

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

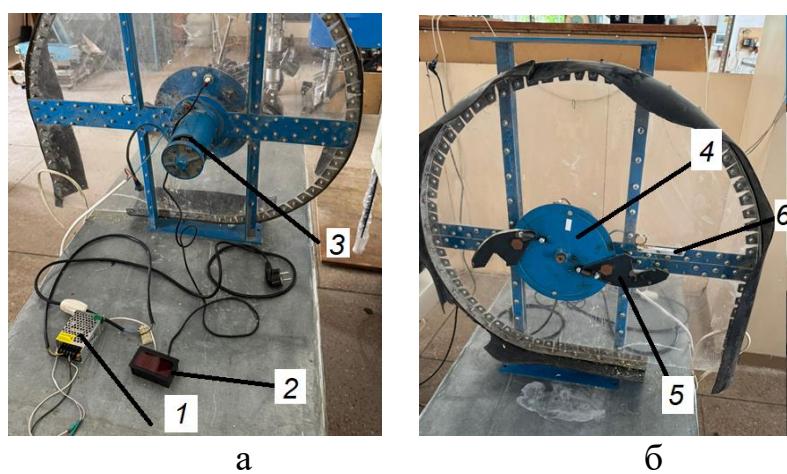


Рисунок 1 – Общий вид лабораторной установки: (а) вид спереди, (б) вид сзади

## 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 силометра 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 проведённых 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.

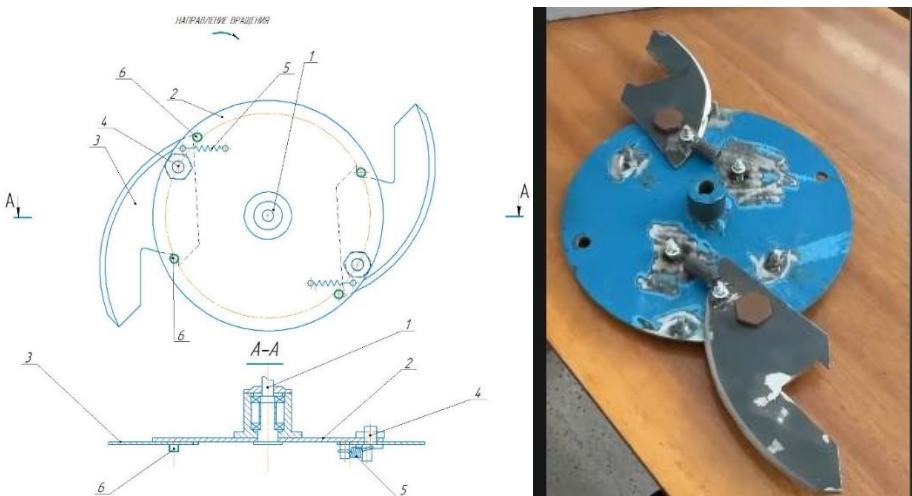


Рисунок 2 – Рабочий орган машины для обрезки виноградных и плодовых насаждений

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 ( $\phi = 90^\circ$ ); (б) разработанным криволинейным ножом ( $\phi \approx 75^\circ$ )

### **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  $\phi = 70\text{-}75^\circ$ , обеспечивающий снижение усилия резания на 60-70% по сравнению с перпендикулярным врезанием ( $\phi = 90^\circ$ ).

3. Лабораторные испытания, включавшие 270 экспериментальных наблюдений, подтвердили статистически значимое преимущество криволинейного ножа. Установлено, что применение криволинейного ножа с  $\phi = 75^\circ$  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 vetye 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-ekonomicheskiy 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]. – Arkhangelsk: 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 pilenija drevesiny [Analysis of inaccuracies in the theory of wood cutting and sawing] / O.N. Leonova, V.V. Nikolaev // Strategiya i perspektivy razvitiya agrotehnologiy 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 obresochnykh apparatov [Comparative analysis of curved blade profiles for rotary pruning devices] / V.V. Krasovsky, I.M. Trofimov, A.A. Zavaliv // 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.