Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 146–151
Agrarian Scientific Journal. 2025;(11):146–151

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 631
https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp146-151

Моделирование полива при импульсном орошении дождеванием

Лариса Анатольевна Журавлева
РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия
e-mail: dfz@yandex.ru

Аннотация. При поливе дождеванием образуется поверхностный сток, когда норма полива превышает скорость инфильтрации. Сток усиливает эрозию почвы и приводит к потере и вымыванию удобрений и питательных веществ. Цель представленного исследования – разработка алгоритма импульсного орошения, обеспечивающего минимизацию стока при обеспечении максимальной глубины промачивания почвы, т.е. сохранении требуемой нормы полива. Импульсная подача воды дождевателем способствует снижению стока за счет уменьшения количества подаваемой воды и за счет дополнительного времени для проникновения скопившейся воды на поверхности в почву. Для получения максимальной эффективности необходимо достичь определенного баланса между объемом поверхностного стока и глубиной и объемом фильтруемой воды, выбрав соответствующее количество и продолжительность импульсов отключения. Результаты показали, что применение импульсного орошения позволило уменьшить сток по меньшей мере на 90 % по сравнению с орошением в тех же условиях без импульсного орошения. Кроме того, количество и длительность импульсов включения-отключения дождевателей в течение общего времени полива оказывают существенное влияние на объем стока и равномерность распределения.

Ключевые слова: дождевание, импульсная работа, расход, сток, норма полива

Для цитирования: Журавлева Л. А. Моделирование полива при импульсном орошении дождеванием // Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 146–151. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp146-151.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Simulation of watering with pulse sprinkler irrigation

Larisa A. Zhuravleva
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
e-mail: dfz@yandex.ru

Abstract. When watering by sprinkling, surface runoff is formed when the irrigation rate exceeds the infiltration rate. Runoff increases soil erosion and leads to loss and washout of fertilizers and nutrients. The purpose of the presented study is to develop an algorithm for pulse irrigation that minimizes runoff while ensuring the maximum depth of soil wetting, i.e. maintaining the required irrigation rate. The pulsed water supply by the sprinkler helps to reduce runoff due to decrease of the amount of water supplied and due to additional time for accumulated water to penetrate from the surface into the soil. For maximum efficiency, it is necessary to achieve a certain balance between the volume of surface runoff and the depth and amount of filtered water by selecting the appropriate number and duration of cutoff pulses. The results showed that the use of pulse irrigation reduced water consumption by at least 90 % compared to irrigation under the same conditions without pulse irrigation. In addition, the number and duration of the sprinkler on/off pulses during the total watering time have a significant impact on the runoff volume and uniformity of distribution.

Keywords: sprinkling, pulse operation, flow rate, runoff, irrigation rate

For citation: Zhuravleva L. A. Simulation of watering with pulse sprinkler irrigation. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(11):146–151. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp146-151.

Введение. Установление лимитов на сельскохозяйственную воду во всем мире способствует разработкам и внедрению технологий и технических средств полива с экономным расходованием. Полив дождеванием является основным методом полива во всем мире, а широкозахватные дождевальные машины – самыми распространенными, применяемыми практически для всех культур и типов рельефа. Одной из основных причин широкого

распространения таких машин является легкость автоматизации всех процессов и высокое качество и равномерность полива [1–14].

Дождевальные машины применяют для орошения больших площадей при низких затратах на рабочую силу, они могут быть адаптированы к различным условиям работы.

В настоящее время практически вся дождевальная техника переведена на низкое давление, что требует совершенствования конструктивных параметров дождевальных машин и дождевателей.

Дождеватели низкого давления, устанавливаемые на приповерхностных системах полива, т.е. максимально близко к растительному покрову, более экономичны с точки зрения потерь воды на испарение и снос ветром, но, как правило, имеют меньший радиус полива, большую интенсивность и диаметр капель дождя.

Опасность возникновения поверхностного стока требует подачи выверенного количества воды и исключения переполива. Наиболее перспективными разработками в этом направлении являются технологии прецизионного полива с использованием переменной скорости орошения в соответствии с потребностями культуры в воде и импульсного включения дождевателей [3, 9, 12].

Во время работы любой дождевальной машины при поливе образуется поверхностный сток, когда норма полива превышает скорость инфильтрации почвы.

Сток усиливает эрозию почвы и приводит к потере, вымыванию удобрений и питательных веществ. Сточные воды, которые скапливаются в низинах поля, вызывают заболачивание, приводя к снижению урожайности.

Для дождевальных машин дифференцированная норма может быть достигнута за счет варьирования скорости движения машины и изменения проходного отверстия сопла дождевателя путем пульсации (времени включения-отключения дождевателя). Технически это может быть выполнено выдвижением штифта в отверстии сопла в течение заданного времени рабочего цикла или изменения времени включения электромагнитного клапана, установленного на гусаке перед спускным трубопроводом приповерхностного полива (оптимальный вариант).

На равномерность полива влияет расстояние между дождевателями; давление в трубопроводе; климатические условия, в том числе влияние ветра; высота дождевателя над поверхностью почвы; соотношение импульсов включения-отключения дождевателей; скорость движения машины, что требует проведения ряда исследований.

Целью исследования является разработка алгоритма импульсного орошения, обеспечивающего минимизацию стока при поддержании максимальной глубины промачивания почвы, т.е. требуемой нормы полива.

Материалы и методы. При моделировании рассмотрим следующие условия: длина дождевальной машины – 145 м; расход – 25 л/с; давление на входе – 0,15 МПа; диаметр сопла дождевателей – 2 мм; расход сопла дождевателя – 0,11 л/с; диаметр охвата – 5,0 м; почва – каштановый суглинок.

Для проведения экспериментальных исследований дождеватели с установленным электромагнитным клапаном, соединенным с программируемым логическим контроллером для обеспечения переменного импульсного управления, располагали через 0,7 м и объединяли в блоки по четыре машины.

Результаты исследований. Скорость инфильтрации почвы и объем подаваемой воды дождевальной машины являются важными факторами, влияющими на количество стока, и должны быть правильно определены.

В соответствии с выбранной моделью инфильтрации параметры связаны зависимостями [9, 12]

$$q(t) = 0{,}5St^{-0{,}5} + A; \quad (1)$$

$$I(t) = St^{0{,}5} + At; \quad (2)$$

$$p(t) = \frac{P_P}{t_P}\sqrt{2tt_p - t^2}, \quad (3)$$

где q – скорость инфильтрации, мм/ч; t – время инфильтрации, ч; S – сорбционная способность, мм/ч; A – постоянная величина, мм/ч; I – суммарная глубина инфильтрации, мм; P_p – величина осадков при поливе; tp – время максимального значения нормы полива, после которой определяется сток.

Общее время Т определяется по формуле

$$T = nT_{откл} + (n + 1)T_{вкл}, \quad (4)$$

где n – количество импульсов, $T_{откл}$ – время действия импульса отключения, с; $T_{вкл}$ – время действия импульса включения.

Полив начинается, когда норма полива воды, вносимой дождевальной техникой, превышает норму инфильтрации почвы (см. рисунок 1).

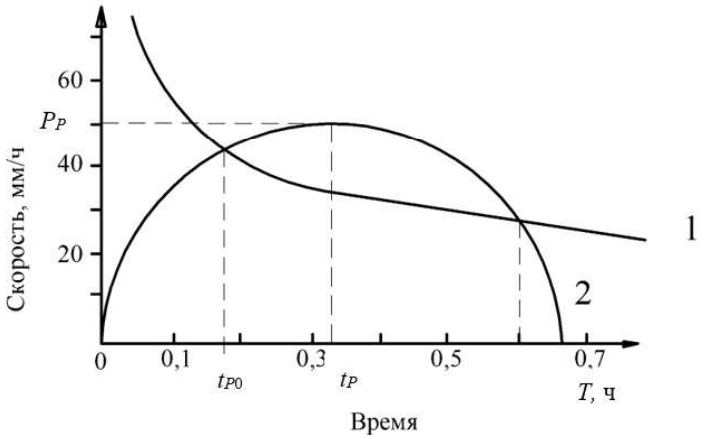

Рисунок 1 – Схема полива с постоянной подачей воды в каждой точке полива при движении машины: 1 – кривая инфильтрации; 2 – объем подаваемой воды при движении машины; P_p – максимальное значение осадков при поливе, Т – время орошения, t_p – время начала образования стока при превышении нормы подачи над значением инфильтрации

Figure 1 – Irrigation scheme with constant water supply at each irrigation point during the machine's movement: 1 – infiltration curve; 2 – volume of water supplied during the machine's movement; P_p – maximum watering during irrigation, T – irrigation time, t_p – time of runoff formation when the supply rate exceeds the infiltration value

Поверхность почвы может временно накапливать некоторое количество избыточной воды, определяемой гравитационной влагоемкостью. После заполнения этого объема избыток воды начнет стекать по полю в виде стока. На схеме подаваемая норма выражена в количестве осадков, мм, в единицу времени. Она определяется для каждой точки поверхности почвы при движении машины, т.е. за время, пока дождеватель проходит над точкой поверхности.

Таблица 1 – Распределение объемов поливной воды при постоянной ее подаче

Table 1 – Distribution of irrigation water volumes with its constant supply

Скорость машины, м/мин	Сток, мм	Норма осадков, мм	Глубина проникновения воды в почву, мм
2,76	0	3	3
1,80	0	4	4
1,66	0	5	5
1,38	0	6	6
0,96	0	8	8
0,83	0	10	10
0,70	0	12	12
0,55	0	15	15
0,42	1	20	18
0,33	4	25	20
0,28	7	30	22
0,25	9	33	23

Исследования показали, что сток начинается при количестве осадков больше 20 мм, т.е. импульсную подачу воды следует планировать после этого значения или при скорости ниже 0,7 м/мин.

Поскольку подача воды при импульсном орошении осуществляется путем включения-отключения дождевателей, т.е. циклически, схематически их можно представить в виде столбиков с перерывами подачи воды, а кривую инфильтрации – ступенчато (рисунок 2).

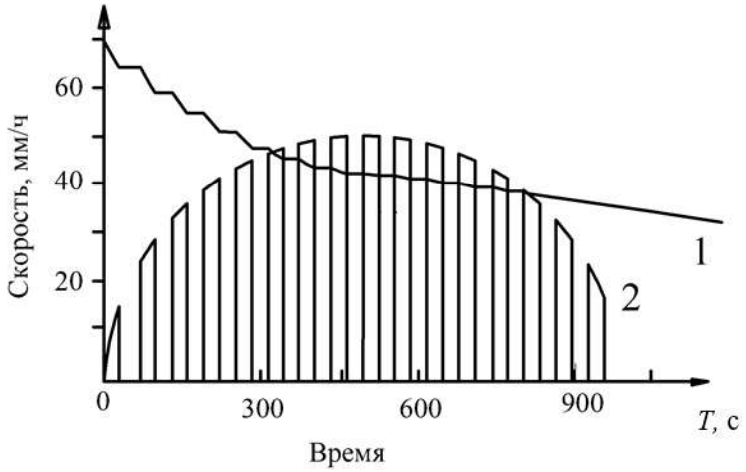

Рисунок 2 – Схема полива с импульсной подачей воды в каждой точке полива при движении машины: 1–кривая инфильтрации; 2 – объем подаваемой воды при движении машины

Figure 2 – Irrigation scheme with pulse water supply at each irrigation point during machine movement: 1 – infiltration curve; 2 – volume of water supply during machine movement

Импульсная подача воды оказывает влияние на снижение стока за счет уменьшения количества подаваемой воды и за счет дополнительного времени для проникновения скопившейся воды в почву. Для увеличения эффективности необходимо достичь определенного баланса между объемом поверхностного стока и глубиной и количеством фильтруемой воды, выбрав соответствующее количество и продолжительность импульсов отключения.

Смоделированы варианты для поиска и выбора наилучших условий: наименьший объем стока при максимальной глубине промачивания почвы водой.

Эффект пульсации влияет на равномерность распределения воды, особенно в следующих друг за другом точках на почве в направлении движения машины, поскольку каждая последующая точка в направлении движения будет получать объем распыления, отличающийся от первой точки. Между последовательными точками происходит сдвиг во времени, что связано со скоростью машины.

Оптимальные варианты, обеспечивающие приемлемую величину стока, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Оптимальные варианты, обеспечивающие приемлемую величину стока при скорости 0,42 м/мин и средней глубине промачивания почвы 18,2 мм (пример)

Table 2 – The best options that provide an acceptable runoff at a speed of 0.42 m/min and an average soil wetting depth of 18.2 mm (example)

Количество импульсов отключения	Время включения, с	Время отключения, с	Сток, мм
33	19,6	2	0,02
10	61,2	6	0,12
21	30,5	3	0,02
16	39,4	4	0,03
22	29,0	3	0,01
13	47,8	5	0,06
9	67,0	7	0,08

Окончание таблицы 2

Количество импульсов отключения	Время включения, с	Время отключения, с	Сток, мм
6	96,2	10	0,14
11	55,6	6	0,05
17	36,9	4	0,01
34	19,0	2	0
8	74,4	8	0,04
35	18,45	2	0
36	17,9	2	0
18	34,8	4	0
14	44,3	5	0
12	50,9	6	0

Увеличение длительности импульсов отключения дождевателя (перекрытие проходного сечения) снижает объем стока, но, с другой стороны, уменьшает глубину промачивания почвы водой.

В качестве наилучшего решения выбрано количество и длительность импульсов отключения, при которых сток для первой тестовой точки был равен нулю. Для проверки равномерности и потенциала стока в выбранных случаях необходимо учитывать глубину инфильтрации.

Оптимальные соотношения для различных скоростей работы машины, приведенные в таблице 3, показывают, что предложенный алгоритм работы позволяет снизить количество стока на 90–97 % для глубины промачивания 20–35 мм соответственно.

Таблица 3 – Оптимальный вариант регулируемого импульсного орошения

Table 3 – The best option for adjustable pulse irrigation

Глубина орошения, мм	Глубина промачивания, мм	Количество импульсов отключения	Время включения, с	Время отключения, с	Глубина инфильтрации, мм
20	18,4	6	96,1	10	18,2
25	20,3	11	60,7	17	19,7
30	22,0	14	51,8	23	21,0
33	23,0	16	47,6	25	21,8

Заключение. Результаты показали, что применение импульсного орошения позволило уменьшить сток по меньшей мере на 90 % по сравнению с орошением в тех же условиях без импульсного орошения.

Кроме того, количество и длительность импульсов отключения и их расположение в течение общего времени полива оказывают существенное влияние на объем стока и равномерность распределения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-26-00132).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Р. А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 3. С. 46–52.

2. Витковская С. Е., Изосимова А. А., Лекомцев П. В. Оценка пространственной неоднородности агрохимических параметров почвы в пределах делянки полевого опыта // Агрохимия. 2010. № 3. С. 75–82.

3. Журавлева Л. А., Якобсон Б. Б. Технико-технологические решения и рекомендации по сохранению плодородия почв, подверженных водной эрозии: монография. М., 2024. 115 с.

4. Журавлева Л. А. Целесообразность внедрения «точного» земледелия // Научная жизнь. 2020. Т. 15. № 1(101). С. 8–14.

5. Соловьев Д. А., Журавлева Л. А., Бахтиев Р. Н. Цифровые технологии в сельском хозяйстве // Аграрный научный журнал. № 11. 2019. С. 95–98.

6. Цифровизация управления агротехнологиями / Н. В. Степных [и др.]. Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2018. 43 с.

7. Информационные технологии в точном земледелии / В. П. Якушев [и др.] // Агрохимический вестник. 2002. № 2. С. 36–39.

8. The studies of water flow characteristics in the water conducting belt of wide-coverage sprinkling/ F. K. Abdrazakov et al. // The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication. 2018 No. 8. P. 567–577.

9. Mohapatra H., Mohanta B. K., Mishra S. R. The future of smart agriculture. Series: Agriculture Issues and Policies. USA: NOVA Publisher, 2023.

10. Philip J. R. Theory of infiltration: Advances in hydroscience. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier, 1969. P. 215–296.

11. Soloviev D. A., Zhuravleva L. A., Bakirov S. M. Robotic irrigative complex with intellectual control system CASCADE // Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy: XVIII International Scientific and Practical Conference. 2020. P. 145–156.

12. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: application of selected mathematical models / J. R. Williams et al. Vol II. USEPA EPA/600/R-97/128a, 1998.

13. Zhuravleva L. The method of calculating sprinklers for wide-reach sprinklers // BIO Web of Conferences, 2024. P. 116.

14. Zhuravleva L. The technology of fertilizing irrigation with differentiated norms using wide-reach sprinkler machines // E3S Web of Conferences, 2024. No. 531. P. 01038.

REFERENCES

1. Afanasyev P. A. Agrochemical support for precision farming. *Problems of Agrochemistry and Ecology.* 2008;(3):46–52. (In Russ.).

2. Vitkovskaya S. E., Izosimova A. A., and Lekomtsev P. V. assessment of spatial heterogeneity of fgrochemical parameters of soil within a field experiment plot. *Agrokhimiya*. 2010;(3):75–82. (In Russ.).

3. Zhuravleva L. A., Yakobson B. B. Technical and technological solutions and recommendations for preserving the fertility of soils subject to water erosion: monograph. Moscow, 2024. 115 p. (In Russ.).

4. Zhuravleva L. A. The feasibility of introducing “precision” farming. *Scientific Life*. 2020;15–1(101):8–14. (In Russ.).

5. Solovyov D. A., Zhuravleva L. A., Bakhtiev R. N. Digital Technologies in Agriculture. *Agrarian Scientific Journal.* 2019;(11):95–98. (In Russ.).

6. Digitalization of agro-technological management / N. V. Stepnykh, E. V. Nesterova, A. M. Zargaryan, O. A. Zhukova. Kurtamysh: Kurtamyshskaya Tipografiya LLC, 2018. 43 p. (In Russ.).

7. Information technologies in precision agriculture / V. P. Yakushev, R. A. Poluektov, E. I. Smolyar, A. G. Topazh. *Agrochemical Bulletin*. 2002;(2):36–39. (In Russ.).

8. The Studies of water flow characteristics in the water conducting belt of wide-coverage sprinkling / F. K. Abdrazakov, D. A. Soloviev, L. A. Zhuravleva, D. A. Kolganov. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication*. 2018;(8):567–577.

9. Mohapatra H., Mohanta B. K., Mishra S. R. The future of smart agriculture. Series: Agriculture Issues and Policies. USA: NOVA Publisher, 2023.

10. Philip J. R. Theory of infiltration: Advances in Hydroscience. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier, 1969:215–296.

11. Soloviev D. A., Zhuravleva L. A., Bakirov S. M. Robotic irrigative complex with intellectual control system CASCADE. *Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy: XVIII International Scientific and Practical Conference*. 2020:145–156.

12.Estimation of infiltration rate in the vadose zone: application of selected mathematical models / J. R. Williams, Y. Ouyang, J. S. Chen, V. Ravi. Vol II. USEPA EPA/600/R-97/128a, 1998.

13. Zhuravleva L. The method of calculating sprinklers for wide-reach sprinklers. *BIO Web of Conferences*, 2024:116.

14. Zhuravleva L. The technology of fertilizing irrigation with differentiated norms using wide-reach sprinkler machines. *E3S Web of Conferences*. 2024;(531):01038.

Статья поступила в редакцию 06.01.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.
The article was submitted 06.01.2025; approved after reviewing 05.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.