

Научная статья

УДК 621.313

Код ВАК: 4.3.1

doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-105-114

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ СМАЧИВАНИЯ ДОЖДЕВАТЕЛЯ В КРУГОВЫХ САМОХОДНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

А.Г. Черных<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,  
п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия;

✉ kandida2006@yandex.ru

**Реферат.** Круговые самоходные дождевальные установки представляют собой высокоэффективное оборудование для полива сельскохозяйственных культур путем дождевания. Как правило, искусственный дождь в указанных установках создается путем мелкодисперсного дождевания с механическим распылением воды на вращающемся рассекателе дождевателя. В процессе работы установки дождеватель должен обеспечивать заданные характеристики, а именно: радиус разбрызгивания и высокую степень однородности, а также требуемые параметры, включая производительность. Учитывая, что диаметр орошения, однородность и производительность установки в значительной степени зависит от параметров и взаимного расположения дождевателей на основном трубопроводе дождевальной машины, их оценка с точки зрения соответствия заданным значениям приводит к необходимости проведения предварительных замеров для каждого единичного дождевателя. Диаметр сопла форсунки дождевателя, давление, рабочая высота, наклон к горизонтали рассекателя – все это влияет на параметры искусственного дождя. Синтез детерминированной модели параметров и характеристик аэрозольной струи единичного дождевателя требует предварительных полученных расчетным и опытным путем знаний поведения и взаимодействия всех элементов на основном трубопроводе дождевальной установки, что практически нереализуемо с учетом их числа и диапазона изменения внутренних размеров. Использование детерминированных моделей, базирующихся на баллистической теории движения отдельной автономной капли, требует предварительного задания количества и размера капель. В случае самоходного типа дождевальной установки модель должна обеспечивать возможность применения в зависимости от скорости движения разбрызгивателя и взаимодействие струи с набегающим ветряным потоком. Альтернативный подход к моделированию динамики распыления аэрозольной струи форсункой заключается в рассмотрении данного процесса в контексте явлений, происходящих в системе вода-капля-воздух.

**Ключевые слова:** дождевальная, самоходная, установка, секция, трубопровод, спринклер, форсунка, расход, капля, почва, увлажнение

**Цитирование.** Черных А.Г. Определение характеристик и производительности аэрозольной струи в круговых самоходных дождевальных установках // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (75). – С. 105–114, doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-105-114.

DETERMINATION OF SPRINKLER WETTING ZONE IN CIRCULAR  
SELF-PROPELLED SPRINKLER SYSTEMSA.G. Chernykh<sup>1</sup> ✉<sup>1</sup>Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky,

Irkutsk, Russia

✉ kandida2006@yandex.ru

**Abstract.** Circular self-propelled sprinkler systems are highly efficient equipment for irrigating crops by sprinkling. As a rule, artificial rain in these installations is created by fine sprinkling with mechanical atomisation of water on a rotating sprinkler spreader. During the operation of the installation, the sprinkler must provide the specified characteristics, namely the radius of sprinkling and a high degree of uniformity, as well as the required parameters, including productivity. Considering that the irrigation diameter, uniformity and productivity of the installation largely depends on the parameters and mutual arrangement of sprinklers on the main pipeline of the sprinkler, their evaluation in terms of compliance with the specified values leads to the need for preliminary measurements for each single sprinkler. Nozzle diameter of the sprinkler nozzle, pressure, working height, inclination to the horizontal of the scatterer all affect the parameters of artificial rain. Synthesis of deterministic model of parameters and characteristics of aerosol jet of a single sprinkler requires preliminary knowledge of behaviour and interaction of all elements on the main pipeline of the sprinkler system, which is practically unrealizable taking into account their number and range of change of internal dimensions. The use of deterministic models based on the ballistic theory of motion of a single autonomous droplet requires preliminary specification of the number and size of droplets. In the case of a self-propelled type of sprinkler system, the model must allow for application dependent on the speed of the sprinkler and the interaction of the jet with the surging wind flow. An alternative approach to modelling the dynamics of aerosol jet atomisation by a nozzle is to consider this process in the context of the phenomena occurring in the water-drop-air system.

**Keywords:** sprinkler, self-propelled, installation, section, pipeline, sprinkler, nozzle, flow rate, drop, soil, moistening

**Citation.** Chernykh, A.G., (2024), "Determination of sprinkler wetting zone in circular self-propelled sprinkler systems", *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 75, no. 1, pp. 105–114. (In Russ.), doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-105-114.

**Введение.** Установки, в которых большое количество капель воды перемещается в воздушной среде, широко распространены в сельскохозяйственном орошении и опрыскивании. При наблюдении за поведением струи, создаваемой дождевателем, становится очевидным, что для произвольного момента времени ее можно рассматривать как рассредоточенную в пространстве между рассекателем и землей дискретную структуру, образованную сплошными разрывами соответствующих струй [1]. Последние включают в себя частицы концентрированной атмосферной влаги (капли). В общем случае каждая единичная капля с учетом формы рассекателя и атмосферного воздействия имеет свою пространственную форму, направление и скорость движения, а также время полета до момента контакта с землей [2]. В дождевателях, рассекатель которых вращается с небольшой угловой скоростью, сплошной круговой рисунок капель по мере удаления от дождевателя отсутствует, а их удельный объем, отнесенный к аналогичному объему струи, в целом не превышает 12% (рисунок, поз. 1 и поз. 2).



Рисунок. Фрагмент зон смачивания дождевателями широкозахватной круговой дождевальной машине фирмы T-L Irrigation company  
 Figure. Fragment of sprinkler wetting zones of the T-L Irrigation company's wide-catchment circular sprinkler machine

Расстояние от форсунки, на котором разбивается струя, уменьшается с увеличением ее скорости, и это наблюдение согласуется с существующими теориями разрушения высокоскоростных струй [3]. Результатом процесса разрушения сплошной струи из форсунки дождевателя на внешней кромке рассекателя являются движущиеся в воздухе по криволинейным траекториям, близким к параболе, капли воды различного размера и формы. По мере удаления от кромки рассекателя скорость движения каждой единичной капли изменяется в виду обмена импульсами между каплями и каплями и окружающим воздухом. Следовательно, взаимодействия с потоком воздуха движущейся одиночной конвективной капли необходимо учитывать соответствующим выражением для скорости ее испарения в уравнении динамической модели дальности полета капли.

В силу специфики работы широкозахватной круговой дождевальной машины (ШКДМ) орошаемая ей площадь может быть разбита на ряд кольцевых фигур, границы которых определяются окружностями, соответствующими колеям смежных опорных тележек. Соответственно, заданную норму полива (например, среднюю глубину полива для выбранной кольцевой фигуры) обеспечивают дождеватели, расположенные на основном трубопроводе машины в пределах радиальных границ данной фигуры, которые определяются удалением соответствующих опорных тележек от центральной поворотной башни (ЦПВ) ШКДМ.

Существенное влияние на среднюю глубину полива в геометрическом центре сектора кольца, внешний и внутренний радиусы которого соответствуют удалению пары дождевателей на границах кольца от ЦПВ, при прочих равных условиях оказывает наличие общих зон смачивания. Очевидно, что при наличии указанных зон объемное количество воды в них будет избыточным. Предположим, что граница зоны смачивания  $i$ -го дождевателя определяется некоторой окружностью, центр которой расположен в проекции точки

крепления дождевателя на трубопроводе на орошаемую поверхность. В этом случае радиус указанной окружности определится дальностью полета капли, имеющей средний арифметический диаметр.

Необходимо отметить, что на среднюю глубину полива в указанном секторе оказывают также следующие параметры: высота подвеса дождевателей, величина их расхода, угол по отношению к плоскости орошения и скорость вылета капель с рассекателя.

С учетом вышесказанного разработка детерминированных (нетребующих точной калибровки в зависимости от экспериментальных данных) методов прогнозирования зон смачивания на дискретных низконапорных участках систем искусственного дождевания с механическим распыливанием воды на дождевателях является актуальной научно-практической задачей.

**Цель исследования** – теоретический расчет и экспериментальное подтверждение полученных результатов, характеризующих радиус разбрызгивания двухфазного потока на выходе спринклера в системе мелкодисперсного дождевания применительно к основному трубопроводу самоходной дождевальной установки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Представить математический аналог движения двухфазного потока на выходе дождевателя, который учитывает взаимодействие жидкой и газообразной составляющих, явлений переноса импульса, энергии и массы внутри потока.

2. Косвенным методом измерения объемного расхода воды через форсунку с помощью мерной емкости определить величины расходов дождевателей с учетом их расстановки на основном трубопроводе машины и измерить радиус смачивания единичного дождевателя.

3. Используя априорные данные о высоте подвеса дождевателя, угле и скорости вылета капли, имеющей средний арифметический диаметр, и экспериментальное значение величины расхода на выходе форсунки, с помощью апостериорной модели движения двухфазного потока вычислить теоретический радиус смачивания единичного дождевателя.

4. Установить степень соответствия апостериорной модели данным эксперимента и выявить наличие общих зон смачивания на орошаемой площади между смежными опорными тележками.

**Материалы, методы и объекты исследований.** В качестве объекта исследования была выбрана система мелкодисперсного дождевания с механическим распылением воды на вращающемся со спиральными проточками рассекателе дождевателя, реализованная в закрытой оросительной системе с ШКДМ и технологической схемой подачи воды к орошаемому участку путем создания искусственного напора в основном трубопроводе машины [4].

Принимая допущение о том, что капля сферической формы, имеющая средний арифметический диаметр, определим его  $d_{\text{ср.капли}}$  по выражению [3]

$$d_{\text{ср.капли}} = 300 \cdot 1,515 \sqrt{d_{\text{струи}}} \cdot \sqrt[6]{\mu_{\text{воды}}} \cdot 2,94 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{воды}}}{\rho_{\text{воды}}}} \cdot \frac{1}{13,64 \sqrt{\rho_{\text{воздух}}} \cdot \sqrt[1,88]{V_{\text{max}}}}; \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{воды}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{воздух}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{max}}$  – максимальная скорость капли на кромке рассекателя дождевателя, равная квадратуре скоростей вертикальной и горизонтальной составляющих, м/сек;

$\mu_{\text{воды}}$  – динамическая вязкость воды, Па·сек;

$d_{\text{струи}}$  – диаметр струи, м;

$\sigma_{\text{воды}}$  – коэффициент поверхностного натяжения воды, Дж·м<sup>-2</sup>.

При распыливании воды вращающимися дисками величина расхода дождевателя  $Q_{\text{дожд.}}$  определится выражением [5]

$$Q_{\text{дожд.}} = 2,72 \cdot \frac{r_{\text{дефл.}}}{\left(1 + \frac{3\mu_{\text{воды}}}{\sqrt{d_{\text{струи}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot \sigma_{\text{воды}}}}\right)} \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{струи}} \cdot \sigma_{\text{воды}}}{8\rho_{\text{воды}}}}; \quad (2)$$

где  $r_{\text{дефл.}}$  – радиус дефлектора, м.

Значение расхода  $Q_{\text{дожд.}}$  является каталожной величиной для заданного типа форсунки либо может быть определена в полевых условиях [6].

Выражение (2) позволяет определить диаметр струи  $d_{\text{струи}}$ .

Определив величину  $d_{\text{ср. капли}}$  по выражению (1), необходимо вычислить массу капли  $m_{\text{капли}}$ , имеющей средний арифметический диаметр, учитывая ее сферическую форму [7].

Далее по выражению (3) определяется время полета капли  $t_{\text{капли}}$  до момента ее соударения с землей

$$t_{\text{капли}} = \frac{4 \cdot \arctan\left(\frac{k_1 + 2k_3 \cdot V_{\text{возд.}}}{\sqrt{4k_3 \cdot k_2 - k_1^2}}\right)}{\sqrt{4k_3 \cdot k_2 - k_1^2} + 4k_3 \cdot k_2 - k_1^2}. \quad (3)$$

В выражении (3) расчетные коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  равны

$$k_1 = k_{\text{лоб. капли}} \cdot (V_{\text{возд.}} - V_{\text{капли}}); \quad k_2 = \frac{V_{\text{мах}}^2 \cdot k_{\text{капли}} \cdot (\rho_{\text{воды}} - \rho_{\text{воздух}})}{m_{\text{капли}} \cdot \rho_{\text{воды}}}; \quad k_3 = \frac{3 \cdot \rho_{\text{воздуха}} \cdot d_{\text{ср. капли}}}{16 \cdot k_{\text{капли}}},$$

где  $V_{\text{капли}}$  – скорость движения капли, м/сек;

$V_{\text{возд.}}$  – составляющая модуля вектора скорости несущего потока (воздуха) параллельная плоскости орошения, противоположная аналогичной составляющей компланарного вектора  $V_{\text{капли}}$ , м/сек;

$k_{\text{лоб. воздух}}$  – коэффициент лобового сопротивления капли, обусловленный ее вращением сек<sup>-1</sup>;

$m_{\text{капли}}$  – масса капли, кг;

$k_{\text{капли}}$  – коэффициент лобового сопротивления капли при поступательном движении, кг·м

В окончательном виде выражение для определения теоретического радиуса смачивания  $r_{\text{теор.}}$  единичного дождевателя примет вид

$$r_{\text{теор.}} = \frac{t_{\text{капли}} \cdot \frac{m_{\text{капли}}}{k_{\text{лоб.капли}}} \cdot V_{\text{max}} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{g \cdot m_{\text{капли}}}{k_{\text{лоб.капли}}} - h_{\text{дождев}} \cdot \frac{m_{\text{капли}}}{k_{\text{лоб.капли}}} \cdot V_{\text{max}} \cdot \cos \alpha}{\frac{m_{\text{капли}}}{k_{\text{лоб.капли}}^2} \cdot (g \cdot m_{\text{капли}} + k_{\text{лоб.капли}} \cdot V_{\text{max}} \cdot \sin \alpha)}, \quad (4)$$

где  $h_{\text{дождев}} = h_{\text{трубопр.}} - h_{\text{свеса}}$ , – высота дождевателя над поверхностью земли, м;

$h_{\text{трубопр.}}$  – высота основного трубопровода ШКДМ над землей, м;

$h_{\text{свеса}}$  – высота свеса дождевателя в точке крепления к отводу трубопровода, м;

$\alpha$  – угол между направлением касательной к вектору скорости  $V_{\text{max}}$  и линией горизонта, град.

Предложенный алгоритм позволяет определить соответствующие значения зон смачивания для выбранного числа дождевателей с учетом геометрии их расстановки на основном трубопроводе ШКДМ, их конструкции и воздействия ветра. При этом введенные в рассмотрение коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  позволяют учесть явления переноса импульса, энергии и массы при взаимодействии жидкой и газообразной составляющих двухфазного потока на выходе дождевателя.

**Результаты исследований.** Полевой эксперимент с косвенным методом измерения объемного расхода воды на форсунках дождевателей, расположенных на основном трубопроводе ШКДМ фирмы T-L Irrigation company, проводился на пахотных землях, предназначенных для выращивания овощных культур в КФХ «ИП Кичигина Л.П.», Иркутская область, Усолье-Сибирское, село Мальта [1].

Конструкция ШКДМ включает в себя 11 ферм на опорах (тележках), передвигающихся при помощи моторного гидравлического привода и колес по часовой стрелке вокруг центральной поворотной башни.

Геометрия взаимного расположения элементов дождевания и их высоты свеса при прочих равных условиях, связанных с конструкцией разбрызгивателя и типом форсунки на нем, а также геометрия расстановки на основном трубопроводе ШКДМ являются основными факторами, влияющими на конечную эффективность и равномерность подачи воды на орошаемую поверхность [8].

Для получения экспериментальных данных о величине расходе единичной форсунки в ходе полевого эксперимента исследовалась работа многофункциональных разбрызгивателей фирмы Nelson D3000 [9].

Типы и число дождевателей с форсунками 3TN Nozzle на основном трубопроводе машины (на участке трубопровода между опорными тележками № 8 и № 9) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расстановка дождевателей на отводах основного трубопровода машины  
 Table 1. Placement of sprinklers on the machine's main pipeline branches

Участок трубопровода на конструктивной схеме	Типы форсунок и их количество																			
	тележка № 8 – тележка № 9	38	38	38	38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	39	40	40	40	40	41

Величина расхода единичного дождевателя производилась косвенным измерением с помощью мерной емкости объемом 5 литров и стрелочного секундомера. Результаты измерений с учетом размеров форсунок, основанных на 128-дюймовой шкале (по данным табл. 1), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Величины расходов дождевателей серии 3000 для системы форсунок 3TN Nozzle (по возрастанию)  
 Table 2. 3000 Series sprinkler flow rates for 3TN Nozzle System (ascending)

Тип форсунки	38	39	40	41
Расход, л/сек	0,667	0,690	0,714	0,741

При проведении полевого эксперимента высота расположения отвода основного трубопровода ШКДМ соответствовала значению  $h_{\text{трубопр.}} = 4,25$  м. Величина свеса дождевателя  $h_{\text{свеса}}$  составляла 2,35 м. Давление в основном трубопроводе ШКДМ – 94,5 л/сек. Скорость ветра принималась равной 0,6 м/сек.

Сводные значения границ зон смачивания для 18 дождевателей с типами форсунок 38, 39, 40 и 41, полученные по предложенному алгоритму и с помощью полевого эксперимента, приведены в табл. 3. Необходимо отметить, что в процессе расчета в уравнение (2) подставляются величины расхода  $Q_{\text{дожд.}}$ , которые соответствуют данным табл. 2, а не каталожным данным [10].

Таблица 3. Границы зоны смачивания единичного дождевателя  
 Table 3. Boundaries of the wetting zone of a single sprinkler

Тип форсунки	38	38	38	38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	40	40	40	40	41
Расстояние между форсунками, м	1,6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	1,6
$r$ , м (расчет)	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
$r$ , м (эксперимент)	4,1	4,1	4,1	3,9	3,9	3,9	4,3	4,3	4,3	4,3	4,1	4,1	4,1	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5

Сравнение расчетных и экспериментальных значений границ зоны смачивания (табл. 3) позволяют сделать вывод о результатах (максимальное значение относительной погрешности не превышает 15,5%).

**Выводы.** Введение в предложенный алгоритм расчета зоны смачивания дождевателя расчетного параметра, определяющего средний арифметический диаметр капли, позволяет исключить в дальнейших выкладках необходимость проведения громоздких вычислений, связанных с определением общего числа капель и их размеров в двухфазном потоке на выходе с рассекателя с учетом удаления потока от его кромки.

Приведено выражение, позволяющее по величине расхода на выходе форсунки определить диаметр соответствующей струи на ее выходе, которое отличается от значения геометрического диаметра самой форсунки и позволяет существенно повысить точность производимых расчетов. Это первое полученное аналитическое выражение для времени полета капли со средним арифметическим диаметром, которое учитывает явления переноса импульса, энергии и массы в процессе взаимодействия жидкой и газообразной составляющих двухфазного потока.

Использование тождества для определения теоретического радиуса смачивания единичного дождевателя с учетом его расположения относительно основного трубопровода машины и орошаемой поверхности с привязкой к линии отвеса в точке отвода на трубопроводе позволяет интегрировано учесть отмеченные выше особенности предложенного алгоритма расчета и повысить точность конечного результата.

Предложенная апостериорная модель расчета зоны смачивания дождевателем хорошо соотносится с данными полевого эксперимента применительно к набору форсунок различного типа, расположенных на основном трубопроводе ШКДМ фирмы T-L Irrigation company. Наличие общих зон смачивания смежных форсунок (табл. 3) требует изменения их типа на основном трубопроводе машины, что позволит минимизировать ширину таких зон.

### Список литературы

1. Журавлева, Л.А. Моделирование движения воды во вращающихся разбрызгивателях широкозахватных оросительных машин / Л. А. Журавлева, И. А. Попков, М. С. Магомедов // Инженерия окружающей среды. – 2022. – №3. – С. 48–53. – ISSN 1997-6011. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-48-53.
2. Droplet distribution characteristics of impact sprinklers with circular and noncircular nozzles / Yue, J., Jialing, L., Hong, L., Lin, H. and Yangchun. Y // Journal of Biosystems Engineering. Effect of nozzle aspect ratios and equivalent diameters, 2021, vol. 212, pp. 200–214.
3. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory/ Zapat N., Ouazaa S., Salvador R. // Spanish journal of agricultural research, 2014, vol. 12(3). pp. 850–863. – URL: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014123-5507> (accessed 22 December 2013).
4. Modes of operation of network pumps with shielded asynchronous motors in systems of small irrigation with artificial pressure / A. Chernykh // IOP Conference Series: Earth and Environmental. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future: Water resources management, irrigation and amelioration, 2023, Science 1138, p. 012004. – doi: 10.1088/1755-1315/1138/1/012018 (accessed 13 February 2023).
5. Дитякин, Ю.Ф., Клячко, Л.А., Новиков, Б.В., Ягодкин В.И. Распыление жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
6. Черных, А.Г. Структура и состав закрытой системы орошения механическим подъемом воды и поливом широкозахватными круговыми дождевальными машинами // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 4 (69). – С. 171–183.

7. Experimental and simulation investigation on the kinetic energy dissipation rate of a fixed Spray-plate sprinkler / Zhang Y., Sun B., Fang H., Zhu D., Yang L. and Li Z. // *Journal of Water*, 2018, vol. 10, pp. 1–13 (1365). – URL: 10.3390/w10101365 (acc. 2 September 2018).
8. Журавлева, Л.А., Попков, И.А., Магомедов, М.С., Хеирбеик, Бассел. Дождеватели широкозахватных дождевальных машин: монография / Л. А. Журавлева, И. А. Попков, М. С. Магомедов, Хеирбеик Бассел. Москва: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – 140 с.
9. Nozzle arrangement effect on cooling performance of saline water spray cooling / Sadafi M, Jahn I and Hooman K. // *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 105, pp. 1061–1066 (105). – URL: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.078 (accessed 21 November 2015).
10. Catalog – NELSON. Решения для механизированного орошения. URL: [irrigreat.ru/images/catalog/nelson.pdf](http://irrigreat.ru/images/catalog/nelson.pdf).

### References

1. Zhuravleva, L.A., Popkov, I.A., Magomedov, M.S. (2022) ‘Simulation of water movement in rotating sprinklers of wide-reach irrigation machines’, *Environmental Engineering*, no. 3, pp. 48–53, ISSN 1997-6011. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-48-53.
2. Yue J, Jialing L, Hong L, Lin H and Yangchun Y (2021) Droplet distribution characteristics of impact sprinklers with circular and noncircular nozzles: Effect of nozzle aspect ratios and equivalent diameters, *Biosystems Engineering*, vol. 212, pp. 200–214.
3. Zapat, N., Ouazaa, S., Salvador, R. (2014), Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory, *Spanish journal of agricultural research*, vol. 12(3), pp. 850–863, available: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014123-5507> (accessed 22 December 2013).
4. Chernykh, A. (2023) Modes of operation of network pumps with shielded asynchronous motors in systems of small irrigation with artificial pressure, IOP Conference Series: Earth and Environmental. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future: Water resources management, irrigation and amelioration, vol. 1138, p. 012004, doi: 10.1088/1755-1315/1138/1/012018 (accessed 13 February 2023).
5. Dityakin, Yu.F., Klyachko, L.A., Novikov, B.V., Yagodkin V.I. (1977), *Spraying of liquids*. Moscow. Mechanical Engineering, p. 208 et al.
6. Chernykh, A.G. (2022) ‘Structure and composition of a closed irrigation system with mechanical water lifting and irrigation by wide-reach circular sprinkler machines’, *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, no. 4 (69), pp. 171–183. (In Russian).
7. Zhang Y., Sun B., Fang H., Zhu D., Yang L. and Li Z. (2018), Experimental and simulation investigation on the kinetic energy dissipation rate of a fixed Spray-plate sprinkler, *Journal of Water*, vol. 10, pp. 1–13 (1365), available: 10.3390/w10101365 (accessed 2 September 2018).
8. Zhuravleva, L.A., Popkov, I.A., Magomedov, M.S., Heirbeik, Bassel. (2022) *Sprinklers of wide-span sprinklers: monograph*. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education-State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 140 p.
9. Sadafi, M., Jahn, I. and Hooman, K. (2016), Nozzle arrangement effect on cooling performance of saline water spray cooling, *Journal of Applied Thermal Engineering*, vol. 105, pp. 1061–1066 (105), available: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.078 (accessed 21 November 2015).
10. Catalog – NELSON. Solutions for mechanized irrigation. [electronic resource]. – URL: [irrigreat.ru "images/catalog/nelson.pdf/](http://irrigreat.ru/images/catalog/nelson.pdf).

**Сведения об авторе**

**Черных Алексей Георгиевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского», <https://orcid.org/0000-0003-3498-6579>, SPIN-код: 6696-6126; [kandida2006@yandex.ru](mailto:kandida2006@yandex.ru)

**Information about the author**

**Alexey G. Chernykh**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky», <https://orcid.org/0000-0003-3498-6579>, SPIN-код: 6696-6126; [kandida2006@yandex.ru](mailto:kandida2006@yandex.ru)

**Авторский вклад.** Автор настоящего исследования принимал непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Автор настоящей статьи ознакомился и одобрил окончательный вариант.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Author's contribution.** The author of this study was directly involved in the planning, execution and analysis of this study. The author of this article has read and approved the submitted final version.

**Conflict of interest.** The author declares that there is no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 25.10.2023; одобрена после рецензирования 21.12.2023; принята к публикации 10.03.2024.*

*The article was submitted 25.10.2023; approved after reviewing 21.12.2023; accepted for publication 10.03.2024.*