

Обоснование устройства генерации капель искусственного дождя пневмогидравлическим распылением жидкости

Василий Петрович Горобей¹,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, e-mail: sector.simf23@yandex.ru;
Вадим Юрьевич Москалевич²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: v_moskalevich@mail.ru;

Захид Адегизалович Годжаев³,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
e-mail: fic51@mail.ru

¹Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН, Симферополь, Российская Федерация

²Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация

³Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Исследовали показатели пневмогидравлического устройства распыления жидкости для орошения, питания и защиты сельскохозяйственных растений с учетом принципов водоэнергосбережения, основанных на предварительном газонасыщении распыливаемой воды и использовании в конструкции аэрационного узла кавитационного эффекта при эжекции и подаче воздуха под давлением. (*Цель исследования*) Определить технологические показатели пневмогидравлического устройства распыления жидкости для получения искусственного дождя регулируемой дисперсности и обосновать выбор его оптимальных технических параметров в зависимости от режимов работы. (*Материалы и методы*) Использовали алгоритм расчета параметров в табличном процессоре EXCEL или WPS и математические выражения. (*Результаты и обсуждение*) Теоретически определили минимальные и максимальные расчетные параметры геометрии конструктивного решения устройства для распыления жидкой фазы: сопла водяного штуцера, канала воздушного штуцера, камеры смешения, среднего кольцевого зазора, выходного сопла. Изменяли показатели рабочих давлений воды – 0,20; 0,25; 0,30 и 0,35 мегапаскаля; воздуха – 0,25 и 0,30 мегапаскаля при условии расхода воды от 0,002 до 0,010 литра в секунду и воздуха – от 0,0005 до 0,0090 килограмма в секунду. При повышении расхода воды в указанных пределах и коэффициента эжекции от 0,5 до 0,9 выявили линейное увеличение среднего диаметра кольцевого зазора от 2 до 15 миллиметров, а также нелинейную зависимость роста диаметра камеры смешения распылителя с 5 до 20 миллиметров. Показали возможность существенно уменьшить диаметр камеры смешения, если повысить давление воды от 0,25 до 0,35 мегапаскаля и, соответственно, давление воздуха – от 0,20 до 0,30 мегапаскаля. Определили величины параметров для разработки макетных и экспериментальных образцов, которые оказались значительно меньше, чем при работе в режиме эжекции воздуха: выходного сопла и среднего кольцевого зазора – на 16 процентов, канала воздушного штуцера – на 23, диаметра камеры смешения – на 50 процентов и более. (*Выводы*) Получили расчетные данные для оптимизации технологических параметров и конструктивных решений, что позволит ускорить изготовление макетных и модельных образцов устройства и его экспериментальную апробацию для генерации капель искусственного дождя различной дисперсности.

Ключевые слова: орошение, пневмогидравлический дождеватель, распыление жидкости, эжекция воздуха, дисперсность, кавитация.

■ **Для цитирования:** Горобей В.П., Москалевич В.Ю., Годжаев З.А. Обоснование устройства генерации капель искусственного дождя пневмогидравлическим распылением жидкости // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №2. С. 53-60. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-53-60.

Device Substantiation for Generating Artificial Rain Drops by Pneumohydraulic Liquid Spraying

Vasiliy P. Gorobey¹,
Dr.Sc.(Eng.), senior research,
e-mail: sector.simf23@yandex.ru;
Vadim Y. Moskalevich²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: v_moskalevich@mail.ru;

Zahid A. Godzhaev³,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: fic51@mail.ru

¹All-Russian National Scientific Research Institute of Vineyards and Wine "Magarach", Simferopol, Russian Federation;

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation;

³Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors studied the pneumohydraulic device indicators for spraying liquids for irrigation, nutrition and protection of agricultural plants, taking into account the principles of water and energy conservation, based on preliminary gas saturation of sprayed water and the use of a cavitation effect in the design of the aerator unit during ejection and supply of air under pressure. (*Research purpose*) To determine the technological parameters of a pneumohydraulic device for spraying liquids to obtain controlled dispersive artificial rain and substantiate the choice of its optimal technical parameters depending on the operating modes. (*Materials and methods*) The authors used an algorithm for calculating parameters in EXCEL or WPS spreadsheet processor and mathematical expressions. (*Results and discussion*) The authors theoretically determined the minimum and maximum calculated parameters of the constructive solution geometry for spraying the liquid phase: water nozzle, air nozzle channel, mixing cell, middle annular gap, outlet nozzle. They changed indicators of operating water pressure – 0.20; 0.25; 0.30 and 0.35 megapascals; air – 0.25 and 0.30 megapascals, provided the water flow rate from 0.002 to 0.010 liter per second and air – from 0.0005 to 0.0090 kilogram per second. With an increase in the water flow rate within the specified limits and the ejection coefficient from 0.5 to 0.9, a linear increase in the average annular gap diameter from 2 to 15 millimetres was revealed, as well as a nonlinear dependence of the increase in the sprayer mixing cell diameter from 5 to 20 millimetres. The authors showed the possibility of reducing the mixing cell diameter if the water pressure was increased from 0.25 to 0.35 megapascal's and the air pressure was from 0.20 to 0.30 megapascals. They obtained the parameters values for the designed and experimental samples development, which turned out to be significantly less than when operating in the air ejection mode: the outlet nozzle and the middle annular gap – by 16 percent, the air nozzle – by 23, the diameter of the mixing cell – by 50 percent or more. (*Conclusions*) The authors obtained calculated data to optimize technological parameters and design solutions, which would speed up the manufacture of designed and model samples of the device and its experimental testing for the generation of dispersive artificial rain drops.

Keywords: irrigation, pneumohydraulic sprayer, liquid spraying, air ejection, dispersion, cavitation.

For citation: Gorobey V.P., Moskalevich V.Yu., Godzhaev Z.A. Obosnovanie ustroystva generatsii kapel' iskusstvennogo dozhdya pnevmogidravlicheskim raspyleniem zhidkosti [Device substantiation for generating artificial rain drops by pneumohydraulic liquid spraying]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N2. 53-60 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-53-60.

Технологии малообъемного орошения, такие как дождевание и капельное орошение, находят все большее применение во многих странах мира [1]. Однако в целом они используются еще весьма ограниченно, так как требуют наличия сложных и дорогостоящих технических средств и высокой культуры орошаемого земледелия [2-6]. Практическими исследованиями установлена актуальность разработки технологий орошения и эксплуатации технических средств, в наибольшей степени соответствующих почвенно-климатическим условиям районов применения: с качеством естественных дождей «средней» силы, водо- и энергосберегающих, экологических. Этим требованиям лучше всего соответствуют системы микроорошения, которые обеспечивают повышение урожайности сельхозкультур на 50-60%, экономию оросительной воды – на 20-30% при снижении капитальных вложений на 20-30% и энергетических затрат – на 15-30% [7-10]. Технические средства мелкодисперсного дождевания необходимы для внекорневой подкормки растений, ухода за кронами насаждений, регулирования микро- и фитолимата на полях путем распыления диспергированной воды в приземном слое при неблагоприятных или экстремальных

для растений условиях воздушной среды [11].

Системы мелкодисперсного дождевания применимы на орошаемых и богарных землях для освежительных поливов садов, ягодников, чайных плантаций, а также овощных, кормовых и технических культур, многолетних трав и пастбищ. Поскольку эти системы не решают проблемы обеспечения растений влагой, их надо применять одновременно с другими видами орошения, например с наиболее экономичным капельным способом полива. В этом случае необходимо создавать совместную систему орошения с единым узлом управления [12-14].

Для усовершенствования устройств создания искусственного дождя по инновационным технологиям предложены пневмогидравлические установки. Их отличительная особенность – подведение в водопроводящий пояс дождевальной машины сжатого воздуха по воздухопроводу от компрессора. Воздуховод заканчивается соплом, где образуется водо-воздушная смесь.

В Республике Казахстан (Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства, г. Тараз) для орошения небольших площадей фермерских хозяйств, по результатам анализа конструкций суще-

ствующих систем импульсного дождевания, разработана принципиальная схема такой системы с усовершенствованными основными элементами (патент KZ № 26143, 2012). Для улучшения качества дождя импульсных дождевальных аппаратов типа «Роса-3» создана специальная насадка. Поступление воздуха в сопло улучшает структуру дождя путем изменения диаметра капель [15, 16].

Из всех содержащихся в жидкости примесей существенное влияние на ее прочность могут оказать только пузырьки, находящиеся в объеме жидкости или в мелких трещинах нерастворимых частиц. Газовый пузырек – слабое место в структуре жидкости, определяющее ее прочность. Согласно теории прочности жидкости Я.Б. Зельдовича, ее разрушение наступает вследствие развития газовых пузырьков. Другой механизм разрывов сплошности жидкости – кавитация, которая возникает при резком снижении давления в потоке движущейся жидкости. Эти механизмы разрушения сплошности жидкости использованы в пневмогидравлическом устройстве, которое работает в режиме эжекции воздушной фазы для распыления жидкости для орошения и фертигации сельскохозяйственных растений [17] (RU № 2704175, 2019).

Исследованиями газожидкостного потока на стенде установлено, что форсунки пневмогидроорошения показывают более эффективный факел по сравнению с пневмоорошением [18].

Актуальной остается задача изменения дисперсности жидкой фазы, получение которой возможно при регулировании давления и расхода смешивающихся гетерогенных фаз.

Цель исследования – определить технологические показатели пневмогидравлического устройства распыления жидкости для получения искусственного дождя регулируемой дисперсности и обосновать выбор его оптимальных технических параметров в зависимости от режимов работы.

Материалы и методы. Прикладные компьютерные программы позволяют анализировать некоторые технические показатели существующих и вновь создаваемых дождевальных машин. В целях оптимизации процесса работы машин по критериям равномерности распределения жидкостей для снижения материальных и энергетических затрат, повышения вероятности качественной работы при изменении условий эксплуатации используют программы моделирования распределения воды дождевальными аппаратами и насадками, составленные в системе *MathCAD* по формулам с выводом зависимостей числовых характеристик от давления и геометрических параметров [19, 20].

Предварительное газонасыщение воды повышает КПД распыливания и существенно снижает расход воздуха и энергии по сравнению с пневматическим распыливанием. Для расширения диапазона регулирования размеров капель воды, разбрызгиваемых дож-

девателями, использованы аэраторы с кавитационным эффектом при эжекции. Такие устройства при простоте конструкции позволяют получать водо-воздушную смесь, легко распадающуюся на капли при выходе из сопла дождевателя в воздух, без дополнительных затрат механической энергии.

Методы математического моделирования рабочего процесса генерирования капель искусственного дождя пневмогидравлическим устройством позволили обосновать его геометрические и технологические параметры для создания мелкодисперсного искусственного дождя, регулирования крупности и равномерности распределения капель и снижения энергозатрат. Алгоритм расчета параметров распыливающего устройства пневмогидравлического увлажнителя выполнен и работает в табличном процессоре (*EXCEL* или *WPS*) с использованием приведенных математических выражений обоснования основных конструктивно-технологических параметров устройства.

Результаты и обсуждение. Для исследований взяли устройство дождевателя, корпус которого состоит из трех частей, расположенных вдоль оси на резьбовом соединении (рис. 1).

При распылении воды или растворов поток жидкой фазы под давлением p_1 направлен по каналу штуцера, где получает ускорение в конусообразном сужении канала и поступает в сопло. Жидкость частично приводится во вращение винтообразными углублениями на цилиндрических стенках сопла и выбрасывается в камеру смешения. Там происходит разрежение поступающего под давлением p_2 воздуха. Насыщенная воздухом жидкость направляется под давлением p_3 в выпускное сопло, где вращением по винтообразным углублениям дополнительно завихряется перед выбросным распылением. При нагнетании воздуха под давлением распыление жидкости регулируется изменением величины кольцевого пневмозазора, образованного между конусными поверхностями корпуса и наружной конусовидной поверхностью торцевой части штуцера соосно центральному жидкостному каналу.

В пневмогидравлическом устройстве воздух может быть диспергирован в жидкую фазу из атмосферы под действием разрежения, возникающего в камере смешивания, без принудительного воздействия. Требования к чистоте жидкой фазы определены величиной поперечного сечения жидкостного канала, а попадание жидкости в камеру для воздуха при работе устройства исключено.

Эжекция воздушной фазы – важное условие при обосновании конструктивно-технологической схемы и параметров дождевателя. Для наиболее эффективного распыливания воды его конструкция должна обеспечивать насыщение воды воздухом и значительный перепад давления на выходе водо-воздушной смеси из сопла форсунки. Насыщение воды воздухом мо-

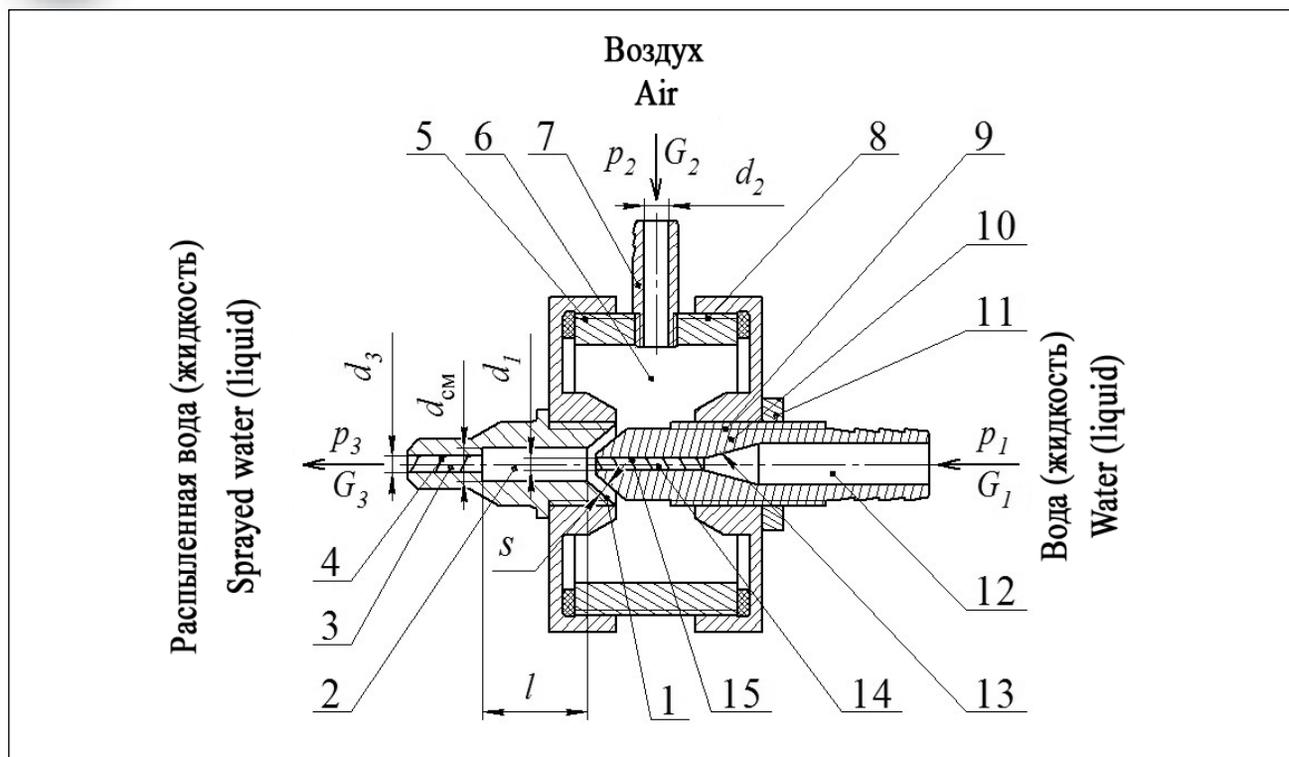


Рис. 1. Схема устройства для распыления жидкости: p_1 – давление оборотной воды; p_2 – давление воздуха; p_3 – давление водовоздушной смеси; d_1 – диаметр камеры смешения; d_2 – диаметр канала воздушного штуцера; d_3 – диаметр выпускного сопла; G_1 – расход оборотной воды; G_2 – расход воздуха; G_3 – расход водовоздушной смеси; s – ширина кольцевого зазора; l – длина камеры смешения; 1 – выпускное сопло; 2 – кольцевая впадина; 3 – камера смешения; 4 – винтообразные углубления; 5 – резьбовое соединение между первой и второй частью корпуса; 6 – диффузор; 7 – воздушный штуцер; 8 – резьбовое соединение между второй и третьей частью корпуса; 9 – резьба штуцера; 10 – штуцер; 11 – фиксатор положения; 12 – канал штуцера; 13 – сужение канала штуцера; 14 – жидкостное сопло; 15 – однозаходные винтовые углубления

Fig. 1. Structure diagram of a device for spraying liquid: p_1 – circulating water pressure; p_2 – air pressure, p_3 – water-air mixture pressure; d_1 – diameter of the mixing cell; d_2 – diameter of the channel of the air fitting; d_3 – diameter of the exhaust nozzle; G_1 – circulating water consumption; G_2 – air consumption; G_3 – flow rate of the air-water mixture; s – width of the annular gap l – length of the mixing cell; 1 – outlet nozzle; 2 – annular cavity; 3 – mixing chamber; 4 – spiral depressions; 5 – threaded connection between the first and second part of the body; 6 – diffuser; 7 – air connection; 8 – threaded connection between the second and third body parts; 9 – fitting thread; 10 – fitting; 11 – position lock; 12 – fitting channel; 13 – narrowing of the choke channel; 14 – liquid nozzle; 15 – single-threaded spiral depressions

жет осуществляться как принудительным его вводом в камеру смешиванию, так и путем его эжекции. В последнем случае струя воды создает разрежение в камере смешения, и воздух всасывается из атмосферы.

На основе известного из гидравлики уравнения для расхода воды G_1 через сопло получена зависимость для расчета диаметра d_1 отверстия круглого сечения водяного штуцера:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi\mu_1\sqrt{2p_1}}}, \quad (1)$$

где d_1 – диаметр отверстия круглого сечения водяного штуцера, м;

G_1 – расход воды через сопло, л/с;

μ_1 – коэффициент расхода воды;

p_1 – давление воды, Па.

Зависимость для расчета среднего диаметра кольцевого зазора на входе в камеру смешения устройства

для распыления жидкости, полученная с учетом известного уравнения для массового расхода воздуха, поступающего из атмосферы через воздушную камеру в камеру смешения, имеет вид:

$$d_c = \frac{G_2}{\pi\mu_2 s} \sqrt{\frac{RT_2}{0,469}}, \quad (2)$$

где d_c – средний диаметр кольцевого зазора, м;

p_2 – давление воздуха, Па;

G_2 – расход воздуха, кг/с;

R – газовая постоянная, (Н·м)/(кг·град.);

T_2 – абсолютная температура воздуха, К;

μ_2 – коэффициент расхода воздуха;

s – ширина кольцевого зазора, м.

Чтобы вода из камеры смешения дождевателя не попадала в воздушную камеру дождевателя, необходимо расход воздуха, засасываемого через кольцевой зазор в камеру смешения аэратора, компенсировать



Таблица РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ CALCULATION OF PARAMETERS OF A FINE SPRAY Table															
Исходные данные Initial data						Расчетные диаметры, мм Calculated diameters, mm									
давление, МПа pressure, MPa		расход consumption				сопла водяного штуцера, d_1 water connection nozzles, d_1		канала воздушного штуцера, d_2 air connection channel, d_2		камеры смешения, $d_{см}$ mixing chambers, $d_{см}$		среднего кольцевого зазора, d_c average annular gap, d_c		выходного сопла, d_3 outlet nozzle, d_3	
воды, p_1 water	воздуха, p_2 air	воды, G_1 , л/с water, G_1 , l/s		воздуха, G_2 , кг/с air, G_2 , kg/s		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
		min	max	min	max										
0,25	0,20	0,001	0,01	0,0009	0,009	1,41	4,47	1,29	4,08	6,35	20,08	0,83	8,32	2,05	4,70
0,30	0,25	0,001	0,01	0,0007	0,007	1,35	4,27	1,36	4,32	5,17	16,36	0,93	9,31	1,93	4,20
0,35	0,30	0,001	0,01	0,0005	0,005	1,30	4,11	1,41	4,47	4,40	13,91	1,00	9,98	1,82	3,64

воздухом, поступающим из атмосферы в воздушную камеру дождевателя. Это обеспечивается равенством сечений кольцевого зазора на входе в камеру смешения дождевателя и отверстия воздушного штуцера на входе в воздушную камеру дождевателя. Тогда можно определить диаметр отверстия воздушного штуцера:

$$d_2 = \sqrt{\frac{G_2}{\pi \mu p_2}} \sqrt{\frac{RT_2}{0,469}} \quad (3)$$

где d_2 – диаметр отверстия воздушного штуцера, м.

Выражение для диаметра d_3 получим на основании современных теоретических представлений о работе водовоздушных эжекторов [19]:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4G_1(1+u)}{\pi \mu \sqrt{2p_3}}} \quad (4)$$

где d_3 – диаметр выпускного сопла, м;

u – коэффициент эжекции;

p_3 – давление водовоздушной смеси, Па;

μ – коэффициент расхода водовоздушной смеси.

Длина l камеры смешения должна быть достаточной для завершения процесса. Ее оптимальное значение при круглой форме отверстий водяного штуцера и выходного сопла азуратора определено с учетом результатов предыдущих исследований:

$$l = 15d_1 \left(\frac{d_3}{d_1} - 1 \right) \quad (5)$$

Алгоритм расчета параметров распыливающего устройства дождевателя выполнен и работает в табличном процессоре (EXCEL или WPS) с использованием выражений (1)-(5). Исходными данными стали давление воды p_1 и воздуха p_2 на входе дождевателя, необходимый расход воды G_1 и коэффициент эжекции u . В расчетах учитываются коэффициенты расхода μ_1 воды и μ_2 воздуха, газовая постоянная R и температура воздуха T . Результаты расчетов в EXCEL выдаются в виде таблиц (таблица).

Обоснованы минимальные и максимальные расчетные параметры геометрии конструктивного решения устройства для распыления жидкой фазы: сопла водяного штуцера, канала воздушного штуцера, камеры смешения, среднего кольцевого зазора, выходного сопла при рабочих давлениях воды 0,20; 0,25; 0,30 и 0,35 МПа; воздуха 0,25 и 0,30 МПа при условии расхода воды от 0,002 до 0,010 л/с и воздуха от 0,0005 до 0,0090 кг/с. Получены статистические наработки связи технологических условий работы пневмогидравлического дождевателя с целесообразной необходимостью регулирования его технических характеристик. Для визуальной наглядности интерпретации табличных данных по результатам расчетов построены графики (рис. 2). Согласно построенному графику, с увеличением расхода воды от 0,002 до 0,010 л/с и коэффициента эжекции от 0,5 до 0,9 наблюдается линейное расширение среднего диаметра кольцевого зазора от 2 до 15 мм. Диаметр камеры смешения распылителя увеличивается по нелинейной зависимости с 5 до 20 мм с ростом расхода воды от 0,002 до 0,010 л/с (рис. 3). При этом повышение давления воды с 0,25 до 0,35 МПа и, соответственно, давления воздуха с 0,20 до 0,30 МПа (таблица) позволяет существенно уменьшить диаметр камеры смешения.

Прикладное математическое моделирование процесса пневмогидравлического распыления с принудительной подачей воздуха дало возможность получить величины параметров для разработки макетных и экспериментальных образцов. Они значительно меньше, чем при работе в режиме эжекции воздуха: выходного сопла и среднего кольцевого зазора – на 16%, канала воздушного штуцера на – 23%, а диаметра камеры смешения – на 50% и более.

Таким образом, разработанная на основании теоретических исследований методика позволяет рассчитывать конструктивные и геометрические параметры устройства получения искусственного дождя регулируемой дисперсности для повышения эффек-

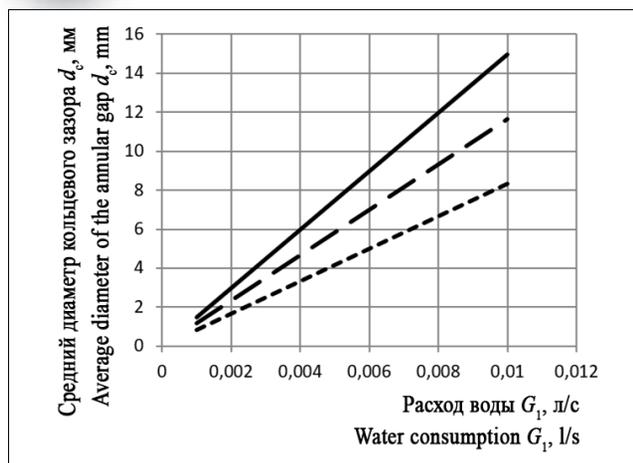


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра кольцевого зазора от расхода воды с эжекцией воздуха при коэффициенте эжекции: — — 0,9; - - - - 0,7; - · - · - 0,5

Fig. 2. The dependence of the annular gap average diameter on the water flow rate with air ejection with an ejection coefficient: — — 0,9; - - - - 0,7; - · - · - 0,5

тивности полива сельскохозяйственных культур, совмещая подкормку или химзащиту растений при искусственном дождевании по различным технологиям их выращивания путем создания необходимых условий образования водо-воздушной струи.

Выводы. Разработали пневмогидравлическое устройство распыления жидкости для орошения, питания и защиты сельскохозяйственных растений с учетом принципов водо- и энергосбережения, основанных на предварительном газонасыщении распыливаемой воды и использовании в конструкции аэрационного узла кавитационного эффекта при эжекции и подаче воздуха под давлением. Показали влияние давления воздушной фазы в диапазоне рабочих вели-

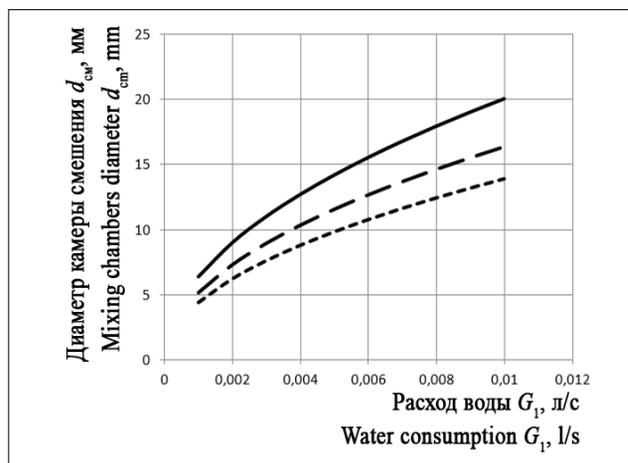


Рис. 3. Зависимость диаметра камеры смешения распылителя от расхода воды при подаче воздуха под давлением 0,2–0,3 МПа и давлении воды: — — 0,25 МПа, - - - - 0,30 МПа, - · - · - 0,35 МПа

Fig. 3. The dependence of the sprayer mixing chamber diameter on the water flow when air is supplied under pressure (from 0.2 to 0.30 MPa) and water pressure p_1 : — — 0.25 MPa, - - - - 0.30 MPa, - · - · - 0.35 MPa

чин функционирования дождевателя на его технические характеристики. При этом уменьшаются диаметры выходного сопла и среднего кольцевого зазора – на 16%, канала воздушного штуцера – на 23%, а диаметра камеры смешения – на 50% и более.

Использование полученных расчетных данных для оптимизации технологических параметров и конструктивных решений ускорит изготовление макетных и модельных образцов устройства распыления жидкости и его экспериментальную апробацию для генерации капель искусственного дождя различной дисперсности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lamm F.R., Ayars J.E., Nakayama F.S. Developments in Agricultural Engineering: Microirrigation for Crop Production Design, Operation, and Management. *Developments in Agricultural Engineering*. 2007. N13. 619.
2. Хажметов Л.М., Езаов А.К., Сасиков А.С. Технологии и техника мелкодисперсного дождевания // *Символ науки*. 2016. N4. С. 134–136.
3. De Wrachien D., Lorenzini G., Medici M. Sprinkler irrigation systems: State-of-the-art of kinematic analysis and quantum mechanics applied to water jets. *Irrigation and Drainage*. 2013. N62(4). 407–413.
4. Do Prado G., Colombo A., De Oliveira H.F.E., Faria L.C. Water application uniformity of self-propelled irrigation equipment with sprinklers presenting triangular, elliptical and rectangular radial water distribution profiles. *Engenharia Agricola*. 2012. N32(3). 522–529.
5. Брыль С.В., Зверьков М.С. Теоретические подходы к рас-
- чету вертикального эффективного давления удара капель искусственного дождя о почву и твердую поверхность // *Экология и строительство*. 2016. N1. С. 16–20.
6. Шепелев А.Е. Исследования характеристик искусственного дождя широкозахватной многоопорной дождевальной техники // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2017. N4(68). С. 36–42.
7. Ольгаренко Г.В. Основные направления разработки отечественных технических средств микроорошения для мелкоконтурных участков // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. N5. С. 82–85.
8. Ольгаренко Г.В. Стратегия научно-технической деятельности по разработке новой техники орошения при реализации программы развития мелиорации // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2011. N2. С. 5–8.
9. Bambang Aris Sistanto. The Study of Placement Pattern Micro Sprinkler Depends on Hanging Micro Sprinkler Irrigation

Against the Value of Irrigation Efficiency. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2014. Vol. 4. N5. 24-30.

10. Dipak S. Khatawkar, Ganesh S. Ghante, Umesh V. Patil. Performance evaluation of micro-sprinklers system under varying spacing and operating pressure. An International Refereed, Peer Reviewed & Indexed Quarterly Journal in Science, Agriculture & Engineering. 2019. Vol. VIII. Iss. XXVIII. 157-162.

11. Доценко С.Г., Кузнецова Е.И., Максаев Д.И. Эффективность мелкодисперсного дождевания в регулировании микро- и фитоклимата полевых культур и биологической активности почвы. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*, 2014. N2(14). С. 200-205.

12. Tavakoli A.A., Ganjali H.R., Mobasser, H.R., Mehraban A., Afsharmanesh G.R. Efficiency consumption of water in intercropping zea mays corn and vigna sinesis under different regimes irrigation jiroft region in years 2016 and 2017. *Annals of Biology*. 2020. N36(3). 393-399.

13. Do Prado G., Colombo A., Barreto E.A.C. Distortion of water distribution applied by traveling gun irrigation system under windy conditions [Distorção da distribuição de água aplicada por sistemas autopropelidos de irrigação em condições de

vento]. *Irriga*. 2014. N19(3). 358-374.

14. Савушкин С.С., Терпигорев А.А., Гжибовский С.А. Исследование системы мелкодисперсного дождевания. *МуВХ*. 2010. N6. С. 17-18.

15. Гегузин Я.Е. Пузыри. М.: Наука. 1985. 176 с.

16. Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Шрагер Э.Р. Распыление жидкости при импульсном воздействии сжатых воздухом // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322. N2. С. 167-171.

17. Горобей В.П., Москалевич В.Ю. Моделирование пневмогидравлического распыления жидкости для орошения и фертигации // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. N2. С. 26-34.

18. Трубицын А.А., Христофоров А.А., Малахов А.А., Ребятников А.О. Распыливание жидкости форсунками // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2014. N1. С. 58-66.

19. Снопич Ю.Ф. Совершенствование технических средств орошения дождеванием. Новочеркасск: Геликон. 2007. 110 с.

20. Nagedifar S.M., Ziaei A.N., Ansari H. Numerical analysis and optimization of triggered furrow irrigation system. *Irrigation Science*. 2020. N38(3). 287-306.

REFERENCES:

1. Lamm F.R., Ayars J.E., Nakayama F.S. Developments in Agricultural Engineering: Microirrigation for Crop Production Design, Operation, and Management. *Developments in Agricultural Engineering*. 13. 2007. 619 (In English).

2. Khazhmetov L.M., Ezaov A.K., Sasikov A.S. Tekhnologii i tekhnika melkodispersnogo dozhdevaniya [Technologies and techniques of fine sprinkling] *Simvol nauki*. 2016. N4. 134-136 (In Russian).

3. De Wrachien D., Lorenzini G., Medici M. Sprinkler irrigation systems: State-of-the-art of kinematic analysis and quantum mechanics applied to water jets. *Irrigation and Drainage*. 2013. 62(4). 407-413 (In English).

4. Do Prado G., Colombo A., De Oliveira H.F.E., Faria L.C. Water application uniformity of self-propelled irrigation equipment with sprinklers presenting triangular, elliptical and rectangular radial water distribution profiles. *Engenharia Agricola*. 2012. 32(3). 522-529 (In English).

5. Bryl' S.V., Zver'kov M.S. Teoreticheskie podkhody k raschetu vertikal'nogo effektivnogo davleniya udara kapel' iskusstvennogo dozhdy o pochvu i tverduyu poverkhnost' [Theoretical approaches to calculating the vertical effective pressure of impact of artificial rain drops on the soil and hard surface]. *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2016. N1. 16-20 (In Russian).

6. Shepelev A.E. Issledovaniya kharakteristik iskusstvennogo dozhdy shirokozakhatnoy mnogoopornoy dozhdeval'noy tekhniki [Studies of the characteristics of artificial rain of wide-coverage multi-support sprinkler equipment]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2017. N4(68). 36-42 (In Russian).

7. Ol'garenko G.V. Osnovnye napravleniya razrabotki otechestvennykh tekhnicheskikh sredstv mikroorosheniya dlya melkokon-

turnykh uchastkov [The main directions of the development of domestic technical means of microirrigation for small contour areas]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2016. Vol. 30. N5. 82-85 (In Russian).

8. Ol'garenko G.V. Strategiya nauchno-tekhnicheskoy deyatelnosti po razrabotke novoy tekhniki orosheniya pri realizatsii programmy razvitiya melioratsii [Strategy of scientific and technical activities for the development of new irrigation techniques in the implementation of the melioration development program]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*. 2011. N2. 5-8 (In Russian).

9. Bambang Aris Sistanto The Study of Placement Pattern Micro Sprinkler Depends on Hanging Micro Sprinkler Irrigation Against the Value of Irrigation Efficiency. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. Vol. 4. 2014. N5. 24-30 (In English).

10. Dipak S. Khatawkar, Ganesh S. Ghante, Umesh V. Patil. Performance evaluation of micro-sprinklers system under varying spacing and operating pressure. *An International Refereed, Peer Reviewed & Indexed Quarterly Journal in Science, Agriculture & Engineering*. Vol. VIII, Iss. XXVIII. Jan. 2019. 157-162 (In English).

11. Dotsenko S.G., Kuznetsova E.I., Maksaev D.I. Effektivnost' melkodispersnogo dozhdevaniya v regulirovanii mikro- i fitoklimata polevykh kul'tur i biologicheskoy aktivnosti pochvy [Efficiency of fine sprinkling in regulation of micro- and phytoclimate of field crops and soil biological activity]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*. 2014. N2(14). 200-205 (In Russian).

12. Tavakoli A.A., Ganjali H.R., Mobasser H.R., Mehraban A., Afsharmanesh G.R. Efficiency consumption of water in inter-

cropping ze mays corn and vigna sinesis under different regimes irrigation jiroft region in years 2016 and 2017. *Annals of Biology*. 2020. N36(3), 393-399 (In English).

13. Do Prado G., Colombo A., Barreto E.A.C. Distortion of water distribution applied by traveling gun irrigation system under windy conditions [Distorção da distribuição de água aplicada por sistemas autopropelidos de irrigação em condições de vento]. *Irriga*. 2014. 19(3). 358-374 (In Spanish).

14. Savushkin S.S., Terpigorev A.A., Gzhibovskiy S.A. Issledovanie sistemy melkodispersnogo dozhdevaniya [Study of the system of fine sprinkling]. *MiVKH*. 2010. N6. 17-18 (In Russian).

15. Geguzin Ya.E. Puzyri. Moscow: Nauka. 1985. 176 (In Russian).

16. Korovina N.V., Kudryashova O.B., Vorozhtsov B.I., Shrag'er E.R. Raspylenie zhidkosti pri impul'snom vozdeystvii szhatym vozdukhom [Liquid atomization under pulsed exposure to compressed air]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. Vol. 322. N2. 167-171 (In Russian).

17. Gorobey V.P., Moskalevich V.Yu. Modelirovanie pnevmogidravlicheskogo raspyleniya zhidkosti dlya orosheniya i fertigatsii [Modeling of pneumohydraulic liquid spraying for irrigation and fertigation]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. N2. 26-34 (In Russian).

18. Trubitsyn A.A., Khristoforov A.A., Malakhov A.A., Rebyatnikov A.O. Raspylivanie zhidkosti forsunkami [Liquid atomization by injectors]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2014. N1. 58-66 (In Russian).

19. Snipich Yu.F. Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv orosheniya dozhdevaniem [Improvement of technical means of irrigation by sprinkling]. Novocherkassk: Gelikon. 2007. 110 (In Russian).

20. Naghedifar S.M., Ziaei A.N., Ansari H. Numerical analysis and optimization of triggered furrow irrigation system. *Irrigation Science*. 2020. N38(3). 287-306 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 15.12.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 15.12.2020

Статья принята к публикации 16.02.2021
The paper was accepted
for publication on 16.02.2021