Аграрный научный журнал. 2022. № 7. С. 98–103. Agrarian Scientific Journal. 2022;(7):98–103.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья УДК 631.347 doi: 10.28983/asj.y2022i7pp98-103

Моделирование конструктивных параметров дождевателей широкозахватных дождевальных машин

Лариса Анатольевна Журавлева, Мурад Салмандибирович Магомедов ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

e-mail: dfz@yandex.ru

Аннотация. На сегодняшний день российскими и зарубежными учеными и инженерами накоплен значительный опыт проектирования дождевальных насадок различных типов, используемых как на широкозахватных дождевальных машинах, так и при проливе газонов, садов и клумб. В большинстве случаев в основу выбора конструктивно-технологических параметров легли экспериментальные исследования и полученные на их основе зависимости для конкретных условий эксплуатации, режимов работы и самих конструкций. Тем не менее, не сложилось обобщенной методики расчета, а следовательно, и четких рекомендаций по и их применимости в различных метеорологических условиях для различных по физико-механическому составу почвах. В статье смоделирован процесс взаимодействия потока воды с элементами дождевальной насадки. Полученные результаты использованы при конструировании дождевальных насадок с криволинейными дефлекторами.

Ключевые слова: дождевальные насадки; дефлектор; скорость; расход; давление.

Для цитирования: Журавлева Л. А., Магомедов М. С. Моделирование конструктивных параметров дождевателей широкозахватных дождевальных машин // Аграрный научный журнал. 2022. № 7. С. 98–103. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i7pp98-103.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Zhuravleva Larisa Anatolyevna, Magomedov Murad Salmandibirovich, Aldiab Anas, Heirbeik Bassel,

Modeling of design parameters of sprinklers of wide-span irrigation machines

Larisa A. Zhuravleva, Murad S. Magomedov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia dfz@yandex.ru

Abstract. To date, Russian and foreign scientists and engineers have accumulated considerable experience in designing sprinkler nozzles of various types used both on wide-reach sprinkler machines and when spilling lawns, gardens and flower beds. In most cases, the choice of design and technological parameters was based on experimental studies and the dependences obtained on their basis for specific operating conditions, operating modes and the structures themselves. Nevertheless, there was no generalized calculation methodology, and, consequently, clear recommendations on and their applicability in various meteorological conditions, for soils of different physical andmechanical composition. The article simulates the process of interaction of the water flow with the elements of the sprinkler nozzle. The results obtained were used in the design of sprinkler nozzles with curved deflectors.

Keywords: sprinkler nozzles; deflector, speed; flow rate; pressure.

For citation: Zhuravleva L. A., Magomedov M. S. Modeling of design parameters of sprinklers of wide-span irrigation machines // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Sci-entific Journal. 2022;(7): 98–103. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i7pp98-103.

Bsedenue. Основными требованиями к дождевальным насадкам независимо от места их установки, вида поливаемых культур и типа почв являются требования равномерности увлажнения поливной площади и снижение интенсивности водоподачи. Выполнение их определяется совершенством конструкции, правильным выбором конструктивного исполнения и режимом эксплуатации.

На сегодняшний день российскими и зарубежными учеными и инженерами накоплен значительный опыт проектирования дождевальных насадок различных типов. Общей проблемой является тот факт, что в большинстве исследований приводятся эмпирические данные для конкретных типов дождевальных насадок и условий проведения экспериментов [1- 5, 7, 8, 10-19].

Целью исследования является оптимизация конструктивных параметров дождевальных насадок и режимов их работы в зависимости от условий эксплуатации при помощи моделирования процесса взаимодействия потока воды с элементами дождевальной насадки.

Методика исследований. Рассматривая движение потока воды через дождевальную насадку, можно выделить три основных процесса [3]:

движение потока воды внутри корпуса и сопла дождевальной насадки;

соударение потока воды с дефлектором дождевальной насадки;

процесс распыливания, т.е. сход пленки, струй или одиночных капель воды с дефлектора дождевальной насадки.

В дальнейшем происходит соударение потока воды с дефлектором дождевальной насадки и дробление потока на пленку, струи и капли.

Сам механизм дробления потока зависит главным образом от формы и скорости струи воды, а также формы и параметров дефлектора дождевальной насадки.

Первоначально поток воды, обтекающий дефлектор дождевальной насадки, принимает форму пленки, которая сохраняет свою форму еще на некотором расстоянии от точки схода с поверхности дефлектора. В дальнейшем теряет устойчивость и распадается на отдельные струи и капли.



2022

Для упрощения считается, что поток воды движется по одной траектории, соединяющей центр живого сечения схода пленки и некую точку, определяющую максимальный радиус распыливания дождевальной насадкой [4].

В большинстве исследований, при исследовании взаимодействия между потоком воды и дефлектором сила трения не учитывалась [2, 4-6].

Рассмотрим установившееся обтекание осредненным турбулентным потоком воды криволинейного дефлектора дождевальной насадки с характерным углом β' (рис. 1).

Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1, 2–2, пренебрегая высотой z_0 по сравнению со скоростными напорами:

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f, \tag{1}$$

где V_1 , V_2 – средние скорости движения потоков воды в сечениях 1-1 площадью $\omega_1 = \pi r_1^2$ и 2-2 площадью $\omega_2 = \pi \delta (2r + \delta \cos\beta')$, соответственно; $\alpha_1, \alpha_2 - \kappa_0$ эффициенты Кориолиса; h_f – суммарные потери напора, определяемые работой сил трения на поверхности дефлектора и на поверхности раздела «вода – воздух»; δ – толщина пленки в сечении 2-2.

Суммарные потери напора [9]:

$$h_f = \zeta \frac{V_2^2}{2g}$$
, получим: $V_1 = kV_2$, (2)

где ζ – полный гидравлический коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора.

Поправочный коэффициент, учитывающий работу сил трения можно определить по формуле:

$$k = \sqrt{\frac{\alpha_2 + \zeta}{\alpha_1}},\tag{3}$$

Выразив уравнение (2) через расход Q и площади живых сечений ω, ω, можно записать уравнения в виде:

$$\boldsymbol{\omega}_{2} = k \boldsymbol{\omega}_{1}. \tag{4}$$

Подставим в (4) площади живых сечений ω₁, ω₂:

$$\delta^2 - \frac{2r}{\sin\alpha}\delta + k\frac{r_1^2}{\sin\alpha} = 0,$$
(5)



$$\delta = \frac{r}{\sin \alpha} \pm \sqrt{\frac{r^2}{\sin^2 \alpha} - k \frac{r_1^2}{\sin \alpha}} . \tag{6}$$

Знак в формуле (6) выбирается из следующих соображений: знак «-» принимается, если $\alpha > 0$ ($\beta' > \pi/2$), иначе толщина пленки будет соизмерима с г/sin α , что противоречит экспериментальным исследованиям.

Знак «+» принимается, если $\alpha < 0$ ($\beta' < \pi/2$).

Ограничимся рассмотрением первого случая.

ć

Толщина пленки потока воды, сходящего с дефлектора, увеличивается при возрастании коэффициента сопротивления ζ , а при $\alpha = 0^{\circ}$:

$$\delta = 0, 5k \frac{r_1^2}{r}.$$
 (7)

Рис. 1. Схема обтекания дефлектора

Формулу (6) можно привести к безразмерному виду:



99

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ







$$\frac{\delta}{r}\sin\alpha = 1 - \sqrt{1 - k\left(\frac{r_1}{r}\sqrt{\sin\alpha}\right)^2} . \tag{8}$$

Графическое представление зависимости (8) при различных значениях параметра k представлено на рис. 2.

Коэффициент *k* можно определить, если известны размеры дефлектора дождевальной насадки, угол схода пленки потока воды и толщина пленки α.

Если пренебречь скоростью ветра, радиус распыливания дождевальной насадки R' представим на рис. 3, поместив в начало координат в центр тяжести сечения 2-2 (см. рис. 1) и задав $z_{_{\rm H}}$ как расстояние от центра тяжести сечения 2-2 до поверхности земли (высота установки дефлектора).

Тогда высоту подъема струи воды над поверхностью земли можно выразить следующим образом:

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - k^2 \frac{g}{2V_1^2 \cos^2 \alpha} x^2.$$
 (9)

Скорость V_1 можно выразить как [13]:

$$V_1 = \mu \sqrt{2gH}, \qquad (10)$$

где µ – коэффициент скорости (расхода); *H* – напор перед дождевальной насадкой. Тогда уравнение траектории струи потока воды можно представить выражением

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{k^2}{4\mu^2 H \cos^2 \alpha} x^2.$$
⁽¹¹⁾

Потери энергии на преодоление сопротивления воздуха:

$$h_{f} \approx \lambda \frac{l}{4R_{2}} \frac{V_{2}^{2}}{2g} = \frac{\lambda}{k^{2}} \frac{x}{4R_{2}\cos\alpha} \frac{\mu^{2} 2gH}{2g} = \frac{\lambda \mu^{2}}{4k^{2}} \frac{Hx}{R_{2}\cos\alpha},$$
 (12)

где λ – коэффициент сопротивления; R₂ – гидравлический радиус сечения 2-2. Соответственно траекторию струи сходящего потока можно представить выражением:

$$z = x t g \alpha - \frac{k^2 x^2}{4\mu^2 H \left(1 - \frac{\lambda \mu^2}{4k^2 R_2 \cos \alpha} x\right) \cos^2 \alpha}.$$
(13)

Из выражения (13) можно выразить уравнение для определения радиуса *R*′ распыливания дождевальной насадки:



Рис. 3. Схема движения траектории струи при отсутствии ветра

$$-z_H = R' \mathbf{t} \mathbf{g} \boldsymbol{\alpha} - \frac{k^2 R'^2}{4\mu^2 H \left(1 - \frac{k^2}{4\mu^2} \frac{K}{H \cos \alpha} R'\right) \cos^2 \alpha}, \quad (14)$$

где

$$K = \frac{\lambda \mu^4}{k^4} \frac{H}{R_2}.$$
 (15)

Коэффициент трения λ в общем случае определяется числами Фруда и Рейнольдса, и при числах Рейнольдса порядка 10⁵ можно принять равным [9] $\lambda \approx 0,0018...0,0020$.

© Журавлева Л. А., Магомедов М. С., 2022

Если в уравнении (14) пренебречь величиной $z_{_{\rm нас}}$ по сравнению с другими членами уравнения, то радиус распыливания R' можно записать следующим образом:

$$R' = \frac{2\mu^2 H \sin 2\alpha}{k^2 \left(1 + K \sin \alpha\right)}.$$
(16)

Траектории движения струй воды при сходе с дефлектора по уравнению (16) при следующих исходных данных (*H*=0,25МПа, $r_1 = 5$ мм; r = 25 мм; $\mu = 0,82$; $z_{\mu} = 0,5$ м) представлены на рис. 4.

Максимальный радиус $R'_{max} = 1,5$ м достигается при $\alpha \approx 17...18^{\circ}$.

Полученные результаты использовались при конструировании дождевальных насадок широкозахватных дождевальных машин «КАСКАД» [3], рис. 5.

В качестве методов при выполнении исследований использовались: аналитическое описание на основе известных законов гидравлики и математического анализа; методика планирования многофакторного эксперимента, оценка достоверности и адекватности результатов. Обработка результатов осуществлялась при помощи ЭВМ с использованием программ Statistica и Microsoft Excel.

Лабораторно-полевые исследования проводились с применением методик разработанных ВНИИ «Радуга», Куб-НИИТИМ, ВолжНИИГиМ, СТО АИСТ 11. 1-2010 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей.

Экспериментальные исследования включали в себя: определение расходно-напорных характеристик дождевальных насадок; определение радиуса захвата дождем, средней, мгновенной интенсивности дождя и крупности капель в зависимости от конструктивных параметров дождевальных насадок и режимов их работы.

Результаты исследований. При проведении экспериментальных исследований задачей было подтвердить теоретические исследования, выбрать конструктивные исполнения дождевальных насадок и режимы эксплуатации с учетом заданной интенсивности и диаметра капель.

Проведенные исследования показывают, что при увеличении давления P_D с 0,1 до 0,4 МПа и диаметра сопла дождевальной насадки с 3 до 15 мм и, расход воды Q_H увеличивается с 0,1 до 4,5 л/с [3], рис. 6.

Максимальный радиус *R'* распыливания при увеличении диаметра сопла дождевальной насадки от 3 до 15 мм и давлении 0,3 МПа увеличивается с 4,5 м до 13 м при высоте установки над уровнем земли 2,5 м (рис. 7, 8) [3].

Повышение давления способствует увеличению дальности распыла струи.

Средняя интенсивность ρ_s дождя изменяется в границах от 0,08 до 1,2 мм/мин; мгновенная интенсивность $\rho_{_M}$ изменяется – от 0,08 до 1,1 мм/мин [3], рис. 9. Значение интенсивности 0,5 мм/мин обеспечивается дождевальными насадками с диаметром сопла до 10 мм и может являтьсяограничением длины машины при работе на почвах с малыми достоковыми нормами полива.

Средний диаметр капель дождя увеличивается с увеличением диаметра сопла дождевальной насадки, относительного радиуса полета капель R'/R' и с уменьшением давления (рис. 10). При повышении давления перед дождевальной насадкой резко улучшается качество распыла, увеличивается радиус распыла, а средний диаметр капель d_s и интенсивность уменьшается.

Таким образом, при эксплуатации широкозахватной дождевальной техники на низконапорных режимах необходимо оценивать крупность капель и мощность воздействия дождя на почву.

Заключение. Проведенные исследования позволили смоделировать процесс взаимодействия потока воды с конструктивными элементами дождевальной насадки и разработать обобщенный метод расчета.

Полученные зависимости и значения приведенных параметров использовались при проектировании номенклатурного ряда дождевальных машин с криволинейными дефлекторами, определении расстояния между ними для широкозахватных дождевальных машин «КАСКАД».



Рис. 4. Траектории движения гидравлических струй при различных значениях угла отлета струи: 1 – α = 10°; 2 – α = 15°; 3 – α = 18°; 4 – α = 30°; 5 – α = 45°



Рис. 5. Дождевальная насадка





Рис. 6. Характеристика дождевальных насадок «расход – давление» при различных диаметрах сопла: 1 – Ø3 мм; 2 – Ø4 мм; 3 – Ø5 мм; 4 – Ø6 мм; 5 – Ø7 мм; 6 – Ø8 мм; 7 – Ø9 мм; 8 – Ø10 мм; 9 – Ø11 мм; 10 – Ø12 мм; 11 – Ø13 мм, 12 – Ø14 мм; 13 – Ø15 мм. Q_H – л/с, P_D – МПа



Рис. 8. Зависимость радиуса R' от давления при больших диаметрах сопла дождевальной насадки: 1–010 мм; 2–011 мм; 3–012 мм; 4–013 мм; 5–014 мм. Высота установки 2,5м. Р_в–МПа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубенчиков М. А., Данильченко А. Н., Пацер Н. П. О снижении энергоемкости полива короткоструйными дефлекторными насадками // Экологическое и экономическое обоснование технологии и технических средств полива: сб. науч. тр. ВНИИМиТП. М.,1989. С. 42–47.

2. Есин А. И., Русинов А. В., Акпасов А. П. Обтекание конического дефлектора потоком вязкой несжимаемой жидкости // Научная жизнь. 2018. № 4. С. 14–19.

3 Есин А. И., Журавлева Л. А., Соловьев В. А. Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия. Саратов, 2019. 203 с.

4 Исаев А. П. Гидравлика дождевальных машин. М.: Машиностроение, 1973. 214 с.

Лебедев Б. М. Дождевальные машины. М., 1965. 225 с.
 Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., 2003.
 840 с.



Рис. 7. Зависимость радиуса R' распыливания от давления P_B перед дождевальной насадкой: 1–08 мм; 2–07 мм; 3–06 мм; 4–05 мм; 5–04 мм; 6–03 мм, Высота установки 2,5 м. P_B–МПа



Рис. 9. Зависимость средней ρ_s (1), мм/мин и мгновенной ρ_м (2), мм/мин, интенсивности дождя от расхода Q_H, л/с, при поливе дождевальными насадками с диаметром сопла Ø10 мм



Рис. 10. Изменение среднего диаметра капель d_s, мм, с увеличением относительного радиуса полета капель R'/R' при диаметре сопла Ø6 мм: 1 – P_{BX} = 0,08 МПа, 2 P_{BX} = 0,14МПа, 3 – P_{BX} = 0,3МПа

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

102



АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

03



8. Филимонов М. И., Новиков А. Е., Ламскова М. И. Дефлекторно-эжекторные дождевальные насадки для энерго- и ресурсосберегающего орошения // Альманах-2017. 2017. С.115–123.

9. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М., 2004. 656 с.

10. Darko R. O., Yuan S. Q., Liu J. P. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. Int J Agric & Biol Eng, 2017; 10(2): 1–15.

11. Esin A. I., Boikov V. M., Mukhin V. A. Mathematical Modeling of water Conducting Belt for Circular Action Sprinkler // Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems, Vol. 10, 01. Special Issue, 2018. P. 2135–2141.

12. Faria L. C., Nörenberg B. G., Colombo A. Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system / T.L. Irrig. Sci. 2019, 37, 195–206.

13 Jian Jiao, Yadong Wang, Liliang Han, Derong Su. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems. Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University. Published: 21 April, 2017. P. 1–17.

14. Liu J. P., Yuan S. Q., Li H., Zhu X. Y. Experimental and combined calculation of variable fluidic sprinkler in agriculture irrigation // Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America, 2016; 47(1): 82–88.

15. Liu J. P., Liu X. F., Zhu X. Y., Yuan S. Q. Droplet characterisation of a complete fluidic sprinkler with different nozzle dimensions // Biosyst Eng, 2016; 148(6): 90–100.

16. Liu J. P., Yuan S. Q., Darko R. O. Characteristics of water and droplet size distributions from fluidic sprinklers // Irrig Drain, 2016.

17. Yisheng Zhang, Jinjun Guo, Bin Sun. Modeling and Dynamic-Simulating the Water Distribution of a Fixed Spray-Plate Sprinkler on a Lateral-Move Sprinkler Irrigation System / School of Water Conservancy and Science & Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou. September 2019.

18. Zhu X. Y., Yuan S. Q., Liu J. P. Effect of sprinkler head geometrical parameters on hydraulic performance of fluidic sprinkler // J Irrig Drain Eng ASCE, 2012; 138(11): 1019–1026.

19. Zhu X. Y., Yuan S. Q., Jiang J. Y. Comparison of fluidic and impact sprinklers based on hydraulic performance // Irrig Sci, 2015; 33(5): 367–374.

REFERENCES

1. Bubenchikov M. A., Danilchenko A. N., Patser N. P. On reducing the energy intensity of irrigation with short-jet deflector nozzles. *Ecological and economic justification of irrigation technology and technical means*. Moscow, 1989: 42–47. (In Russ.)

2. Esin A. I., Rusinov A.V., Akpasov A. P. Flow around a conical deflector by a viscous incompressible fluid flow. *Scientific Life*. 2018; 4: 14–19. (In Russ.)

3 Esin A. I., Zhuravleva L. A., Soloviev V. A. Resource-saving technologies and circular sprinkler machines. Saratov", 2019. 203 p. 4 Isaev A. P. Hydraulics of sprinkler machines. Moscow, 1973. 214 p. (In Russ.)

5. Lebedev B. M. Sprinkler machines. Moscow, 1965. 225 p. (In Russ.)

6. Loitsyansky L. G. Mechanics of liquid and gas. Moscow, 2003. 840 p. (In Russ.)

7. Ryzhko N. F. Improvement of rain-forming devices for multi-support sprinkler machines. Saratov, 2009. 176 p. (In Russ.)

8. Filimonov M. I., Novikov A. E., Lamskova M.I. Deflector-ejector sprinkler nozzles for energy- and resource-saving irrigation / Almanac-2017. Volgograd, 2017: 115–123. (In Russ.)

9. Shterenlicht D.V. Hydraulics. Moscow, 2004. 656 p. (In Russ.)

10. Darko R. O., Yuan S. Q., Liu J. P. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation // *Int J Agric & Biol Eng.* 2017; 10(2): 1–15.

11. Esin A. I., Boikov V. M., Mukhin V. A. Mathematical Modeling of water Conducting Belt for Circular Action Sprinkler. *Jour of Adv* Research in Dynamical & Control Systems. 2018; 10, 01: 2135–2141.

12. Faria L.C., Nörenberg B. G., Colombo A. Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system. *T. L. Irrig. Sci.* 2019; 37: 195–206.

13 Jian Jiao, Yadong Wang, Liliang Han, Derong Su. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems. Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University. Published: 21 April, 2017: 1–17.

14. Liu J. P., Yuan S. Q., Li H., Zhu X. Y. Experimental and combined calculation of variable fluidic sprinkler in agriculture irrigation. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America*. 2016; 47(1): 82–88.

15. Liu J. P., Liu X. F., Zhu X. Y., Yuan S. Q. Droplet characterisation of a complete fluidic sprinkler with different nozzle dimensions. *Biosyst Eng.* 2016; 148(6): 90–100.

16. Liu J. P., Yuan S. Q., Darko R. O. Characteristics of water and droplet size distributions from fluidic sprinklers. *Irrig Drain*. 2016.

17. Yisheng Zhang, Jinjun Guo, Bin Sun. Modeling and Dynamic-Simulating the Water Distribution of a Fixed Spray-Plate Sprinkler on a Lateral-Move Sprinkler Irrigation System. *School of Water Conservancy and Science & Engineering*, Zhengzhou University, Zhengzhou. September 2019.

18. Zhu X. Y., Yuan S. Q., Liu J. P. Effect of sprinkler head geometrical parameters on hydraulic performance of fluidic sprinkler. *J Irrig Drain Eng ASCE*. 2012; 138(11): 1019–1026.

19. Zhu X. Y., Yuan S. Q., Jiang J. Y. Comparison of fluidic and impact sprinklers based on hydraulic performance. *Irrig Sci.* 2015; 33(5): 367–374.

Статья поступила в редакцию 20.03.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022; принята к публикации 22.04.2022.

The article was submitted 20.03.2022; approved after reviewing 12.04.2022; accepted for publication 22.04.2022.



7