

Г.В. Ольгаренко, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Б.С. Гордон, кандидат технических наук

Всероссийский научно – исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»

РФ, 140483, Московская область, Коломенский р-н, пос. Радужный, 38

E-mail: prraduga@yandex.ru

УДК 631.67

DOI: 10.30850/vrsn/2019/3/68-72

## ПАРАМЕТРЫ ДОЖДЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН И ПОКАЗАТЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛОЯ ОСАДКОВ

Предложен метод моделирования применения разбрызгивающих устройств на различных по принципу действия дождевальных машинах, работающих в движении, когда обеспечивается равномерность распределения слоя осадков. При обосновании методики расчетов, в качестве исходной рабочей гипотезы приняты следующие положения: применение на дождевальной технике разбрызгивающих устройств, к которым относятся любые устройства, создающие искусственный дождь с пригодными для орошения характеристиками. Это могут быть дождевальные аппараты и насадки; равномерный полив осуществляется в случае, если на любом участке площади сезонной нагрузки машины ее разбрызгивающими устройствами обеспечивается гидромодуль, равный расчетному; метод выбора разбрызгивающих устройств и оценка равномерности орошения должны соответствовать друг другу. В результате продолжения ранее выполненных работ, принято математическое описание условий, обеспечивающих равномерность распределения слоя осадков дождевальными машинами. Анализ показателей равномерности полива подтвердил их соответствие условиям моделирования примененных разбрызгивателей. Доказано, что при моделировании их можно определять по распределению величин обеспечиваемых гидромодулей, используя известные расчетные формулы и частотные графики. Дополнительная эффективно орошаемая площадь за пределами длины трубопровода машин определяется радиусом или шириной эффективного полива, которые находятся согласно изложенному методу.

**Ключевые слова:** дождевальные машины, показатели равномерности распределения осадков, моделирование, разбрызгивающие устройства.

G.V. Olgarenko, Grand PhD in Agricultural sciences, Professor

B.S. Gordon, PhD in Engineering science

All-Russian Scientific Research Institute "Raduga"

RF, 140483, Moskovskaya oblast', Kolomenskij r-n, pos. Raduzhnyj, 38

E-mail: prraduga@yandex.ru

## PARAMETERS FOR RAIN SPRINKLER MACHINES AND RAINFALL DISTRIBUTION INDICATORS

There is offered the simulation method for sprinkling devices application on different mode operating irrigation machines, working in movement, when the uniform irrigation depth should be ensured. In justifying the calculation method, the following provisions were adopted as the initial working hypothesis: the use of sprinkler devices on sprinkling equipment, which include any devices that generate artificial rain with characteristics suitable for irrigation. These can be sprinklers and nozzles; uniform irrigation is carried out, if in any part of the seasonal load area of the machine its spray equipment is provided with a hydraulic module  $q_1$  equal to the calculated  $q_p$ ; the method of spraying devices selection and the assessment of irrigation uniformity should be consistent with each other. As a result of continuation of the previously completed work a mathematical description of the conditions was adopted that ensure evenness of rainfall distribution by sprinkling machines. The analysis of irrigation uniformity values has proved their matching to the simulation of sprinkling devices application conditions. It is proved that shown indices could be evaluated by the distribution of supplied hydro modules values, by using well-known rating formula and frequency plots. Additional effectively irrigated area outside the irrigation machine pipeline extension is calculated by the radius or efficient irrigation width; they are evaluated in accordance with the given method.

**Key words:** irrigation machines, indices of irrigation depth uniformity distribution, simulation of sprinkling devices application.

Искусственный дождь, создаваемый разбрызгивателями дождевальной техники, имеет различные характеристики, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на почву, растения и окружающую среду, в связи низкой равномерностью распределения по орошаемой площади. Но при повышении агроэкологического качества дождя и равномерности полива увеличивается урожайность сельскохозяйственных культур [3] и уменьшается опасность развития неблагоприятных экологических процессов при орошении.

В связи с этим, необходимо обосновать применение для равномерного полива дождевальных аппаратов и насадок на дождевальных машинах, работающих в движении. Выявление общих условий равномерного орошения для дождевальных машин кругового и фронтального действий, а также для шланговых дождевальных машин позволит полу-

чить расчетные зависимости для моделирования выбора разбрызгивающих устройств.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При обосновании методики расчетов, в качестве исходной рабочей гипотезы приняты следующие положения:

применение на дождевальной технике разбрызгивающих устройств, к которым относятся любые устройства, создающие искусственный дождь с характеристиками, пригодными для орошения. Это могут быть дождевальные аппараты и насадки;

равномерный полив осуществляется в случае, если на любом участке площади сезонной нагрузки машины ее разбрызгивающими устройствами обеспечивается гидромодуль  $q_1$ , равный расчетному  $q_p$ ;

метод выбора разбрызгивающих устройств и оценка равномерности орошения должны соответствовать друг другу.

В результате продолжения ранее выполненных работ [1], принято математическое описание условий, обеспечивающих равномерность распределения слоя садков дождевальными машинами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная нагрузка дождевальной машины кругового действия равна площади круга, сектор которого изображен на рисунке 1.

Выберем на этом секторе прямоугольную систему координат  $XOY$  с началом  $O$  в месте установки неподвижной опоры машины и осью  $OX$ , направленной вдоль ее водопроводящего трубопровода. Здесь же обозначим часть элементарного кольца орошения со средним радиусом  $R_i$  и шириной  $dR$ . На всем элементарном кольце обеспечиваемый гидромодуль  $q_i$  можно определить из уравнения:

$$g_i = \frac{1}{L_i} \sum_1^n \int_S p_k(x,y) ds, \quad (1)$$

где  $p_k(x,y)$  – распределение интенсивности дождя  $k$ -м разбрызгивателем;  $L_i$  – длина  $i$ -го элементарного кольца орошения, равная  $2\pi R_i$ ;  $n, k$  – количество, нумерация от 1 до  $n$  устройств, дождь которых выпадает на рассматриваемое элементарное кольцо орошения;  $S$  – кривая линия (окружность радиусом  $R_i$ ), по отрезкам  $ds$  которой проводится интегрирование.

В уравнении (1) под знаком суммы записан криволинейный интеграл первого рода от функции распределения интенсивности дождя  $p_k(x,y)$  вдоль окружности радиусом  $R_i$ .

Сезонная нагрузка дождевальной машины фронтального действия равна площади прямоугольника длиной  $L$  и шириной  $C$  (рис. 2). Вместо элементарного кольца выделим на этой площади элементарную полосу орошения длиной  $L_i$  и шириной  $dR$ , которая расположена на расстоянии  $R_i$  от начала прямоугольных координат  $XOY$  (рис. 2). Оси  $OX$  и  $OY$  этой системы направим вдоль смежных сторон площади орошения. Тогда, обеспечиваемый гидромодуль на  $i$ -й элементарной полосе

орошения для машины фронтального действия так же можно определить по формуле (1). Для данного случая величина  $L_i$  постоянная и равна длине  $L$  площади сезонной нагрузки, а под знаком суммы записан криволинейный интеграл от функции распределения интенсивности дождя  $p_k(x,y)$  по отрезкам  $ds$  прямой линии  $S$ , уравнение которой  $y = R_i$ . Использование уравнения (1) в расчетах объясняется тем, что работу машины фронтального действия можно рассматривать, как работу концевой участка дождевальной машины кругового действия. При этом ее водопроводящий трубопровод должен быть такой большой длины, чтобы при его повороте на некоторый угол, концевой участок машины орошал площадь прямоугольника длиной  $L$  и шириной  $C$ . Поэтому в формуле (1) для фронтальных машин следует рассматривать часть элементарного кольца, которая распрямляется и приобретает вид элементарной полосы орошения.

Шланговые дождевальные машины, как правило, состоят из разбрызгивающего устройства, перемещающегося прямолинейно, подтягивая его за водоподводящий шланг. Сезонная нагрузка этой машины равна площади прямоугольника длиной  $L$  и шириной  $C$ . На рисунке 3 представлены смежные площади сезонных нагрузок двух шланговых машин, где на расстоянии  $R_i$  от начала прямоугольных координат  $XOY$  выделена элементарная полоса орошения шириной  $dR$ .

Для шланговых машин обеспечиваемый гидромодуль можно определить по формуле (1) так же, как и для машин фронтального действия. При этом  $L_i$  – длина элементарной полосы орошения, равна  $L$ , а под знаком суммы записан криволинейный интеграл от функции распределения интенсивности дождя  $p_k(x,y)$  по отрезкам  $ds$  прямой линии  $S$ , уравнение которой  $y = R_i$ .

Использование уравнения (1) в расчетах шланговых машин объясняется тем, что работу их разбрызгивающих устройств можно рассматривать, как будто они установлены на концах трубопровода длиной  $B$  машины фронтального действия, причем,  $B$  равно расстоянию между позициями шланговых машин.

Формула (1) верна для всех типов дождевальной техники, работающей в движении. С ее помощью можно определять изменение обеспечиваемого

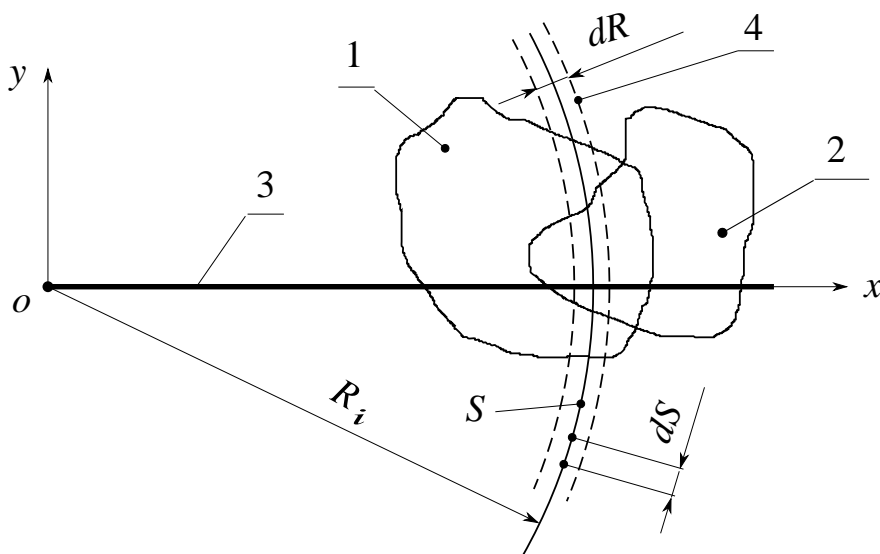


Рис. 1. Часть площади круга, орошаемая машиной кругового действия: 1, 2 – распределение интенсивности дождя разбрызгивателей  $p(x,y)$ ; 3 – водопроводящий трубопровод машины; 4 – часть элементарного кольца орошения.

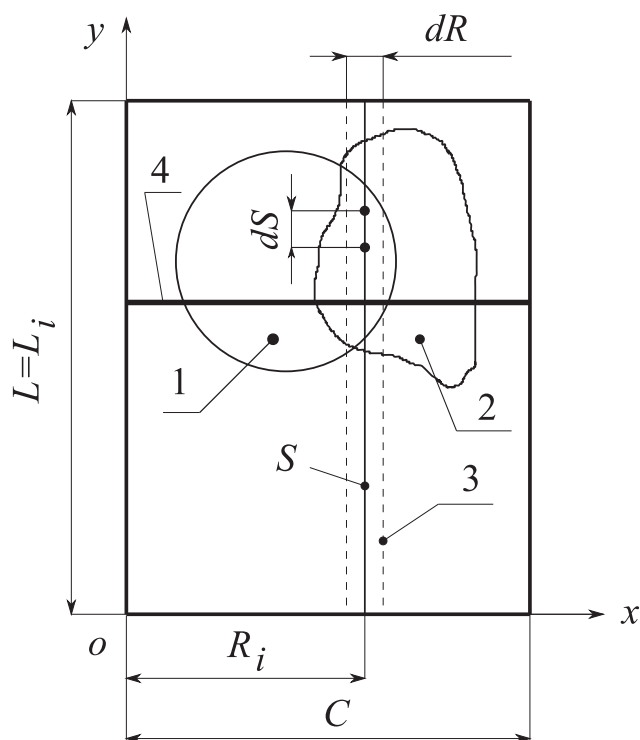


Рис. 2. Площадь сезонной нагрузки фронтальной машины:

- 1, 2 – распределение интенсивности дождя разбрызгивателей  $p(x,y)$ ;
- 3 – элементарная полоса орошения;
- 4 – водопроводящий трубопровод машины.

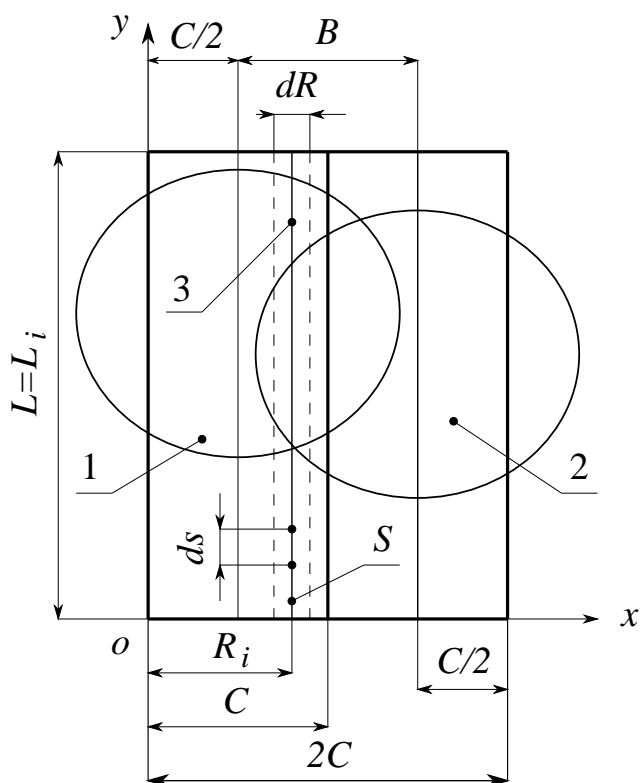


Рис. 3. Смежные площади сезонных нагрузок шланговых машин: 1, 2 – распределение интенсивности дождя разбрызгивателей  $p(x,y)$ ;

- 3 – элементарная полоса орошения.

гидро модуля на площади орошения и решать вопросы целесообразности применения разбрызгивающих устройств с конкретными распределениями интенсивности дождя для определенной схемы их расстановки. При этом, изменяя схему, а также заменяя в расчетах разбрызгиватели, можно выбирать наилучшие параметры из условия равномерного полива.

Изложенный метод выбора разбрызгивающих устройств основывается на условии равенства  $q_i = q_p$ . Однако при расчетах для различных элементарных колец или полос орошения мы находим обеспечиваемые гидро модули  $q_p$ , которые могут отличаться от расчетной величины. В связи с этим возникает задача оценки проектной равномерности орошения по распределению на площади обеспечиваемых гидро модулей, рассчитанных по формуле (1). Этот вопрос важен, так как метод выбора разбрызгивающих устройств и оценка равномерности орошения должны соответствовать друг другу.

Для элементарного кольца или элементарной полосы орошения между обеспечиваемым гидро модулем  $q_i$  и слоем осадков  $h_i$  существует зависимость:

$$h_i = q_i T, \quad (2)$$

где  $T$  – период времени полива площади сезонной нагрузки дождевальными машинами с постоянной угловой или линейной скоростью для машин кругового или фронтального действия, соответственно.

Тогда справедливо равенство:

$$h_1 - h_2 = T(q_1 - q_2), \quad (3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – слои осадков на любых двух элементарных кольцах или полосах орошения № 1 и № 2;  $q_1$  и  $q_2$  – обеспечиваемые гидро модули на тех же элементарных кольцах или полосах орошения.

Из (3) следует, что равномерного полива можно достичь, когда обеспечиваемые гидро модули одинаковы и равны расчетной величине. Это подтверждает правильность утверждения, что равномерный полив возможен, когда на любой части площади сезонной нагрузки обеспечивается расчетный гидро модуль.

В настоящее время нормативными документами определено несколько формул по оценке равномерности распределения слоя осадков. Для дождевальных машин кругового действия рекомендуется уравнение Хеермана-Хейна [2], где равномерность распределения слоя осадков оценивается коэффициентом  $C_H$ . После несложных преобразований этого уравнения и с учетом (2), можно определить коэффициент  $C_H$ :

$$C_H = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_1^n |q_i - q_v| R_i}{\sum_1^n q_i R_i} \right], \quad (4)$$

где  $n$  – число значений обеспечиваемых гидро модулей  $q_i$ , рассчитанных по уравнению (1) для элементарных колец орошения со средними радиусами  $R_i$ . Причем, каждый последующий радиус больше предыдущего на одну и ту же величину, начиная от неподвижной опоры машины (см. рис. 1);  $i$  – номера гидро модулей  $q_i$ , соответствующих радиусам;  $q_v$  – средневзвешенный гидро модуль

$$q_v = \frac{\sum_1^n q_i R_i}{\sum_1^n R_i}. \quad (5)$$

Для дождевальных машин фронтального действия коэффициент равномерности распределения слоя осадков  $C_U$  рекомендуется вычислять по формуле Христиансена [2], которую, с учетом (2), представим в виде;

$$C_U = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_1^n |q_i - q_c|}{\sum_1^n q_i} \right], \quad (6)$$

где  $n$  – число значений обеспечиваемых гидромодулей  $q_i$ , рассчитанных по уравнению (1), для элементарных полос орошения, расположенных через равное расстояние друг от друга (рис. 2, 3);  $i$  – нумерация гидромодулей  $q_i$ ;  $q_c$  – значение среднеарифметического гидромодуля, определяемое по формуле:

$$q_c = \frac{\sum_1^n q_i}{n}. \quad (7)$$

Из уравнений (4, 5, 6, 7) следует, что коэффициенты  $C_H$  и  $C_U$  зависят от распределения обеспечиваемых гидромодулей, по которым на стадии моделирования можно оценивать равномерность полива. Умножая  $q_i$  и  $q_c$  на  $T$ , можно рассчитать величины средневзвешенного и среднего слоев осадков для различных режимов работы машины.

Оценивать равномерность полива шланговых машин также можно по обеспечиваемым гидромодулям аналогично машинам фронтального действия.

Для расчета критериев равномерного распределения слоя осадков рекомендуется еще один метод [4], заключающийся в построении частотного графика для осадков или объемов воды в дождемерах. Определяют коэффициент эффективного полива: отношение эффективной части площади этого графика, заключенной в допустимом интервале плюс-минус 25% среднего или средневзвешенного значения, к площади всего графика. Дополнительно находят коэффициенты недостаточного и избыточного поливов.

Допустим, имеется частотный график  $n = f(h)$  зависимости частот  $n$  от величины слоя осадков  $h$  (рис. 4). Тогда, учитывая (2), справедливо равенство:

$$f(h_i) = f(Tq_i), \quad (8)$$

из которого следует, что, при прочих равных условиях, любой частотный график распределения слоя осадков получается растяжением в  $T$  раз вдоль оси абсцисс частотного графика распределения обеспечиваемого гидромодуля  $f(q_i)$ , причем  $T$  больше единицы. График  $f(q_i)$  можно построить по пересчитанному ряду слоев осадков, полученных путем их деления на  $T$ .

На какой-либо трапеции графика  $n=f(h_i)$  выделим область в интервале от  $h1$  до  $h2$ , где функция имеет производные. Учитывая (2), по зависимости (9) определим площадь  $F$  – часть общей площади графика, заключенной между  $h1$  и  $h2$ .

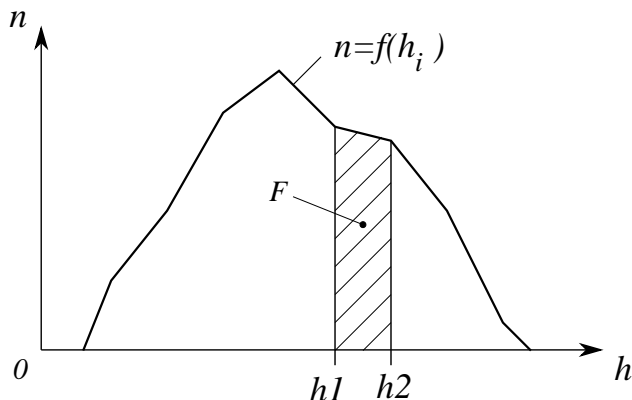


Рис. 4. Частотный график распределения слоя осадков  $n = f(h)$ .

$$F = \int_{h1}^{h2} f(h_i) dh = T \int_{h1/T}^{h2/T} f(q_i) dq_i. \quad (9)$$

Следовательно, площадь частотного графика слоев осадков и любая ее часть, состоящая из площадей трапеций  $F$ , в  $T$  раз больше соответствующей части площади частотного графика обеспечиваемых гидромодулей. Поэтому коэффициенты равномерности полива можно определять по частотному графику гидромодулей относительно среднего и средневзвешенного значений, так как при делении площадей друг на друга время  $T$  сокращается.

Средний и средневзвешенный слой осадков также будут в  $T$  раз больше среднего и средневзвешенного значений обеспечиваемых гидромодулей. Коэффициенты, вычисленные по частотному графику объемов воды в дождемерах, равны коэффициентам, рассчитанным также для гидромодулей.

При работе машин кругового и фронтального действий, разбрызгиватели, дождь которых выпадает за пределы длины трубопроводов, не могут равномерно оросить дополнительную площадь, так как с приближением к краю площади полива интенсивность дождя уменьшается до нуля без перекрытия с противоположной стороны.

В связи с этим и показателем качества полива у широкозахватных машин необходимо сначала определять на площади под их водопроводящим трубопроводом. По полученным результатам можно находить дополнительную площадь эффективного полива аппаратами, дождь которых выпадает за пределы длины трубопровода. Такая оценка равномерности согласуется с тем, что моделирование применения разбрызгивателей сначала ведется на обеспечение расчетного гидромодуля на площади под водопроводящим трубопроводом машин, а потом, используя формулу (1), анализируется равномерность орошения от концевой и других разбрызгивателей, дождь которых выпадает за пределы длины трубопровода машины. Поэтому оценивать качество полива при моделировании следует по распределению обеспечиваемых гидромодулей на площади под водопроводящими трубопроводами машин. За критерии правильного выбора разбрызгивателей при моделировании принимаем высокие показатели равномерности орошения (коэффициент эффективного полива не менее единицы), когда средневзвешенный или средний гидромодуль, определяемые по (5, 7) для соответствующих машин, близки по значению к величине расчетного гидромодуля или равны ей. Для контроля оценивать равномерность желательнее еще и по допустимым отклонениям  $\pm 20, 15, 10$  и  $5\%$  расчетных величин.

Дополнительная эффективно орошаемая площадь находится по радиусу или ширине эффективного полива следующим методом.

На рисунках 5 и 6 изображены графики  $q_i = f(R_i)$  изменения обеспечиваемого гидромодуля вдоль машины кругового и фронтального действий в зависимости от  $R_i$  (рис. 1, 2, 3). Здесь же ординаты линий равны расчетному гидромодулю и допустимому его отклонению  $\pm 25\%$  на площади под водопроводящим трубопроводом машин.

Продолжение линии  $0,75q_p$  до ее пересечения с графиком изменения обеспечиваемых гидромодулей машины за пределами ее водопроводящего трубопровода выявит радиус эффективного полива  $R_p$  машины кругового действия или эффективную ширину орошения  $L_p$  машины фронтального действия.



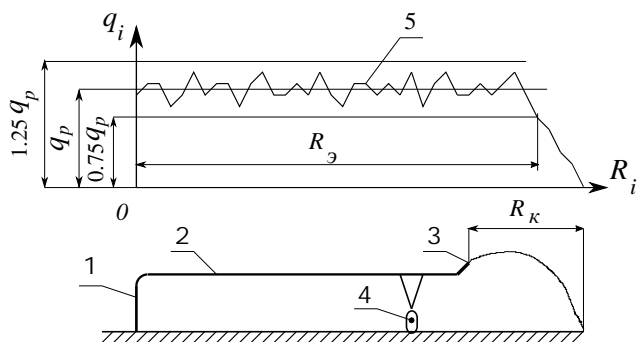


Рис. 5. Определение радиуса эффективного орошения машины кругового действия: 1 – неподвижная опора машины; 2 – водопроводящий трубопровод; 3 – концевой аппарат; 4 – колесная опора; 5 – график изменения обеспечиваемого гидромодуля.

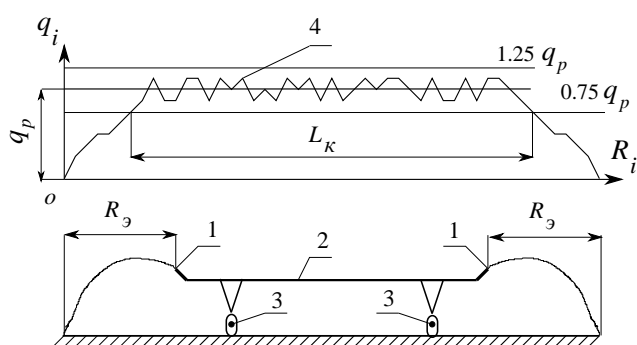


Рис. 6. Определение ширины эффективного орошения машины фронтального действия: 1 – концевой аппарат; 2 – водопроводящий трубопровод; 3 – колесная опора; 4 – график изменения обеспечиваемого гидромодуля.

При испытаниях дождевальной техники равномерность полива также должна оцениваться по распределению слоя осадков на площади под водопроводящим трубопроводом машин, а затем, в зависимости от принципа движения, могут быть определены радиус или ширина эффективного полива относительно среднего или средневзвешенного слоя осадков по допустимому их отклонению  $\pm 25\%$ .

Разделив средний или средневзвешенный слой осадков на время  $T$  в эксперименте, можно вычислить гидромодуль, который был расчетным при проектировании.

Работа шланговых и фронтальных машин аналогична, если длина их трубопроводов равна расстоянию  $B$  между позициями (см. рис. 3). Тогда показатели равномерности полива следует определить на площади под этим трубопроводом, а затем находить ширину эффективного орошения  $L_э$  для крайних участков.

В результате математического описания условий, обеспечивающих равномерность распределения слоя садков, установлено, что уравнение (1) можно использовать в моделировании применения разбрызгивающих устройств ко всем типам дождевальных машин, работающих в движении, когда величины обеспечиваемых гидромодулей на любой площади сезонной нагрузки равны расчетной величине.

Показатели равномерности полива, рекомендуемые соответствующими документами [2, 4], следует определять по распределению обеспечиваемых гидромодулей на площади полива под водопроводящим трубопроводом машин, а затем, используя изложенный метод, находить дополнительную эффективно поливаемую площадь.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дружинин, Н.И. Основы оптимизации искусственного дождя широкозахватных дождевальных машин / Н.И. Дружинин, Б.С. Гордон // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1986. – № 9. – С. 126–130.
2. Машины дождевальные кругового и поступательного действия с дождевальными аппаратами или распылителями. Определение равномерности орошения: ГОСТ ИСО 11545-2004. – Введ. 2008 – 01 – 01. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 10 с.
3. Ольгаренко, Д.Г. Система показателей для оценки качества полива сельскохозяйственных культур дождеванием/Д.Г. Ольгаренко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 23–27.
4. РД 10.11.1-89, RU. Машины и установки дождевальные. Программа и методы испытаний: взамен ОСТ 70.11.1-74: введ. 01.05.89. – Москва: Госагропром СССР, 1988. – 172 с. – (Испытания сельскохозяйственной техники). – Заменяет: ОСТ 70.11.1-74

#### LIST OF SOURCES

1. Druzhinin, N.I. Osnovy` optimizacii iskusstvennogo dozhda shirokozaxvatny`x dozhdeval`ny`x mashin / N.I. Druzhinin, B.S. Gordon // Vestnik sel'skoxozyajstvennoj nauki. – 1986. – № 9. – S. 126–130.
2. Mashiny` dozhdeval`ny`e krugovogo i postupatel'nogo dejstvij s dozhdeval`ny`mi apparatami ili raspylitelyami. Opredelenie ravnomernosti orosheniya: GOST ISO 11545-2004. – Vved. 2008 – 01 – 01. – Moskva.: FGUP «Standartinform», 2006. – 10 s.
3. Ol'garenko, D.G. Sistema pokazatelej dlya ocenki kachestva poliva sel'skoxozyajstvenny`x kul'tur dozhdevaniem/ D.G. Ol'garenko // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. – 2014. – № 2. – S. 23–27.
4. RD 10.11.1-89, RU. Mashiny` i ustanovki dozhdeval`ny`e. Programma i metody` ispytanij: vzamen OST 70.11.1-74: vved. 01.05.89. – Moskva: Gosagroprom SSSR, 1988. – 172 s. – (Ispy`taniya sel'skoxozyajstvennoj texniki). – Zamenyaet: OST 70.11.1-74.