анализ функции (1) позволяет определить оптимальный угол скольжения, при котором усилие резания минимально. Для первичной проверки работоспособности предложенной конструкции и корректности теоретических предпосылок была разработана и собрана лабораторная установка (Рисунок 1), включающая в себя следующее оборудование: 1 – частотный преобразователь, 2 – датчик Холла, 3 – электродвигателя переменного тока 220 В, 4 – ротор, 5 – нож, 6 – противорез

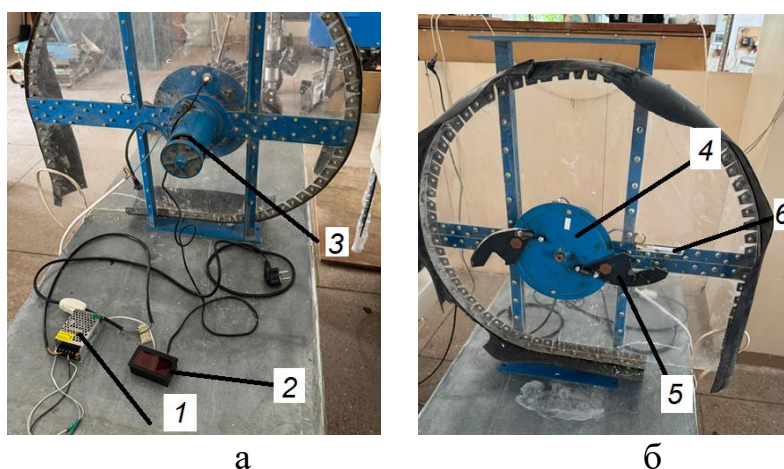


Рисунок 1 – Общий вид лабораторной установки: (а) вид спереди, (б) вид сзади

### Программа и методика экспериментальных исследований

Для количественной оценки эффективности предложенной конструкции и проверки теоретических предпосылок была разработана программа лабораторных исследований. Объектом исследований служила свежесрезанная виноградная лоза сортов Каберне и Изабелла с влажностью более 80%, соответствующая агротехническим срокам чеканки. Диаметр образцов варьировался в трех диапазонах: 5-10 мм, 10-15 мм и 15-20 мм.

Исследования проводились на лабораторной установке (Рисунок 1), позволяющей устанавливать различные типы режущих инструментов и регулировать частоту вращения ротора в диапазоне 0-450 об/мин. Основным измеряемым параметром являлось усилие резания, которое фиксировалось с помощью тензометрического силомера ПТЛ-1 с точностью  $\pm 2,5$  Н. Качество среза оценивалось визуально по бинарной шкале в соответствии с агротехническими требованиями: срез считался качественным при отсутствии рваных краев, размочаливания и трещин длиной более 30 мм.

Для обеспечения статистической достоверности результатов эксперименты проводились с трехкратной повторностью для каждой комбинации факторов. В каждой серии выполнялось 10 срезов, что в общей сложности составило 270 экспериментальных наблюдений для каждого типа режущего инструмента. Все срезы документировались методом макросъемки с масштабной линейкой для последующего анализа.

Обработка результатов включала расчет средних значений, стандартного отклонения и статистическую оценку достоверности различий по t-критерию Стьюдента при уровне значимости  $p < 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** В результате проведенных исследований была разработана принципиально новая конструкция ротационно-ножевого режущего аппарата [9], общий вид которого представлен на рисунке 2.

Конструкция включает приводной вал (1), диск (2), криволинейные ножи (3), шарнирное крепление (4), пружинный натяжитель (5) и упоры (6). Предложенная схема реализует принцип «протяжного» резания, при котором криволинейное лезвие плавно врезается и проскальзывает вдоль волокон, обеспечивая их контролируемое разрезание вместо ударного разрушения.

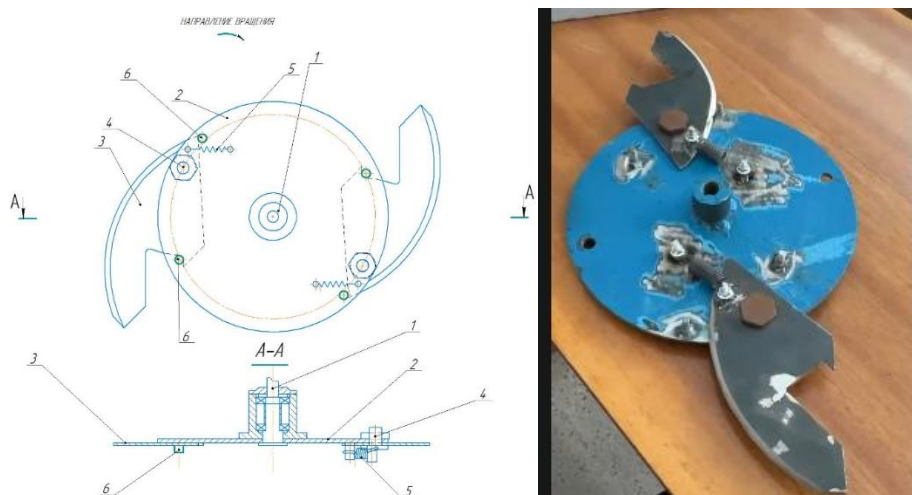


Рисунок 2 – Рабочий орган машины для обрезки виноградных и плодовых насаждений

Для количественной оценки эффективности предложенной конструкции проведены сравнительные испытания трех типов режущих инструментов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительных испытаний режущих инструментов

Тип ножа	Угол скольжения, °	Качество среза, %	Снижение усилия резания, %
Прямой	90	$65.0 \pm 5.2$	-
Косой	45	$79.0 \pm 4.1$	25-30
Криволинейный	75	$96.5 \pm 2.1$	60-65

Статистический анализ подтвердил достоверность различий между типами ножей. Сравнение по t-критерию Стьюдента показало, что различия между криволинейным ножом и обоими типами прямолинейных ножей являются статистически значимыми ( $p < 0,001$ ).



Визуальная оценка срезов подтвердила количественные данные. При использовании прямого ножа (Рис. 3а) наблюдалось характерное размочаливание краёв и радиальные трещины. В то время как срез, полученный криволинейным ножом (Рис. 3б), имел ровную гладкую поверхность с чёткими краями без признаков расслоения волокон. Угол среза близок к перпендикулярному, что соответствует агротехническим требованиям.



Рисунок 3 – Срезы лозы при различной форме ножей: (а) прямым ножом ( $\varphi = 90^\circ$ ); (б) разработанным криволинейным ножом ( $\varphi \approx 75^\circ$ )

### Обсуждение результатов.

Полученные результаты демонстрируют принципиальные преимущества предложенной конструкции. Сочетание криволинейной геометрии лезвия с шарнирно-пружинным механизмом позволяет реализовать эффективный процесс протяжного резания.

Теоретический анализ на основе модели (формула 1) показал, что знаменатель  $\mu \cdot \sin\varphi + \cos\varphi$  достигает максимума в области  $\varphi \approx 70-80^\circ$ , что обуславливает наличие минимума у функции усилия. Рациональным диапазоном, обеспечивающим снижение усилия резания на 60-70% по сравнению с  $\varphi = 90^\circ$  при сохранении эффективного врезания лезвия, является интервал  $\varphi = 70-75^\circ$ .

Экспериментальные данные полностью подтвердили теоретические предпосылки. Статистически значимое повышение качества среза до 96,5%

и существенное снижение энергозатрат подтверждает перспективность предложенного технического решения для создания машины, отвечающей современным агротехническим и энергетическим требованиям.

### **Выводы.**

1. Разработана и запатентована принципиально новая конструкция ротационно-ножевого режущего аппарата для чеканки виноградной лозы. Ключевым элементом конструкции является криволинейный нож с шарнирно-пружинным механизмом, который реализует энергоэффективный принцип «протяжного» скользящего резания, обеспечивая контролируемое разрушение волокон вместо их ударного перерубания.

2. На основе теоретической модели процесса резания установлен и обоснован рациональный диапазон геометрических параметров. Расчетным путем определено, что оптимальный диапазон угла скольжения составляет  $\varphi = 70-75^\circ$ , обеспечивающий снижение усилия резания на 60-70% по сравнению с перпендикулярным врезанием ( $\varphi = 90^\circ$ ).

3. Лабораторные испытания, включавшие 270 экспериментальных наблюдений, подтвердили статистически значимое преимущество криволинейного ножа. Установлено, что применение криволинейного ножа с  $\varphi = 75^\circ$  позволяет достичь доли качественных срезов 96,5% при снижении усилия резания на 60-65% по сравнению с традиционными прямолинейными ножами.

4. Визуальная оценка срезов подтвердила формирование ровной поверхности без рваных краев и трещин, что соответствует агротехническим требованиям к качеству чеканки. Экспериментальные данные полностью подтвердили теоретические предпосылки.

5. Проведенные исследования в комплексе доказывают перспективность предложенного технического решения для создания машины, отвечающей современным требованиям по качеству выполнения



технологического процесса и энергоэффективности. Полученные результаты являются основанием для проведения дальнейших исследований по оптимизации параметров аппарата и проведению полевых испытаний.

### Список литературы

1. Апхудов Т.М. Обоснование основных конструктивных и технологических параметров измельчителя ветвей плодовых деревьев / Т.М. Апхудов, А.К. Апажев, Ю.А. Шекихачев // Международный технико-экономический журнал [Электронный ресурс]. – 2019. – № 4. – С. 15-19. – EDN SYQXBJ. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41204178>
2. Орленко Л.В. Исследование влияния гидротермического состояния древесины на напряженное состояние при резании / Л.В. Орленко, Е.О. Орленко // Инженерные задачи: проблемы и пути решения [Электронный ресурс]. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. – С. 111-112. – EDN MUEFBS. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48196084>
3. Гаппоев А.И. Машины для контурной обрезки виноградников и садов / А.И. Гаппоев, В.А. Тхапсаев // Достижения науки - сельскому хозяйству [Электронный ресурс]. – Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2017. – С. 289-293. – EDN YPDKSK. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32451959>
4. Солнышков Д.М. Современные подходы к моделированию процессов резания древесины / Д.М. Солнышков, А.В. Шестаков // Актуальные проблемы развития лесного комплекса [Электронный ресурс]. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2019. – С. 175-177. – EDN IGKQDF. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41826478>
5. Апхудов Т.М. Поперечное резание древесины: обоснование и исследование / Т.М. Апхудов, И.А. Гулиев // Современные направления развития аграрной науки [Электронный ресурс]. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, 2025. – С. 260-263. – EDN XLEGME. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82648875>
6. Леонова О.Н. Анализ неточностей теории резания и пиления древесины / О.Н. Леонова, В.В. Николаев // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года [Электронный ресурс]. – Якутск: Издательство "Знание-М", 2022. – С. 701-705. – EDN LZZUJU. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50144662>
7. Разработка компьютерной модели разрушения неоднородного материала / В.Н. Гаранин, А.Э. Юницкий, С.В. Артюшевский [и др.] // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика [Электронный ресурс]. – 2022. – № 1(254). – С. 28–37. – EDN KBOWSZ. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48177133>
8. Красовский В.В. Сравнительный анализ криволинейных профилей режущих органов для ротационных обрезочных аппаратов. – / Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А. // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2025. – № 43(206). – С. 186-198.
9. Патент РФ на полезную модель заявка № 2025120628 от 25.07.2025 г. Рабочий орган машины для обрезки садов и виноградников / Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А., Воложанинов С.С.

## References

1. Apkhudov T.M. Obosnovanie osnovnykh konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov izmel'chitelya vetvey plodovykh derev'ev [Substantiation of the main structural and technological parameters of a fruit tree branch shredder] / T.M. Apkhudov, A.K. Apazhev, Yu.A. Shekikhachev // Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal [International Technical and Economic Journal] [Electronic resource]. – 2019. – No. 4. – P. 15-19. – EDN SYQXBJ. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41204178>
2. Orlenko L.V. Issledovanie vliyaniya gidrotermicheskogo sostoyaniya drevesiny na napryazhennoe sostoyanie pri rezanii [Study of the influence of the hydro-thermal state of wood on the stress state during cutting] / L.V. Orlenko, E.O. Orlenko // Inzhenernye zadachi: problemy i puti resheniya [Engineering Problems: Issues and Solutions] [Electronic resource]. – Arkhangel'sk: Severnyy (Arkticheskiy) federal'nyy universitet imeni M.V. Lomonosova, 2021. – P. 111-112. – EDN MUEFBS. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48196084>
3. Gappoev A.I. Mashiny dlya konturnoy obrezki vinogradnikov i sadov [Machines for contour pruning of vineyards and orchards] / A.I. Gappoev, V.A. Tkhapsaev // Dostizheniya nauki - sel'skomu khozyaystvu [Scientific Achievements for Agriculture] [Electronic resource]. – Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University, 2017. – P. 289-293. – EDN YPDKSK. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32451959>
4. Solnyshkov D.M. Sovremennye podkhody k modelirovaniyu protsessov rezaniya drevesiny [Modern approaches to modeling wood cutting processes] / D.M. Solnyshkov, A.V. Shestakov // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa [Current Problems of the Forestry Sector Development] [Electronic resource]. – Vologda: Vologda State University, 2019. – P. 175-177. – EDN IGKQDF. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41826478>
5. Apkhudov T.M. Poperechnoe rezaniye drevesiny: obosnovanie i issledovanie [Cross-cutting of wood: justification and research] / T.M. Apkhudov, I.A. Guliev // Sovremennye napravleniya razvitiya agrarnoy nauki [Modern Directions of Agricultural Science Development] [Electronic resource]. – Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 2025. – P. 260-263. – EDN XLEGME. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82648875>
6. Leonova O.N. Analiz netochnostey teorii rezaniya i pileniya drevesiny [Analysis of inaccuracies in the theory of wood cutting and sawing] / O.N. Leonova, V.V. Nikolaev // Strategiya i perspektivy razvitiya agrotekhnologii i lesnogo kompleksa Yakutii do 2050 goda [Strategy and Prospects for the Development of Agrotechnologies and the Forestry Complex of Yakutia until 2050] [Electronic resource]. – Yakutsk: Znanie-M Publishing House, 2022. – P. 701-705. – EDN LZZUJU. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50144662>
7. Razrabotka komp'yuternoy modeli razrusheniya neodnorodnogo materiala [Development of a computer model for the destruction of heterogeneous material] / V.N. Garanin, A.E. Yunitskiy, S.V. Artyushevskiy [et al.] // Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika [Proceedings of BSTU. Series 3: Physical and Mathematical Sciences and Informatics] [Electronic resource]. – 2022. – No. 1(254). – P. 28–37. – EDN KBOWSZ. – Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48177133>
8. Krasovsky V.V. Sravnitel'nyy analiz krivolineynykh profiley rezhushchikh organov dlya rotatsionnykh obrosochnykh apparatov [Comparative analysis of curved blade profiles for rotary pruning devices] / V.V. Krasovsky, I.M. Trofimov, A.A. Zavaliy // Izvestiya

sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavridy [News of the Taurida Agricultural Science]. – 2025. – No. 43(206). – P. 186-198.

9. Patent RF na poleznuyu model' zayavka No. 2025120628 ot 25.07.2025 g. Rabochiy organ mashiny dlya obrezki sadov i vinogradnikov [RF patent for a utility model application No. 2025120628 dated 07/25/2025. Working body of a machine for pruning orchards and vineyards] / V.V. Krasovsky, I.M. Trofimov, A.A. Zavaliy, S.S. Volozhaninov.