



## Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи

А. В. Шутенко ✉, Д. О. Хорт

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [pilotklin6@mail.ru](mailto:pilotklin6@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** В статье описан процесс рассмотрения геометрических параметров струи воды в зависимости от ее режима работы и вида форсунки. В рамках исследования гидравлической обработки почвы в приствольных зонах возникла необходимость изучить параметры струи при различных видах насадок. Требовалось определить геометрические параметры потока воды для расчета площади поперечного сечения и определения структурных особенностей формирования струи. Данные характеристики важны для полноценного описания, последующего исследования и расчета действия струи воды при гидравлической обработке почвы. Также они позволяют изучить реальную форму и структуру струи при различных видах форсунки.

**Цель исследования.** Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи.

**Материалы и методы.** Для решения заданной цели был разработан стенд, представляющий собой подставку на четырех опорах, к которой закреплен адаптер подающей магистрали аппарата высокого давления со сменными форсунками (насадками). Для фиксации положения и формы струи воды с определенной частотой использовалась камера Basler acA1920. Также был использован аппарат высокого давления с максимальным давлением  $P = 140$  МПа и расходом  $Q = 360$  л/ч. В качестве насадок использовались: стандартная насадка с плоской струей, стандартная турбонасадка, турбонасадка разработанной конструкции. По полученным фотографиям измерялись геометрические параметры сечения струи воды. Проводился анализ структуры струи при разных режимах работы.

**Результаты исследования.** Удалось выяснить, что вращающийся поток воды, создаваемый в турбофорсунке собственной разработки и стандартной турбофорсунке, разбивается от быстрого вращения, образуя конус, площадь сечения которого составляет круг и воздействует на поверхность почвы. Для плоской струи характерна прямоугольная форма сечения.

**Обсуждение и заключение.** Форсунка предложенной конструкции позволяет создать струю воды наибольшей площади, что должно обеспечить увеличение ширины захвата и качества обработки поверхности почвы в приствольных насаждениях. Данное исследование также позволяет проанализировать структуру струи в процессе ее работы.

**Ключевые слова:** гидрообработка почвы, приствольные зоны, интенсивные сады, мульчирование, форсунки, геометрические параметры струи воды

© Шутенко А. В., Хорт Д. О., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Шутенко А. В., Хорт Д. О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.088-100>

Original article

## Determination of the Water Jet Geometric Parameters Depending on the Type of Nozzle and Jet Operation Mode

A. V. Shutenko , D. O. Khort

Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

 [pilotklin6@mail.ru](mailto:pilotklin6@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The article describes the process of considering the geometric parameters of water jet depending on a water jet operation mode and nozzle type. Within the framework of the study of hydraulic soil treatment in the under-tree zones, it became necessary to study the water jet parameters when using different types of nozzles. There was need to determine the geometric parameters of water flow for calculating the cross-sectional area and determining the structural features of the water jet formation. These characteristics are important for a complete description, subsequent study and calculation of water jet action during hydraulic soil treatment; they also allow studying the real shape and structure of the water jet when using different types of nozzles.

**Aim of the study.** The study is aimed at determining the geometric parameters of the water jet for different nozzles including turbo cutters located at different heights.

**Materials and Methods.** To solve this problem, there was developed a test bench, on four pillars, to which the adapter of the supply line of the high-pressure apparatus with replaceable nozzles is fixed. To fix the position and shape of the water jet with a certain frequency, a Basler ace acA1920 camera was used. There was also used a high-pressure apparatus with a maximum pressure of  $P = 140$  MPa, a maximum flow rate of  $Q = 360$  l/h. A standard nozzle with a flat jet, a standard turbo nozzle, and a turbo nozzle of the developed design were used. The geometric parameters of the water jet section were measured from the photographs obtained.

**Results.** From the photos obtained, it can be seen that the rotating water stream entering the turbo nozzle of its own design and the standard turbo nozzle disintegrates from rapid rotation, forming a cone, the cross-sectional area of which is a circle, and affects the soil surface. A flat jet is characterized by a rectangular cross-section.

**Discussion and Conclusion.** According to the results of the study we can draw the following conclusions, the nozzle of the proposed design allows creating water jets of the largest area, which should provide an increase in the working width and, as a consequence, an increase in productivity and quality of soil surface treatment in mainline plantations. This study will also make it possible to analyze the structure of the jet during its operation.

**Keywords:** soil hydrotreatment, tree trunk zones, intensive gardens, mulching, nozzles, geometric parameters of the water jet

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Shutenko A.V., Khort D.O. Determination of Water Jet Geometric Parameters Depending on the Type of Nozzle and Jet Operation Mode. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):88–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.088-100>

## Введение

В рамках исследования гидрообработки почвы от сорной растительности в приствольных зонах возникла необходимость рассмотреть параметры струи воды при различных видах насадок [1–4]. Данный метод обработки можно рассматривать как одну из альтернатив гербицидам или механической обработке почвы [5]. Сложностью реализации этого метода является необходимость создания струи воды, способной надежно разрушать задернелый почвенный покров глубиной до трех сантиметров [6], угнетая сорную растительность и обеспечивая ширину захвата рабочего органа порядка 300–450 мм. Особенностью гидрообработки является сосредоточенное воздействие на узкий участок поверхности почвы [7], вызывающее деформации сжатия, сдвига и местного растяжения пласта почвы, которые по форме сильно отличаются от воздействий, оказываемых механическими орудиями. Немаловажными факторами являются и режимы работы струи воды [8]. Так, наклон водной струи к поверхности почвы изменяет не только силу действия самой струи, но и площадь ее воздействия на почву. Также изменяется направление деформации почвы с сжатия на сдвиг или даже растяжение<sup>1</sup>. Изменение вида воздействия струи значительно влияет на способность почвы сопротивляться разрушению [9].

Обозначим основные геометрические параметры струи, необходимые для определения площади сечения и структурных особенностей формирования струи воды при различных видах форсунок: ширина и толщина – для прямоугольного сечения, диаметр – для круглого [10]. Данные параметры важны для корректного описания, исследования и расчета действия струи воды при гидрообработке почвы. Они позволяют изучить реальную форму и структуру струи при различных видах форсунки, в том числе при турбо фрезях и их движении в составе агрегата.

Геометрические характеристики струи определяют площадь ее сечения, что является одним из ключевых параметров, устанавливающих давление струи воды на поверхность почвы, что значительно влияет на эффективность гидрообработки. Однако значение данного параметра достаточно сложно измерить, так как обычные средства измерения линейных размеров не применимы для струи воды. Задача усложняется также использованием турбо форсунок, в которых конус распыливания создается вращающейся струей воды, что полностью исключает стандартные методы измерения размеров. При этом необходимо обосновать и изучить форму воздействия струи на поверхность почвы при использовании турбо форсунок, так как форма струи при контакте с обрабатываемой почвой неизвестна.

## Обзор литературы

В настоящее время разрушение и обработка материала струей жидкости применяется в различных отраслях экономики. Так, в работе И. Д. Мурашова исследуется применение высокоэнергетических струй воды для подготовки и резки мясной продукции [7]. В работе Д. А. Иванова описывается применение струи воды для разрушения керамических материалов локальным термоударом [11]. Широкое применение данный метод получил при гидрообразивной резке металлов [12].

<sup>1</sup> Сохранение плодородия орошаемых почв путем снижения негативного воздействия дождя ДМ «Фрегат» / А. В. Русинов [и др.] // Актуальные проблемы устойчивого развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 236–243. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/14177> (дата обращения 25.01.2024).

Гидроабразивная резка применяется и в горной промышленности. Математические модели процесса и его параметры описаны в одной из изученных нами работ [13]. В статье [14] описываются технологии совмещения лазера и гидроабразивной резки для создания обрабатывающих машин.

Применимость технологии гидрообработки приствольных зон садовых насаждений подтверждается в исследовании [15], где использование агрегата гидрообработки Caffini Gras Killer показало схожую эффективность с механическими методами обработки. Также гидрообработка рассматривается как одна из экологичных альтернатив применения химических средств борьбы с сорной растительностью в промышленных садах [16; 17]. Она может рассматриваться и как действенный способ борьбы с сорной растительностью [18]. В работах ряда зарубежных авторов обосновывается перспективность технологии угнетения сорной растительности гидрообработкой, описывается использование гидроабразивного метода для среза соломы пшеницы. А также разработка, расчет и результаты испытания устройства гидрообработки междурядий рисовых культур, описание способности струи воды и гидроабразивной обработки к резке различных сельскохозяйственных материалов и методы повышения их эффективности [19–22].

Обзор литературы показывает важность изучения структуры струи воды и процесса ее формирования при различных видах форсунок. Например, в работе [23] показано влияние формы штуцера на формирование структуры струи воды и последующую силу воздействия. Также наукой активно изучается влияние формы насадки и отверстия на струю воды при различной температуре [24; 25].

### **Материалы и методы**

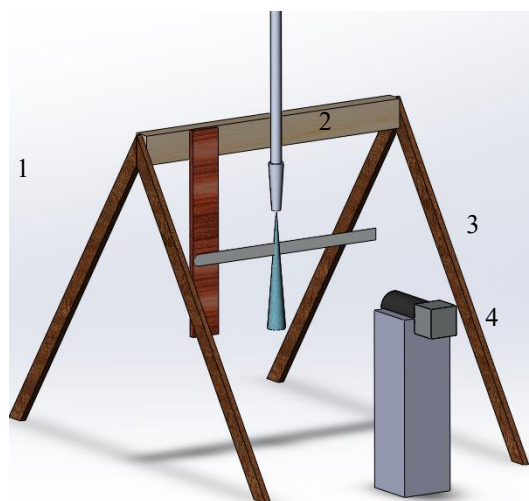
Для решения данной задачи был разработан стенд (рис. 1), представляющий собой подставку на четырех опорах, к которой закреплен адаптер подающей магистрали аппарата высокого давления со сменными насадками. Крепление адаптера позволяет менять высоту расположения форсунки. На подставке размещена рейка, позволяющая закреплять стальную линейку в плоскость действия струи воды из форсунки.

Для фиксации положения и формы струи воды с заданной частотой используется камера Basler ace acA1920. Она позволяет получать высококачественное видео с частой до 1000 кадров в секунду, данный режим съемки и был использован в нашем исследовании. Камера располагалась перпендикулярно оси симметрии струи воды и перпендикулярно измерительной поверхности линейки на расстоянии, необходимом для получения полноценной картинки и качественной фокусировки камеры.

Для исследований использовался аппарат высокого давления с максимальным давлением  $P = 140$  МПа, максимальный расход  $Q = 360$  л/ч.

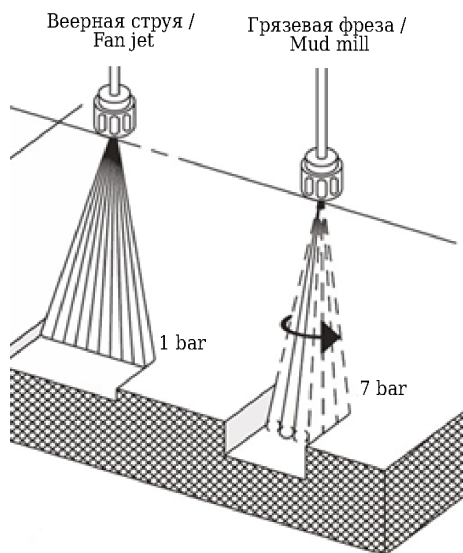
В качестве насадок использовались стандартная с плоской струей, стандартная турбо насадка (рис. 2) и турбо насадка разработанной конструкции (рис. 3).

Исследование проводится следующим образом. Подключенная к аппарату высокого давления форсунка закрепляется на стенд, линейка выставляется на заданную длину от среза сопла.



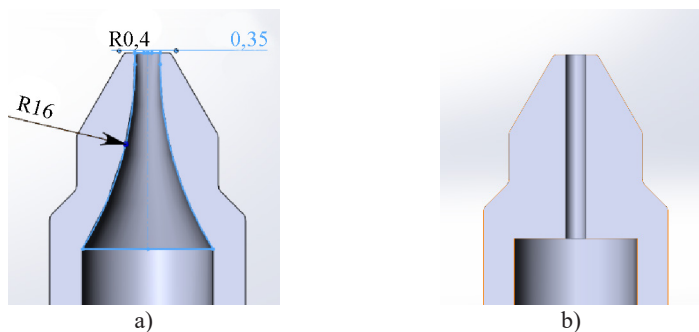
Р и с. 1. Устройство стенда для измерения геометрических параметров струи воды:  
1 – подставка; 2 – подающая магистраль аппарата высокого давления со сменными форсунками;  
3 – стальная линейка; 4 – камера

F i g. 1. Test bench design for measuring geometric parameters of water jet:  
1 – stand; 2 – supply line of the high-pressure device with replaceable nozzles;  
3 – steel ruler; 4 – camera



Р и с. 2. Виды исследуемых форсунок  
F i g. 2. Types of nozzles investigated

Далее запускается подача воды и съемка камеры. Благодаря проецированию изображения перпендикулярно линейке получается измерить геометрические параметры сечения струи в каждый момент ее работы. Также данный метод позволяет зафиксировать работу форсунки в динамике.



Р и с. 3. Сечение форсунки турбо насадки разработанной конструкции (а), сечение форсунки стандартной турбо насадки (б)

F i g. 3. Section of the turbo nozzle of its own design (a), section of the standard turbo nozzle (b)

### Результаты исследования

Площадь сечения струи воды разработанной турбо форсунки больше стандартной. При высоте 3 см – на 47 %, при высоте 5 – см на 53 %, при высоте 7 см – на 16 %, при высоте 9 см – на 5 %, при высоте 11 см у стандартной турбо форсунки площадь сечения струи больше на 5 %.

После проведения исследования по описанной выше методике полученный видеоматериал с помощью программы Free Video to JPG Converter кадрировался с сохранением отдельных изображений. По полученным изображениям измерялись геометрические параметры сечения струи воды, например, ширина струи (рис. 4).



Р и с. 4. Измерение ширины сечения струи воды для плоской форсунки на высоте 9 см от среза насадки

F i g. 4. Measuring the cross-section width of a water jet for a flat nozzle at a height of 9 cm from the nozzle cut

Значение ширины струи воды (диаметра конуса в измеряемом сечении для струй, имеющих круглое сечение) получается нахождением среднего из пяти значений. Также нами был проведен анализ структуры струи на разных режимах работы. Важным элементом обработки результатов было определение эффективной ширины струи без учета ее краевых участков, которые не имеют эффективного воздействия на обрабатываемую поверхность. Данные области отбрасывались согласно конусу распыления, который оставляет след на опорной поверхности. Для потока воды с сечением в виде круга измерялся диаметр данного сечения.

В результате исследования были получены данные, указанные в таблице 1.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

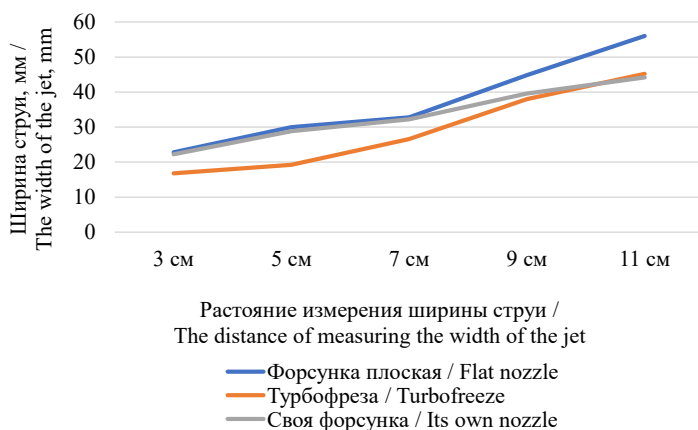
**Результаты измерения ширины струи**  
**Results of measuring the jet width**

Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm	Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm	Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm
Форсунка плоская / Flat nozzle		Стандартная турбо форсунка / Standard turbo nozzle		Разработанная турбо форсунка / Developed turbo nozzle	
11	56	11	48	11	41
9	44	9	41	9	38
7	32	7	26	7	32
5	30	5	19	5	28
3	22	3	16,8	3	22

Для лучшей визуализации они оформлены в виде графика зависимости ширины захвата форсунки от высоты замера (рис. 5).

Как видно из графика (рис. 5), разработанная турбо форсунка имеет аналогичный с турбофрезой размер при высоте обработки 11 см. Однако значительно выигрывает в ширине при уменьшении высоты измерения до 3 см, приближаясь по ширине к форсунке с плоской струей. Полученный результат позволяет утверждать, что при наиболее эффективных значениях высоты обработки разработанная турбо форсунка будет иметь большую ширину захвата и повышенную производительность [26].

Исходя из представленных выше данных, вычислим площадь воздействия струи воды на поверхность почвы (рис. 6).



Р и с. 5. Графическое представление результатов измерения ширины струи на разной высоте  
 F i g. 5. Graphical representation of the results of measuring the width of the jet at different heights



Р и с. 6. Структура струи у разработанной турбо форсунки (а) и стандартной турбо форсунки (b)  
 F i g. 6. Jet structure of a developed turbo nozzle (a) and a standard turbo nozzle (b)

На основании полученных фотографий (рис. 6) видно, что вращающийся поток воды в разработанной турбо форсунке и стандартной турбо форсунке разбивается от быстрого вращения, образуя конус, площадь сечения которого составляет круг, и воздействует на поверхность почвы, поэтому для данных форсунок будем использовать формулу [27]:

$$S = \pi r^2, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь воздействия струи воды на поверхность,  $\text{мм}^2$ ,  $r$  – радиус основания конуса распыления струи,  $\text{мм}$ .

Для плоской струи характерна прямоугольная форма сечения (рис. 6), поэтому расчет будет вестись по следующей формуле (2):

$$S = a \cdot b, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь воздействия струи воды на поверхность,  $\text{мм}^2$ ;  $a$  – ширина струи,  $\text{мм}$ ;  $b$  – толщина струи,  $\text{мм}$ . В результате вычислений получены следующие результаты (табл. 2).

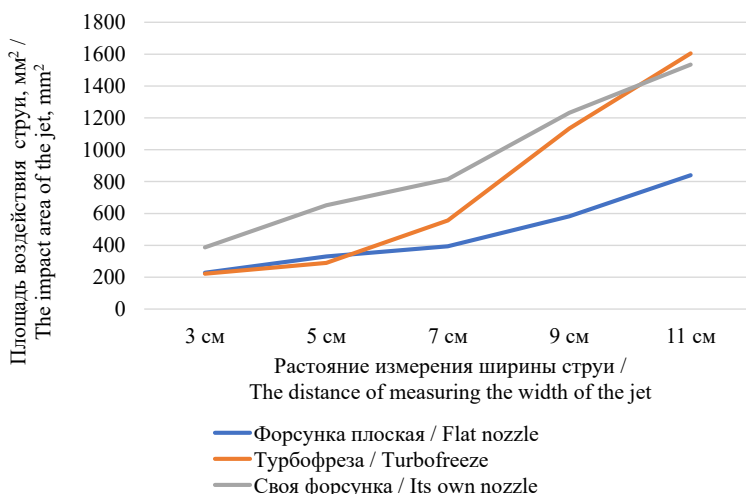


Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Полученная площадь сечения струи**  
**The resulting cross-sectional area of the jet**

Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Форсунка плоская / Flat nozzle	
	Площадь, мм <sup>2</sup> / Area, mm <sup>2</sup>	Ширина, мм / Width, mm
3 см	182	22
5 см	270	30
7 см	328	32
9 см	492	44
11 см	840	56
Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Стандартная турбо форсунка / Standard turbo nozzle	
	Площадь, мм <sup>2</sup> / Area, mm <sup>2</sup>	Ширина, мм / Width, mm
3 см	201	16
5 см	284	19
7 см	531	26
9 см	1134	38
11 см	1590	45
Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Разработанная турбо форсунка / Developed turbo nozzle	
	Площадь, мм <sup>2</sup> / Area, mm <sup>2</sup>	Ширина, мм / Width, mm
3 см	380	22
5 см	616	28
7 см	804	32
9 см	1195	39
11 см	1521	44

Далее представлен график, визуализирующий полученные результаты (рис. 7).



Р и с. 7. График зависимости площади воздействия струи воды от высоты струи  
F i g. 7. Graph of dependence of water jet impact area on jet height

Как видно из графика, площадь воздействия струи воды у плоской форсунки меньше остальных вариантов. Наибольшая же площадь струи достигается у разработанной турбо форсунки.

### Обсуждение и заключение

С помощью разработанной турбо форсунки возможно создать струи воды наибольшей площади, что обеспечивает увеличение ширины захвата, повышение производительности и качества обработки поверхности почвы в приствольных насаждениях.

Результаты данного исследования позволяют проанализировать структуру струи в процессе ее работы. У всех видов форсунок струя разбивается на мелкие капли, образуя зону обработки поверхности без выделенных зон собранного структурированного потока жидкости. Также опыт показывает, что площадь обрабатываемой поверхности зависит не только от высоты расположения форсунки и давления воды, но и от угла факела распыла сопла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы создания новых машин для промышленного садоводства / А. Ю. Измайлов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 3. С. 20–23. EDN: QINCQT
2. Танкаева А. М., Алиев Т. Г. Г., Пальчиков Е. Н. Состояние и проблемы изучения гербицидов // Наука и образование. 2020. Т. 3, № 4. С. 239. URL: <http://opusmgau.ru/index.php/sec/article/view/2409/2408> (дата обращения 25.01.2024).
3. Хажметова А. Л., Карданов Р. А., Хажметов Л. М. К вопросу совершенствования машин для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2021. № 2 (32). С. 89–94. URL: <https://clck.ru/38QMAN> (дата обращения 25.01.2024).
4. Перспективные системы содержания почвы в интенсивных садах семечковых культур / Т. Г. Г. Алиев [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 2 (28). С. 29–33. EDN: OYICJJ
5. Sustainable Crop and Weed Management in the Era of the EU Green Deal: A Survival Guide / A. Tataridas [et al.] // Agronomy. 2022. Vol. 12, Issue 3. P. 589. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030589>
6. Машина для приствольной обработки почвы / С. Ф. Сороченко [и др.] // Ползуновский альманах. 2022. № 3. С. 128–130. EDN: EGHWJI
7. Мурашов И. Д., Крюкова Е. В., Мирзоян Д. Г. Установка для резания мякотного и мясокостного сырья высокоэнергетической струей воды // American Scientific Journal. 2020. Т. 1, № 43. С. 47–50. <https://doi.org/10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.50>
8. Математическое обоснование гидрорезки пищевых продуктов / И. Д. Мурашов [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 3. С. 184–189. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-184-189>
9. Слюсаренко В. В., Русинов А. В., Акпасов А. П. Сохранение плодородия сельскохозяйственных почв за счет снижения негативного воздействия дождя дождевальными машинами // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : мат-лы I нац. науч.-практ. конф. с международным участием. 2019. С. 588–594. EDN: ZAHCVN
10. Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности / А. Ю. Измайлов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 614–634. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>
11. Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Кутырев А. И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 35–41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
12. Abrasive Water Jet Machining Process: A state of art of review / Y. Natarajan [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 49. P. 271–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>

13. Ren F., Fang T., Cheng X. Study on Rock Damage and Failure Depth under Particle Water-jet Coupling Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 139. Article no. 103504. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103504>
14. Overview on the Development and Critical Issues of Water Jet Guided Laser Machining Technology / Y. Liu [et al.] // *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 137. Article no. 106820. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106820>
15. An Alternative Tool for Intra-Row Weed Control in a High-Density Olive Orchard / A. Assirelli [et al.] // *Agronomy*. 2022. Vol. 12, Issue 3. P. 605. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030605>
16. Sustainable Alternatives to Chemicals for Weed Control in the Orchard – A Review / M. J. Mia [et al.] // *Horticultural Science*. 2020. Vol. 47, Issue 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.17221/29/2019-HORTSCI>
17. Информационно-техническое обеспечение производственных процессов в садоводстве / А. Ю. Измайлов [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. № 6. С. 36–40. EDN: THJNUL
18. Amgain N. R., Fontanier C. H., Martin D. L. Short-Term Effects of Alternative Cultivation Practices on Putting Green Infiltration Rates // *Crop Science*. 2021. Vol. 61, Issue 6. P. 4425–4435. <https://doi.org/10.1002/csc2.20604>
19. Design Optimization and Mechanism Analysis of Water Jet-Type Inter-Plant Weeding Device for Water Fields / W. Zhou [et al.] // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, Issue 5. P. 1305. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051305>
20. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review / D. Cui [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Issue 18. P. 8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
21. Analysis of Waterjet Treatment for Herbicide-free Vegetation Management on Railway Tracks / A. Schulte-Marxloh [et al.] // *WJTA Conference and Expo*. 2022. URL: <https://www.wjta.org/images/wjta/2022conference/Proceedings/A6-2022.pdf> (дата обращения 25.01.2024).
22. Experimental Study of Abrasive Waterjet Cutting for Managing Residues in No-Tillage Techniques / F. Perotti [et al.] // *Agriculture*. 2021. Vol. 11, Issue 5. P. 392. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050392>
23. Лихоманов А. О., Камлюк А. Н. Длина начального участка осесимметричной турбулентной струи, образующейся в пенном розеточном оросителе для автоматических установок пожаротушения // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5, № 2. С. 159–173. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.159>
24. Обоснование параметров робототехнического средства с опрыскивателем и модулем магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве / А. Ю. Измайлов [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. № 1. С. 3–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-11-1-3-10>
25. Бусов К. А., Мажейко Н. А. Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59, № 2. С. 316–320. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020022>
26. Хилько И. И., Сапун Л. Г. Совершенствование рабочих органов высоконапорных моечных установок // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022. № 53. С. 165–170. URL: <https://mechel.belar.by/jour/article/download/637/642> (дата обращения 25.01.2024).
27. Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы / Д. О. Хорт [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 1. С. 25–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>

*Поступила в редакцию 01.06.2023; поступила после рецензирования 29.09.2023; принята к публикации 10.10.2023*

*Об авторах:*

**Шутенко Александр Витальевич**, инженер научно-исследовательской лаборатории Разработки изделий нано- и микросистемной техники Московского института электронной техники (124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0394-4514>, [pilotklin6@mail.ru](mailto:pilotklin6@mail.ru)

**Хорт Дмитрий Олегович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией машинных технологий для возделывания и уборки плодовых и ягодных культур Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, Researcher ID: Q-2695-2017, [dmitriyhort@mail.ru](mailto:dmitriyhort@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

А. В. Шутенко – введение, обзор литературных источников, разработка математической модели расчета геометрических параметров струи, обоснование параметров исполнительного устройства, обработка статистических данных.

Д. О. Хорт – постановка цели и проблематики исследования, формулировка его результатов, определение технологических параметров и режимов работы исполнительного устройства.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Smirnov I.G., Khort D.O. Actual Problems of Creation of New Machines for Industrial Gardening. *Agricultural Machines and Technologies*. 2013;(3):20–23. (In Russ.) EDN: QINCQT
2. Tankaeva A.M., Aliev T.G.G., Palchikov E.N. State and Problems of Studying Herbicides. *Science and Education*. 2020;3(4):239. (In Russ.) Available at: <http://opusmgau.ru/index.php/sec/article/view/2409/2408> (accessed 25.01.2024).
3. Khazhmetova A.L., Kardanov R.A., Khazhmetov L.M. The Issue of Improving Machines for Processing Trunk Strips of Fruit Plantations in Terrace Gardening. *News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University*. 2021;(2):89–94. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/38QMAN> (accessed 25.01.2024).
4. Aliev T.G.G., Bobrovich L.V., Usova G.S., Matsnev I.N., Palchikov E.V. Promising Systems of Soil Content in Intensive Orchards of Pome Crops. *Technologies of Food and Processing Industry Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2019;(2):29–33. (In Russ.) EDN: OYICJJ
5. Tataridas A., Kanatas P., Chatzigeorgiou A., Zannopoulos S., Travlos I. Sustainable Crop and Weed Management in the Era of the EU Green Deal: A Survival Guide. *Agronomy*. 2022;12(3):589. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030589>
6. Sorochenko S.F., Chuklin N.M., Razzamazov N.I., Ugarov V.A. Machine for Near-Tree Tillage. *Polzunovskiy almanac*. 2022;(3):128–130. (In Russ.) EDN: EGHWJI
7. Murashov I.D., Kryukova E.V., Mirzoyan D.G. Installation for Cutting Meat and Meat Raw Materials with a High-Energy Water Jet. *American Scientific Journal*. 2020;1(43):47–50. <https://doi.org/10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.50>
8. Murashov I.D., Goryacheva E.D., Kryukova E.V., Mirzoyan D.G. Mathematical Justification of Hydro-Cutting of Food Products. *Technologies of Food and Processing Industry Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2021;(3):184–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-184-189>
9. Slyusarenko V.V., Rusinov A.V., Akpasov A.P. Preservation of the Fertility of Agricultural Soils by Reducing the Negative Impact of Rain From Sprinklers. *Innovations of Environmental Management and Environmental Protection: Materials of the 1<sup>st</sup> National Scientific and Practical Conference with International Participation*. 2019;588–594. (In Russ.) EDN: ZAHCVN
10. Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Smirnov I.G., Filippov R.A., Kutuyev A.I. Analysis of Work Parameters of the Device for Hydraulic Removal of Weed Vegetation. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(4):614–634. (In Russ.) <http://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>
11. Smirnov I.G., Khort D.O., Kutuyev A.I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):35–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
12. Natarajan Y., Murugesan P.K., Mohan M., Liyakath Ali Khan S.A. Abrasive Water Jet Machining Process: A State of Art of Review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:271–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>
13. Ren F., Fang T., Cheng X. Study on Rock Damage and Failure Depth under Particle Water-jet Coupling Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020;139:103504. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103504>
14. Liu Y., Wei M., Zhang T., Qiao H., Li H. Overview on the Development and Critical Issues of Water Jet Guided Laser Machining Technology. *Optics & Laser Technology*. 2021;137:106820. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106820>

15. Assirelli A., Ciaccia C., Giorgi V., Zucchini M., Neri D., Lodolini E.M. An Alternative Tool for Intra-Row Weed Control in a High-Density Olive Orchard. *Agronomy*. 2022;12(3):605. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030605>
16. Mia M.J., Massetani F., Murri G., Neri D. Sustainable Alternatives to Chemicals for Weed Control in the Orchard – a Review. *Horticultural Science (Prague)*. 2020;47(1):1–12. <https://doi.org/10.17221/29/2019-HORTSCI>
17. Izmaylov A.Yu., Smirnov I.G., Artyushin A.A., Filippov R.A., Khort D.O. Information and Technical Support of Operating Processes in Gardening. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;(6):36–40. EDN: THJNUL
18. Amgain N. R., Fontanier C. H., Martin D. L. Short-Term Effects of Alternative Cultivation Practices on Putting Green Infiltration Rates. *Crop Science*. 2021;61(6):4425–4435. <https://doi.org/10.1002/csc2.20604>
19. Zhou W., Song K., Sun X., Fu Q., Wang Y., Wang Q., et al. Design Optimization and Mechanism Analysis of Water Jet-Type Inter-Plant Weeding Device for Water Fields. *Agronomy*. 2023;13(5):1305. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051305>
20. Cui D., Li H., He J., Wang Q., Lu C., Hu H., et al. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(18):8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
21. Cui D., Li H., He J., Wang Q., Lu C., Hu H., et al. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(18):8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
22. Perotti F., Annoni M., Calcante A., Monno M., Mussi V., Oberti R. Experimental Study of Abrasive Waterjet Cutting for Managing Residues in No-Tillage Techniques. *Agriculture*. 2021;11(5):392. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050392>
23. Likhomanov A.O., Kamlyuk A.H. The Breakup Length of Axisymmetric Turbulent Jet in the Foam Deflector Type Sprinkler for Automatic Extinguishing Systems. *Journal of Civil Protection*. 2021;5(2):159–73. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.159>
24. Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Smirnov I.G., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Justification of Parameters of Robotic Means with Sprayer and Module Magnetic-Pulse Processing of Plants in Horticulture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(1):3–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-1-3-10>
25. Busov K.A., Mazheiko N.A. Boiling of a Jet of Superheated Water with Outlet through a Nozzle with a Square Section. *Теплофизика Высокотемператур*. 2021;59(2):316–320. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020022>
26. Khilko I.I., Sapun L.G. Improvement of Working Bodies of High-Pressure Washing Units. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;(53):165–170. Available at: <https://mechel.belal.by/jour/article/download/637/642> (accessed 25.01.2024).
27. Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I. Agricultural Autonomous Robotic Platform Motion Control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):25–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>

Submitted 01.06.2023; revised 29.09.2023; accepted 10.10.2023

*About the authors:*

**Aleksandr V. Shutenko**, Engineer of the Research Laboratory for Development of Nano- and Microsystems Engineering Products, Moscow Institute of Electronic Technology (1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0394-4514>, pilotklin6@mail.ru

**Dmitry O. Khort**, D.Sci. (Engr.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Machine Technologies for Cultivation and Harvesting of Fruit and Berry Crops, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, Researcher ID: Q-2695-2017, dmitriyhort@mail.ru

*Authors contribution:*

A. V. Shutenko – introduction, literature review, development of the mathematical model, calculation of geometrical parameters of the jet, justification of the parameters of the actuating device, processing of statistical data.

D. O. Khort – setting the purpose and problems of the research, formulation of its results, determination of technological parameters and operating modes of the actuator.

*All authors have read and approved the final manuscript.*