

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.347.3-025.13:532.5
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-2-230-237>

Поступила в редакцию 29.07.2018
Received 29.07.2018

А. Н. Басаревский, А. М. Кравцов, Д. С. Шахрай

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

**КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ПОДОБИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДИАМЕТРА КАПЕЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ**

Аннотация: Разработка и внедрение в практику орошаемого земледелия водосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности использования поливной воды, является одной из приоритетных задач при достижении гарантированных и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур. Изучение параметров искусственного дождя – один из ключевых моментов при проектировании дождевальной оросительной техники. Исследование процесса дождеобразования необходимо для того, чтобы избежать негативного влияния на почвенный покров и растительность, а также повысить эффективность искусственного полива, снизив при этом его энергоёмкость. При этом одной из ключевых характеристик является диаметр капель, создаваемых дождеобразующими устройствами, который напрямую влияет на другие основные характеристики искусственного дождя и зависит от физико-механических свойств воды, параметров потока рабочей жидкости и геометрических параметров дождеобразующих устройств. На основании проведенных теоретических исследований получено критериальное уравнение подобия, позволяющее рассчитать диаметр капель, используя параметры, характеризующие процесс образования искусственного дождя, для прогнозирования размера капель при проектировании дождевальной техники. Определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на диаметр капель. Установлено, что в соответствии с полученным критериальным уравнением процесс образования капель искусственного дождя можно характеризовать геометрическим критерием подобия, а также числами Онезорге и Фруда. Расчеты по предложенным формулам хорошо соотносятся с результатами экспериментов, проведенных другими авторами по данной тематике. Проведенные исследования позволяют в дальнейшем значительно повысить точность определения диаметра капель для различных типов дождевальных насадок, подбирать их конструктивные параметры и параметры потока рабочей жидкости для заданных условий.

Ключевые слова: орошение, искусственный полив, дождевание, оросительная техника, дождевальная насадка, диаметр капель, критериальное уравнение, критерии подобия, теорема подобия

Для цитирования: Басаревский, А. Н. Критериальное уравнение подобия для определения диаметра капель искусственного дождя / А. Н. Басаревский, А. М. Кравцов, Д. С. Шахрай // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. навук. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 230–237. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-2-230-237>

A. N. Basarevsky, A. M. Kravtsov, D. S. Shakhrai

The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

CRITERION SIMILARITY EQUATION FOR DETERMINING THE DROPS DIAMETER OF ARTIFICIAL RAIN

Abstract: Development and implementation of water-saving technologies into irrigation agriculture aimed at increasing the efficiency of irrigation water use, is one of the priorities for achieving guaranteed and stable yields of agricultural crops. Study of parameters of artificial rain is one of the key moments in design of irrigation equipment. Research of the rain formation process is necessary in order to avoid negative effect on soil cover and vegetation, and also to increase efficiency of artificial irrigation, also reducing the power consumption. At the same time, one of the key characteristics is the diameter of drops created by rain-forming devices, which directly affects the other main characteristics of artificial rain and depends on the physical and mechanical properties of water, parameters of working fluid flow and geometric parameters of rain-forming devices. Based on the theoretical studies, a criterion similarity equation was obtained, allowing to calculate the drop diameter using parameters characterizing the process of artificial rain formation, to predict the size of drops when designing sprinkling equipment. The parameters having greatest effect on drop diameter are determined. It was revealed that,

in accordance with the criterion equation obtained, the process of formation of artificial rain drops can be characterized by a geometric similarity criterion, as well as by Ohnezorge and Froude number. Calculations on the proposed formulas are well correlated with the results of other authors' experiments. The studies conducted further allow to significantly improve the accuracy of determining the diameter of drops for various types of sprinkling nozzles, match design parameters and operating fluid flow parameters for the specified conditions.

Keywords: irrigation, artificial irrigation, water-saving technologies, sprinkling, irrigation equipment, sprinkling nozzle, drop diameter, criterial equation, similarity criteria, similarity theorem

For citation: Basareusky A.N., Kravtsov A.M., Shakhrai D.S. Criterion similarity equation for determining the drops diameter of artificial rain. *Vesti Natsyonal'nay akademii nauk Belarusi. Seryya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2019, vol. 57, no 2, pp. 230–237 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-2-230-237>

Введение. При оценке работы дождевальной техники одним из ключевых моментов, определяющих качество полива, является оценка характеристик искусственного дождя [1–5]. Определение интенсивности и слоя осадков, а также коэффициента равномерности полива являются обязательными при проведении испытаний дождевальной техники¹. Указанные характеристики во многом зависят от диаметра капель искусственного дождя, создаваемых дождевальными аппаратами. Спектр размеров капель довольно широкий и характеризовать его можно как средним медианным диаметром капель, так и объемным распределением капель определенного диаметра в дождевом облаке [1, 3, 6–10].

В общем случае, зная средний медианный диаметр, можно предположить, что значения остальных диаметров капель подчиняются закону нормального распределения. При этом стоит учитывать, что капли разного диаметра, согласно баллистической теории, улетают на разное расстояние: капли большего диаметра – дальше, капли меньшего – ближе [11–14]. Если при этом учитывать еще и изменение формы капель в процессе полёта [15] и, соответственно, изменение коэффициента аэродинамического сопротивления [16], получается сложная система с большим количеством связанных между собой величин.

Таким образом, учитывая вышеизложенные факторы и опираясь на исследования отечественных и зарубежных ученых, становится очевидным, что основные характеристики искусственного дождя не распределяются равномерно по рабочей длине (дальности или радиусу полива) дождевального аппарата, и повышение равномерности полива является одной из важных задач при проектировании оросительной техники. При этом необходимо глубокое изучение механизмов образования капель, геометрии дождеобразующих устройств (насадок) – основных рабочих органов дождевальных аппаратов, процесса разрушения струй и плёнок жидкости, полёта капель и удара о почву и растения.

Стоит учитывать тот факт, что образование капель довольно энергозатратный процесс и снижение энергоёмкости также является перспективным направлением исследований². Для этого стоит обратить внимание на новые виды дождеобразующих устройств [17], разработка и исследование которых проводится в Белорусском государственном аграрном техническом университете на кафедре моделирования и проектирования, а также в лаборатории кафедры энергетики.

Цель работы – вывод критериального уравнения подобия, позволяющего рассчитать диаметр капель, используя параметры, характеризующие процесс образования искусственного дождя, для прогнозирования размера капель при проектировании дождевальной техники.

Методика выполнения работ. Диаметр капель искусственного дождя зависит от ряда факторов, основными из которых являются следующие: физико-механические свойства жидкости (воды); геометрические параметры дождеобразующих устройств; параметры потока рабочей жидкости.

Выбрав наиболее значимые факторы при анализе источников [1, 3, 8, 18, 19], представим в виде функциональной зависимости взаимосвязь параметров, характеризующих процесс образования искусственного дождя:

¹ Машины и установки дождевальные. Программа и методы испытаний : РД 10.11.1–89. – Взамен ОСТ 70.11.1–74 ; введ. 01.05.89. – М. : Госагропром СССР, 1988. – 172 с.; Оборудование сельскохозяйственное оросительное. Аппараты дождевальные. Ч. 3. Характеристика распределения и методы испытаний : ГОСТ ISO 15886–3–2017. – Взамен ГОСТ ИСО 7749–2–2004 ; введ. 01.07.18. – Минск : Госстандарт, 2017. – 17 с.

² Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения : справочник / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации. – М. : Росинформагротех, 2015. – 264 с.

$$f(d_k; v; d_0; L; \rho_B; \eta_B; \sigma). \quad (1)$$

Здесь d_k – диаметр капли, м; v – скорость истечения воды из сопла, м/с; d_0 – диаметр сопла, м; L – характеристический размер, м; ρ_B – плотность воды, кг/м³; η_B – динамическая вязкость воды, Па·с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Скорость истечения воды из сопла v и диаметр сопла d_0 являются связанными величинами через скоростной напор струи рабочей жидкости H_v , который можно определить по формуле

$$H_v = \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2)$$

или, учитывая, что скорость v определяется соотношением расхода рабочей жидкости к площади сопла, по выражению

$$H_v = \frac{\alpha Q^2}{2gS^2}, \quad (3)$$

где α – коэффициент Кориолиса (если профиль скорости является равномерным, $\alpha = 1$).

Выразив площадь сопла через диаметр d_0 и проведя преобразования, получим такую формулу:

$$H_v = \frac{8\alpha Q^2}{g\pi^2 d_0^4}. \quad (4)$$

Таким образом, учитывая взаимосвязь скорости истечения и диаметра сопла, заменим в функциональной зависимости (1) эти величины скоростным напором, в результате получим

$$f(d_k; H_v; L; \rho_B; \eta_B; \sigma) = 0. \quad (5)$$

Найдем основные критерии подобия, характеризующие процесс образования капель искусственного дождя. Для этого применим метод анализа размерностей [20, 21]. Выберем три независимых параметра применительно к системе измерений LMT: L , σ , ρ_B . Далее составим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{независимые переменные:} \\ [L] = L^1 M^0 T^0 \\ [\sigma] = L^0 M^1 T^{-2} \\ [\rho_B] = L^{-3} M^1 T^0 \\ \text{остальные:} \\ [d_k] = L^1 M^0 T^0 \\ [H_v] = L^1 M^0 T^0 \\ [\eta_B] = L^{-1} M^1 T^{-1} \end{array} \right. \quad (6)$$

Пользуясь рекомендациями [20], проверим правильность выбранного числа независимых переменных, составив следующий определитель:

$$D_{1-3} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \\ -3 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2.$$

Так как $D_{1-3} \neq 0$ – количество независимых переменных выбрано правильно, следовательно, L , σ , ρ_B действительно независимы.

Найдем при трех независимых переменных ($k = 3$) и общем количестве параметров, равном $m = 6$, три ($m - k = 3$) критерия подобия, характеризующих процесс образования искусственного дождя:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{[d_k]}{[L]^{\alpha_{d_k}} [\sigma]^{\beta_{d_k}} [\rho_B]^{\gamma_{d_k}}}, \\ \pi_2 &= \frac{[H_v]}{[L]^{\alpha_{H_v}} [\sigma]^{\beta_{H_v}} [\rho_B]^{\gamma_{H_v}}}, \\ \pi_3 &= \frac{[\eta_B]}{[L]^{\alpha_{\eta_B}} [\sigma]^{\beta_{\eta_B}} [\rho_B]^{\gamma_{\eta_B}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения показателей степеней α , β , γ выразим все величины, входящие в критерии подобия, через основные единицы измерения:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L^1}{L^{\alpha_{d_k}} L^{\beta_{d_k}} T^{\gamma_{d_k}} M^{\delta_{d_k}} T^{\gamma_{d_k}}}, \\ \pi_2 &= \frac{L^{-3} M^1}{L^{\alpha_{H_v}} L^{\beta_{H_v}} T^{\gamma_{H_v}} M^{\delta_{H_v}} T^{\gamma_{H_v}}}, \\ \pi_3 &= \frac{L^{-1} M^1 T^{-1}}{L^{\alpha_{\eta_b}} L^{\beta_{\eta_b}} T^{\gamma_{\eta_b}} M^{\delta_{\eta_b}} T^{\gamma_{\eta_b}}}, \end{aligned} \quad (8)$$

откуда, приравнявая показатели степени одноименных основных величин, стоящих в числителе и знаменателе, получим для каждого следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \pi_1: \gamma_{d_k} &= 0; \beta_{d_k} = 0; \alpha_{d_k} = 1, \\ \pi_2: \gamma_{H_v} &= 0; \beta_{H_v} = 0; \alpha_{H_v} = 1, \\ \pi_3: \gamma_{\eta_b} &= 1/2; \beta_{\eta_b} = 1/2; \alpha_{\eta_b} = 1/2. \end{aligned}$$

Подставляя полученные показатели степени в первоначальные уравнения, получим такие критерии подобия:

$$\pi_1 = \frac{H_v}{L}, \quad (9)$$

$$\pi_2 = \frac{d_k}{L}, \quad (10)$$

$$\pi_3 = \frac{\eta_b}{\sqrt{L \sigma \rho_b}}. \quad (11)$$

Уравнение для критерия подобия (11) является числом Онезорге [22], которое аналогично числу Лапласа характеризует отношение вязкостных сил к силам поверхностного натяжения:

$$Oh = \frac{\eta_b}{\sqrt{L \sigma \rho_b}} = \frac{1}{\sqrt{La}}. \quad (12)$$

В работе [23] отмечается преимущество применения данного критерия подобия ввиду его независимости от относительной скорости обтекания капель во время полёта, а также описывается применение числа Онезорге для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления жидких капель в газовом потоке.

Подставим значение скоростного напора (4) в полученную формулу критерия подобия π_1 (9):

$$\pi_1 = \frac{\alpha v^2}{2gL} = \frac{\alpha}{2} Fr, \quad (13)$$

где Fr – число Фруда [3], характеризующее соотношение между силой инерции и внешней силой, в поле которой происходит движение капли (в нашем случае сила тяжести).

Таким образом, процесс образования капель искусственного дождя можно характеризовать геометрическим критерием подобия π_2 , а также числами Онезорге и Фруда.

Используя вторую теорему подобия [20] (так называемую π -теорему), составим критериальное уравнение для определения диаметра капель, связывающее безразмерные величины, полученные из участвующих в процессе параметров:

$$d_k = f(H_v; L; \rho_b; \eta_b; \sigma). \quad (14)$$

Искомую величину диаметра капель (d_k) можно представить в виде степенного выражения:

$$d_k = H_v^{x_1} L^{x_2} \rho_b^{x_3} \eta_b^{x_4} \sigma^{x_5}. \quad (15)$$

Используя размерности для каждого параметра, запишем следующую систему уравнений, суммируя показатели степеней при одинаковых единицах измерения (для удобства вычислений единицы измерения динамической вязкости представим в виде кг/м·с, а коэффициента поверхностного натяжения – в виде кг/с²):

$$\begin{cases} [M]: 1 = x_1 + x_2 - 3x_3 - x_4, \\ [c]: 0 = -x_4 - 2x_5, \\ [кг]: 0 = x_3 + x_4 + x_5. \end{cases} \quad (16)$$

Решая систему уравнений, получим следующие значения степеней:

$$\begin{aligned} x_2 &= 1 - x_1 + x_5, \\ x_4 &= -2x_5, \\ x_3 &= x_5. \end{aligned}$$

Подставив их в исходное выражение, получим критериальное уравнение подобия:

$$d_k = \left(\frac{H_v}{L} \right)^{x_1} \left(\frac{\sigma p_b L}{\eta_b^2} \right)^{x_5} L \quad (17)$$

или, учитывая ранее найденные критерии подобия, формулы (9)–(13):

$$d_k = \left(\frac{\alpha}{2} Fr \right)^{x_1} \left(\frac{1}{Oh^2} \right)^{x_5} L. \quad (18)$$

Коэффициенты x_1 , x_2 определяются на основании эксперимента и будут зависеть от вида насадок, коэффициента аэродинамического сопротивления, угла вылета, скорости ветра и дополнительных менее значимых факторов (формы дефлектора, типа отверстия и т.д.).

Для исследования выражения (18) можно использовать проведенные ранее эксперименты, данные о которых опубликованы в научных журналах [6–8, 11, 12], предварительно выделив в критериальном уравнении подобия постоянные величины.

Результаты и их обсуждение. При исследовании диаметров капель с помощью полученной формулы в качестве характеристического размера L можно принимать расстояние от насадки до капли либо диаметр сопла. Таким образом можно получить распределение капель того или иного диаметра относительно дождевального аппарата. Помимо этого в работах [3, с. 63–65; 24, с. 48–49] рекомендуется в качестве критерия крупности капель принимать соотношение H_0/d_0 , (где H_0 – напор воды, при выборе соответствующей точки отсчета $H_0 = H_v$). Значения H_0/d_0 для орошения трав на лугах и пастбищах – 1500–1600, для полива взрослых сельскохозяйственных культур – 1700–1800, для полива нежных растений и рассады – 2400–2600 [24].

Для проверки работы предложенной формулы используем экспериментальные данные для дефлекторной дождевальной насадки Nelson Spray I, представленные в работе [8], где измерялись диаметры капель для различных диаметров сопел при рабочем давлении P , равном 69 и 206 кПа (табл. 1).

Таблица 1. Прогнозирование диаметра капель при проектировании дождевальной техники. Результаты экспериментальных [8] и теоретических исследований

Table 1. Prediction of drops diameter when designing sprinkler equipment. Results of experimental [8] and theoretical studies

Экспериментальные данные			Расчётные значения			Разница, мм
диаметр сопла, d_0 , мм	рабочее давление, кПа	измеренный диаметр капель, d_k , мм	число Онезорге, O_n	число Фруда, Fr	вычисленный диаметр капель, $d_{к. выч.}$, мм	
2,98	69	0,70	0,0022	4178	0,58	0,12
4,57	69	0,94	0,0018	2725	0,82	0,12
6,12	69	1,08	0,0015	2034	1,02	0,06
9,06	69	1,63	0,0013	1374	1,28	0,35
3,07	206	0,68	0,0022	12108	0,75	–0,07
4,61	206	0,86	0,0018	8063	1,02	–0,16
6,22	206	1,03	0,0015	5976	1,25	–0,22
9,15	206	1,31	0,0012	4063	1,52	–0,21

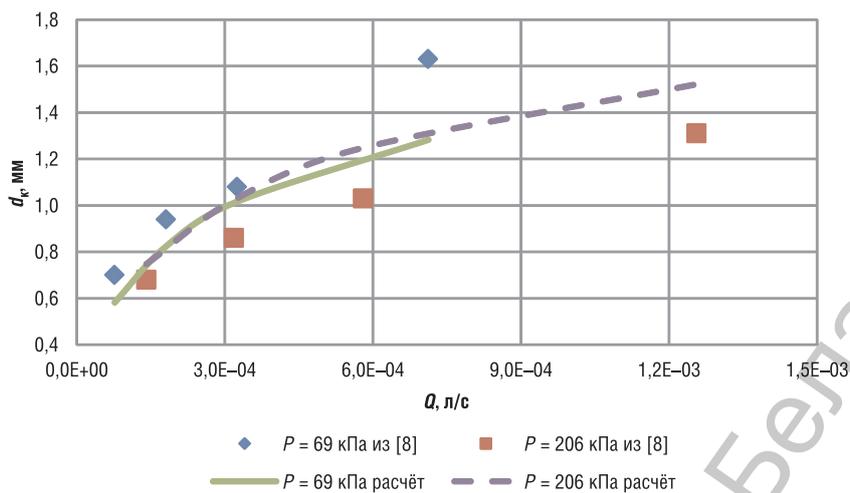


Рис. 1. Значения степенных коэффициентов для определения диаметра капель искусственного дождя. Результаты экспериментальных [8] и теоретических исследований

Fig. 1. Values of power coefficients for determining drops diameter of artificial rain. Results of experimental [8] and theoretical studies

В качестве характеристического размера примем диаметр сопла d_0 . Тогда, в соответствии с экспериментальными данными, степенные коэффициенты можно определить по следующим формулам:

$$x_1 = -8,8512d_0 + 0,2329, \quad (19)$$

$$x_5 = -0,9399d_0 + 0,3044, \quad (20)$$

Результаты вычислений, представленные в виде графиков (рис. 1), показали, что расчетные значения, полученные по формуле (18), достаточно хорошо соотносятся с результатами экспериментов [8]. Следовательно, применение данного подхода для определения диаметра капель искусственного дождя оправданно, при этом для каждого вида насадок (дефлекторные, щелевые, струйные и т.д.) необходимо подбирать степенные коэффициенты. Как видно на рис. 1, результаты вычислений для одного вида насадок (в данном случае дефлекторных) практически налагаются друг на друга, следовательно, имеет место повторяемость. Из этого вытекает направление дальнейших исследований – определение степенных коэффициентов для различных видов насадок на основе экспериментальных данных, которые в дальнейшем можно будет применять в критериальном уравнении (18). Это позволит со значительной точностью определять диаметр капель, подбирать конструктивные параметры насадок и параметры потока рабочей жидкости для заданных условий.

Выводы

1. Определено, что процесс образования капель искусственного дождя можно представить в виде взаимосвязи геометрического критерия подобия π_2 , а также чисел Онезорге (либо Лапласа) и Фруда, которые характеризуют: отношение вязкостных сил к силам поверхностного натяжения; соотношение между силой инерции и внешней силой, в поле которой происходит движение капли (в нашем случае – сила тяжести).

2. Используя вторую теорему подобия (так называемую π -теорему), составлено критериальное уравнение (18) для определения диаметра капель, связывающее безразмерные величины, полученные из участвующих в процессе образования искусственного дождя параметров. Проведено сравнение расчетных данных с данными экспериментов. При этом получены формулы для определения степенных коэффициентов (19) (20), которые можно применять при определении диаметров капель, образованных дефлекторными насадками.

В целом глубокое изучение механизмов образования капель искусственного дождя, а также влияния конструктивных параметров и параметров рабочего потока жидкости на диаметр капель в дальнейшем позволит повысить качество процесса орошения сельскохозяйственных культур. При этом, оценив влияние диаметра капель на другие характеристики искусственного дождя, можно добиться снижения энергоёмкости полива дождеванием.

Список использованных источников

1. Исаев, А. П. Гидравлика дождевальных машин / А. П. Исаев. – М. : Машиностроение, 1973. – 215 с.
2. Беляев, В. В. Дождевальные машины. Конструкции, расчет, эксплуатация и испытания / В. В. Беляев, Б. М. Лебедев. – М. : Машгиз, 1957. – 232 с.
3. Лебедев, Б. М. Дождевальные машины: теория и конструкции / Б. М. Лебедев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 246 с.
4. Губер, К. В. Дождевальные машины и их применение / К. В. Губер. – М. : Россельхозиздат, 1975. – 70 с.
5. Фокин, Б. П. Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин / Б. П. Фокин, А. К. Носов. – Ставрополь : [б. и.], 2011. – 80 с.
6. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler / C. Bautista-Capetillon [et al.] // Trans. of the ASABE. – 2009. – Vol. 52, N 5. – P. 1493–1504. <https://doi.org/10.13031/2013.29140>
7. DeBoer, D. W. Drop and energy characteristics of a rotating spray-plate sprinkler / D. W. DeBoer // J. of Irrigation a. Drainage Engineering. – 2002. – Vol. 128, N 3. – P. 137–146. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2002\)128:3\(137\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2002)128:3(137))
8. Kincaid, D. C. Drop size distributions for irrigation sprinklers / D. C. Kincaid, K. H. Solomon, J. C. Oliphant // Trans. of the ASAE. – 1996. – Vol. 39, N 3. – P. 839–845. <https://doi.org/10.13031/2013.27568>
9. Шахрай, Д. С. Анализ характеристик искусственного дождя при проектировании дождевальных машин / Д. С. Шахрай, А. Н. Басаревский // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017 г. / Белорус. гос. аграр.-техн. ун-т. – Минск, 2017. – С. 384–387.
10. Обумахов, Д. Л. Допустимые технологические параметры искусственного дождя при орошении дождеванием сельскохозяйственных угодий / Д. Л. Обумахов, В. Н. Шкура, А. А. Чураев // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 1 (21). – С. 60–74.
11. Li, J. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles / J. Li, H. Kawano, K. Yu // Trans. of the ASAE. – 1994. – Vol. 37, N 6. – P. 1871–1878. <https://doi.org/10.13031/2013.28278>
12. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory / S. Ouazaa [et al.] // Span. J. of Agr. Research. – 2014. – Vol. 12, N 3. – P. 850–863. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5507>
13. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler / G. Sánchez Burillo [et al.] // J. of Irrigation a. Drainage Engineering. – 2013. – Vol. 139, N 7. – P. 521–531. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000573](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000573)
14. Дашков, В. Н. Обоснование критериев эффективности применения искусственного дождевания / В. Н. Дашков, Н. Ф. Капустин, А. Н. Басаревский // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2006. – № 4. – С. 100–106.
15. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль ; пер. со 2-го нем. изд. Г. А. Вольперта. – М. : Изд-во иностр. лит., 1949. – 520 с.
16. Handbook of atomization and sprays: theory and applications / ed. N. Ashgriz. – New York : Springer, 2011. – 935 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4>
17. Кравцов, А. М. Дождевальная насадка с регулируемыми гидравлическими параметрами / А. М. Кравцов, Д. С. Шахрай, С. С. Попко // Агротрансформация. – 2017. – № 5. – С. 9–15.
18. Обоснование параметров искусственного дождя / Ю. А. Шекихачев [и др.] // Науч. журн. КубГАУ. – 2014. – № 99 (05). – С. 650–659.
19. Prandtl's essentials of fluid mechanics / ed. H. Oertel. – 2nd ed. – New York : Springer-Verlag, 2004. – 723 p. – (Applied Mathematical Sciences ; vol. 158). <https://doi.org/10.1007/b97538>
20. Кирпичев, М. В. Теория подобия / М. В. Кирпичев ; отв. ред. М. А. Михеев. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – 95 с.
21. Ногид, Л. М. Теория подобия и размерностей / Л. М. Ногид ; науч. ред. М. Ф. Федосов. – Л. : Судпромгиз, 1959. – 95 с.
22. Ohnesorge, W. von. Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen / W. von Ohnesorge // Ztschr. Angew. Mathematik u. Mechanik. – 1936. – Bd. 16, N. 6. – S. 355–358. <https://doi.org/10.1002/zamm.19360160611>
23. Рублев, В. Расчет траекторий движения капли жидкости в газовом потоке с учетом ее деформации / В. Рублев, В. Логинов // Системи обробки інформації. – 2007. – № 1 (59). – С. 128–129.
24. Многоопорные дождевальные машины / С. Х. Гусейн-заде [и др.]. – М. : Колос, 1984. – 191 с.

References

1. Isaev A. P. *Hydraulics of irrigation sprinklers*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 215 p. (in Russian).
2. Belyaev V. V., Lebedev B. M. *Irrigation sprinklers. Design, calculation, operation and testing*. Moscow, Mashgiz Publ., 1957. 232 p. (in Russian).
3. Lebedev B. M. *Irrigation sprinklers: theory and design*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 246 p. (in Russian).
4. Guber K. V. *Irrigation sprinklers and their use*. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1975. 70 p. (in Russian).
5. Fokin B. P., Nosov A. K. *Modern problems of the use of multitower sprinkling machines*. Stavropol, 2011. 80 p. (in Russian).
6. Bautista-Capetillo C. F., Salvador R., Burguete J., Montero J., Tarjuelo J. M., Zapata N., González J., Playán E. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler. *Transactions of the ASABE*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 1493–1504. <https://doi.org/10.13031/2013.29140>
7. DeBoer D. W. Drop and energy characteristics of a rotating spray-plate sprinkler. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, vol. 128, no. 3, pp. 137–146. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2002\)128:3\(137\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2002)128:3(137))
8. Kincaid D. C., Solomon K. H., Oliphant J. C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, 1996, vol. 39, no. 3, pp. 839–845. <https://doi.org/10.13031/2013.27568>

9. Shakhrai D. S., Basarevskii A. N. Analysis of artificial rain characteristics in the process of designing irrigation sprinklers. *Peredovye tekhnologii i tekhnicheskoe obespechenie sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 30–31 marta 2017 g.* [Advanced technologies and technical support for agricultural production: materials of the International scientific and practical conference, Minsk, March 30–31, 2017]. Minsk, 2017, pp. 384–387 (in Russian).
10. Obumakhov D. L., Shkura V. N., Churaev A. A. Allowable technological parameters of artificial rain at sprinkler irrigation of agricultural lands. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, 2016, no. 1 (21), pp. 60–74 (in Russian).
11. Li J., Kawano H., Yu K. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles. *Transactions of the ASAE*, 1994, vol. 37, no. 6, pp. 1871–1878. <https://doi.org/10.13031/2013.28278>
12. Ouazaa S., Burguete J., Paniagua M. P., Salvador R., Zapata N. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 850–863. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5507>
13. Sánchez Burillo G., Delirhasannia R., Playán E., Paniagua P., Latorre B., Burguete J. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, vol. 139, no. 7, pp. 521–531. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000573](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000573)
14. Dashkov V. N., Kapustin N. F., Basarevskii A. N. Substantiation of the efficiency criteria of application of artificial overhead irrigation. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2006, no. 4, pp. 100–106 (in Russian).
15. Prandtl L. *Führer durch die Strömungslehre*. 2 Aufl. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1944. 384 S. (Russ. ed.: Prandtl' L. *Gidraeromekhanika*. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoi literatury Publ., 1949. 520 p.).
16. N. Ashgriz (ed.). *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*. New York, Springer, 2011. 935 p. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4>
17. Kravtsov A. M., Shakhrai D. S., Popko S. S. Sprinkler nozzle with adjustable hydraulic parameters. *Agropanorama* [Agropanorama], 2017, no. 5, pp. 9–15 (in Russian).
18. Shekikhachev Yu. A., Shomakhov L. A., Pazova T. Kh., Balkarov R. A., Alov V. Z., Shekikhacheva L. Z., Medovnik A. N., Tverdokhlebov S. A. Substantiation of the parameters of artificial rain. *Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2014, no. 99 (05), pp. 650–659 (in Russian).
19. Oertel H. (ed.). Prandtl's essentials of fluid mechanics. 2nd ed. *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 158. New York, Springer-Verlag, 2004. 723 p. <https://doi.org/10.1007/b97538>
20. Kirpichev M. V., Mikheev M. A. (ed.). *Similarity theory*. Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1953. 95 p. (in Russian).
21. Nogid L. M., Fedosov M. F. (ed.). *Theory of similarity and dimension*. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1959. 95 p. (in Russian).
22. Ohnesorge W. von. Formation of drops by nozzles and the breakup of liquid jets. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1936, vol. 16, no. 6, pp. 355–358 (in German). <https://doi.org/10.1002/zamm.19360160611>
23. Rublev V., Loginov V. Calculation of motion trajectory of liquid drop in a gas stream taking into account its deformation. *Sistemi obrobki informatsii = Information Processing Systems*, 2007, no. 1 (59), pp. 128–129 (in Russian).
24. Gusein-zade S. Kh., Pereverzentsev L. A., Kovalenko V. I., Lutskii V. G. *Multiple sprinkler systems*. Moscow, Kolos Publ., 1984. 191 p. (in Russian).

Информация об авторах

Басаревский Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: al.nik.bas@mail.ru

Кравцов Александр Маратович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: arkravt@mail.ru

Шахрай Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры моделирования и проектирования, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dzmitry.shakhrai@mail.ru

Information about the authors

Basarevsky Alexander N. – Ph.D. (Engineering), Associate Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: al.nik.bas@mail.ru

Kravtsov Alexander M. – Ph.D. (Engineering), Associate Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: arkravt@mail.ru

Shakhrai Dmitry S. – The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: dzmitry.shakhrai@mail.ru