

**Расчетные способы обоснования полива дождеванием без образования
поверхностного стока под машинами кругового действия**

И.В. Корнеев, кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А.ТИМИРЯЗЕВА»,

г. Москва, Россия

На основе формулы расчета времени наступления поверхностного стока при дождевании А.И. Голованова предложена формула для оценки применимости дождевальной машины кругового действия с точки зрения обеспечения достаточных поливных норм. В формуле учтены конструктивные параметры машин, такие как длина, общий расход воды, скорость вращения и ширина захвата дождем, формируемым дождевальными аппаратами.

The formula for estimation of surface runoff under pivot irrigation machine is proposed as development of prof. A.I. Golovanov's approach to finding the time of surface runoff under sprinkler irrigation. The design parameters of pivots, such as length, total water discharge, the rotational speed and the parameters of artificial rain range takes into account by the formula.

Поверхностный сток при орошении дождеванием традиционно является предметом изучения мелиораторов, почвоведов, а также конструкторов дождевальной техники. Образование затопленных участков и поверхностного стока на поверхности орошаемого поля, сопровождаемое переходом безнапорного впитывания в напорное, может приводить к разнообразным негативным последствиям, среди которых не только разрушение почвенных агрегатов, слитизация верхних слоев почвы и ирригационная эрозия, но и провальная инфильтрация воды в глубокие горизонты по макропористой проводящей системе почвы. Эти негативные проявления повышают экологическую опасность орошения и снижают водозффективность

оросительной системы. Для предотвращения образования поверхностного стока при орошении дождеванием необходимо обоснованно выбирать интенсивность искусственного дождя и время, за которое требуемая поливная норма при конкретных почвенных условиях (влагоемкости, влагопроводности, предполивной влажности) впитывается в почву в безнапорном режиме.

Для оценки досточковых поливных норм применяются несколько известных подходов, среди которых методика Н.С. Ерхова [1] и подход А.И. Голованова [2], предложившего формулу, связывающую время появления луж (момент перехода безнапорного впитывания в напорное) при поливе дождеванием с почвенными условиями (влагопроводностью, влагоемкостью, предполивной влажностью). Экспериментальная проверка формулы показала ее применимость для описания процесса образования луж (поверхностного стока) при поливе дождеванием. Важно отметить, что для описания влагопроводности почвы при поливе дождеванием (т.е. при впитывании в безнапорных условиях) нельзя применять коэффициенты фильтрации и влагопроводности, полученные в экспериментах по напорному впитыванию [3], предложено вместо них использовать матричный коэффициент фильтрации микропористых блоков. В статье Д.А. Данильченко [4] показано, что матричный коэффициент фильтрации может соответствовать коэффициенту влагопроводности при неполном насыщении, соответствующем небольшому отрицательному давлению почвенной влаги (по экспериментальной оценке, порядка $-0,03 \dots -0,05$ м вод. ст.).

Особенности процесса формирования поверхностного стока при поливе с помощью дождевальной машины кругового действия (ДМКД) связаны с ее конструкцией, которая в интересующей нас постановке может быть охарактеризована расходом воды Q ($\text{м}^3/\text{сут}$ или л/с), длиной L (м) и диапазоном рабочих скоростей вращения машины. Современные ДМКД имеют регуляторы скорости или таймеры стоянок, позволяющие управлять угловой скоростью движения машины. Среди принципов передвижения дождевальных машин разных производителей есть как основанные на постоянном медленном

движении тележек (например, машина T-L с гидроприводом), так и чередование стоянок и интервалов движения (машины с электроприводом производства Valley, Reinke и др.). Определяющим техническим параметром является максимальная линейная скорость движения концевой тележки, которой соответствует положение «100%» регулятора скорости на панели управления, минимальная скорость движения обычно соответствует положению регулятора «10%».

Зарубежные производители зачастую предлагают характеризовать ДМКД поливной нормой m_1 (мм), выдаваемой машиной за период вращения T (сут), равном одним суткам:

$$m_1 = QT / \pi L^2 \text{ при } T = 1 \text{ сут} \quad (1)$$

$$m_1 = \frac{Q}{\pi L^2} \cdot T|_{T=1 \text{ сут}} \quad (1)$$

Например, дождевальная машина Reinke длиной $L = 354,6$ м (шесть пролетов по 59,1 м) с расходом $Q = 36,07$ л/с характеризуется суточной поливной нормой $m_1 = 7,9$ мм. По сведениям производителя, при установке регулятора на панели управления в положение «100%» данная машина проходит один полный круг за 13,9 часов (поливная норма составляет 3,5 мм), при установке регулятора в положение «10%» полный круг требует 243,0 часа (поливная норма при этом составляет 64 мм).

Для анализа удобно рассматривать круговое движение ДМКД как последовательные периоды работы на отдельных виртуальных позициях, в течение каждого из которых над точкой поля находится полоса захвата дождем, формируемая факелами дождевальных аппаратов. Параметры факелов зависят от конструкции машины, типов примененных аппаратов, наличия регуляторов давления на каждом аппарате, но в первом приближении можно считать, что ширина полосы захвата дождем одинакова по длине машины, качество дождя оптимально для почв данного поля и равномерно по всей ширине полосы захвата дождем b (м).

При использовании открьлков и гусаков для разнесения в плане дождевальных аппаратов на разных пролетах можно получить различную

ширину полосы захвата дождем, поэтому в общем случае $b = f(x)$. Время работы на виртуальной позиции тем меньше, чем дальше от центральной опоры расположена рассматриваемая точка; обозначив это расстояние x (м), получим

$$t_{\text{вп}}(x) = b(x)T / 2\pi x \quad (2)$$

$$t_{\text{вп}}(x) = \frac{b(x)}{x} \cdot \frac{T}{2\pi} \quad (2)$$

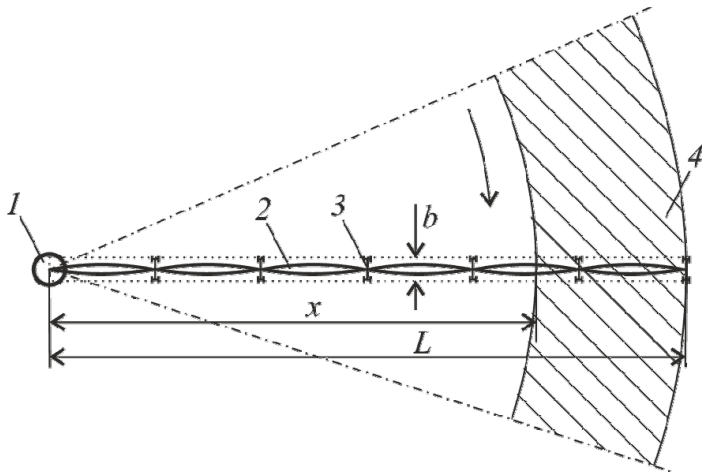


Рисунок 1. Расчетная схема для оценки условий образования поверхностного стока под дождевальными машинами кругового действия. Условные обозначения: 1 – центральная опора, 2 – дождевальная машина, 3 – колесная опора, 4 – зона, в которой возможно формирование поверхностного стока.

Интенсивность дождя $i(x)$ (м/сут) в конкретной точке по длине круговой машины

$$i(x) = 2Qx / b(x)L^2 \quad (3)$$

$$i(x) = \frac{2Q}{L^2} \cdot \frac{x}{b(x)} \quad (3)$$

Чем дальше от центральной опоры расположена рассматриваемая точка, тем выше интенсивность дождя при постоянной ширине полосы захвата дождем $b(x)$. Важно отметить, что интенсивность дождя не зависит от скорости вращения ДМКД, а определяется только ее конструктивными особенностями. Поливную норму в каждой точке по длине машины можно определить как

$$m(x) = i(x) t_{\text{вп}}(x) = (2Qx / b(x)L^2) (b(x)T / 2\pi x) = QT / \pi L^2 \quad (4)$$

$$m(x) = i(x) \cdot t_{\text{вп}}(x) = \frac{2Q}{L^2} \cdot \frac{x}{b(x)} \cdot \frac{b(x)}{x} \cdot \frac{T}{2\pi} = \frac{QT}{\pi L^2} \quad (4)$$

Формула (4) описывает постоянную по длине машины поливную норму, что и является обычным принципом проектирования ДМКД. Разумеется, на практике не всегда удастся обеспечить постоянную по длине норму, поэтому каждый производитель дождевальной машины расчетами и экспериментами проверяет значение коэффициента равномерности (равномерности) дождя по длине машины, который составляет обычно не менее 0,95...0,98. В полевых условиях можно оценить равномерность дождя экспериментальным дождеванием с применением дождемеров, методика таких экспериментов хорошо известна. Если по результатам измерений коэффициент равномерности меньше вышеуказанных значений, необходимо провести техническое обслуживание или ремонт ДМКД.

Очевидно, что в каждой точке по длине ДМКД складываются различные условия по интенсивности дождя и времени, в течение которого выдается поливная норма. Формула, предложенная А.И. Головановым (Голованов, Сорокин, 2005), может быть использована, чтобы связать почвенные условия элементарного участка, расположенного на расстоянии x от центральной опоры дождевальной машины, и интенсивность дождя в этой точке для расчета времени наступления стока:

$$t_{\text{ст}}(x) = \pi y_0^2 C(\omega_p) / [4K(\omega_p) \{i(x)/K(\omega_p) - 1\}^2] \quad (5)$$

$$t_{\text{ст}}(x) = \frac{\pi \psi_0^2 C(\omega_p)}{4K(\omega_p) \left(\frac{i(x)}{K(\omega_p)} - 1 \right)^2} \quad (5)$$

где

$$\psi_0 = \mu h_K \ln \left(\frac{\omega_0 - m\Gamma}{m - m\Gamma} \right);$$

$$\omega_p = \omega_0 + 0.56(m - \omega_0);$$

$$C(\omega_p) = \frac{\omega_p - m\Gamma}{\nu h_K};$$

$$K(\omega_p) = K_M \bar{\omega}_p^5 = K_M \left(\frac{\omega_p - m\Gamma}{m - m\Gamma} \right)^5;$$

где y_0 – предполивной капиллярно-каркасный потенциал почвенной влаги, м вод.ст., соответствующий предполивной влажности почвы w_0 , $\text{м}^3\text{м}^{-3}$;
 $y_0 = h_k \ln[(w_0 - \text{МГ})/(p - \text{МГ})]$.

w_p – расчетная влажность почвы, $\text{м}^3\text{м}^{-3}$; по предложению А.И. Голованова,
 $w_p = w_0 + 0,56 (p - w_0)$;

МГ – максимальная гигроскопичность почвы, $\text{м}^3\text{м}^{-3}$;

p – пористость почвы, $\text{м}^3\text{м}^{-3}$;

$C(w_p)$ – дифференциальная влагоемкость почвы при расчетной влажности, $\text{м}^3\text{м}^{-1}$; $C(w_p) = (w_p - \text{МГ})/h_k$;

$K(w_p)$ – влагопроводность почвы при расчётной влажности, м с^{-1} ; при орошении дождеванием рассчитывается как $K(w_p) = K_m [(w_p - \text{МГ})/(p - \text{МГ})]^5$

K_m – матричный коэффициент фильтрации, м с^{-1} .

В первом приближении можно рассмотреть ДМКД, конструкция которой обуславливает монотонное (не обязательно линейное) возрастание интенсивности дождя от центральной опоры к последней тележке. В этом случае точка, где $t_{\text{вп}}(x) = t_{\text{ст}}(x)$, разделяет диапазон $0 \leq x \leq L$ на две части: при $t_{\text{вп}}(x) < t_{\text{ст}}(x)$, – сток не образуется, поскольку искусственный дождь с интенсивностью $i(x)$ прекращается из-за кругового движения машины раньше, чем наступает сток; при $t_{\text{вп}}(x) \geq t_{\text{ст}}(x)$, согласно принятым условиям, возможно образование стока. Отметим, что под работающей дождевальнoй машиной может быть выделена зона постоянного дождя $0 \leq x \leq x_{\text{пл}}$, накрытая дождевым облаком при всех скоростях вращения и углах поворота ДМКД. Размерами этой зоны можно пренебречь, поскольку $x_{\text{пл}} = b(x)/2 \approx 2,0 \dots 3,0$ метра и этот участок обычно занят технологической площадкой и центральной опорой дождевальной машины.

Для поиска точки, в которой время работы на виртуальной позиции равняется времени наступления стока, запишем

$$b(x)T / 2\rho x = \rho y_0^2 C(w_p) / [4K(w_p) \{2Qx / (K(w_p)b(x)L^2) - 1\}^2] \quad (6)$$

$$\frac{b(x)}{x} \cdot \frac{T}{2\pi} = \frac{\pi \psi_0^2 C(\omega_p)}{4K(\omega_p) \left(\frac{1}{K(\omega_p)} \frac{2Q}{L^2} \frac{x}{b(x)} - 1 \right)^2} \quad (6)$$

После преобразований и некоторых упрощений, вносящих незначительную, не превышающую одного процента, погрешность в результат расчета, получим

$$x_{ст} = (b(x)K(\omega_p)L^2 / Q) [(2p/T) (Y_0^2 C(\omega_p)/16) (pL^2 / Q) + 1] \quad (7)$$

$$x_{ст} = b(x) \cdot K(\omega_p) \frac{L^2}{Q} \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\psi_0^2 C(\omega_p)}{16} \cdot \frac{\pi L^2}{Q} + 1 \right) \quad (7)$$

Предложенную формулу можно записать, используя характеризующий дождевальную машину параметр суточного слоя дождя m_1

$$x_{ст} = (b(x)K(\omega_p) / p m_1) [(2p/T) (Y_0^2 C(\omega_p)/16) (1/m_1) + 1] \quad (8)$$

$$x_{ст} = b(x) \cdot K(\omega_p) \frac{1}{\pi m_1} \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\psi_0^2 C(\omega_p)}{16} \cdot \frac{1}{m_1} + 1 \right) \quad (8)$$

Поскольку в рамках изложенных соображений о монотонном возрастании интенсивности дождя по длине машины сток наступает на участке, где $x_{ст} \leq x \leq L$, можно рассчитать относительную площадь поля под дождевальной машиной, на которой формируется сток, как долю площади соответствующего кольца в общей площади поля

$$S = (pL^2 - px_{ст}^2) / pL^2 = 1 - (x_{ст}/L)^2 \quad (9)$$

$$S = \frac{\pi L^2 - \pi x_{ст}^2}{\pi L^2} = 1 - \left(\frac{x_{ст}}{L} \right)^2 \quad (9)$$

Формулы (7) и (8) могут применяться и при немонотонном возрастании интенсивности дождя по длине машины, в таком случае на разных расстояниях от центральной опоры может быть несколько точек, в которых время работы на виртуальной позиции равно времени начала стока. В этом случае необходим дополнительный анализ всех таких точек и зон, где $t_{вп}(x) \geq t_{ст}(x)$.

В качестве примера рассмотрим возможность образования стока при поливе дождеванием с применением вышеописанной ДМКД Reinke, для которой ширина полосы захвата дождем по всей длине машины составляет 5,0...5,4 м, наибольшая интенсивность дождя на конце последнего пролета

составляет 2,44 мм/мин, в точке на расстоянии половины длины от центральной опоры машины 1,22 мм/мин.

Пойменные аллювиальные среднесуглинистые почвы орошаемого поля, расположенного в Коломенской районе Московской области, характеризуются следующими параметрами: пористость $p = 0,500 \text{ м}^3\text{м}^{-3}$, МГ = $0,120 \text{ м}^3\text{м}^{-3}$, матричный коэффициент фильтрации $K_m = 0,20 \text{ м/сут}$, высота капиллярного поднятия 1,60 м, предполивная влажность $0,220 \text{ м}^3\text{м}^{-3}$ (примерно 0,60 ППВ) и соответствующий ей потенциал почвенной влаги -1,93 м вод. ст. По рекомендациям А.И. Голованова [2] определим расчетную влажность $0,374 \text{ м}^3\text{м}^{-3}$, дифференциальную влагоемкость при этой влажности $0,171 \text{ м}^3\text{м}^{-1}$ и коэффициент влагопроводности $0,137 \text{ м/сут}$. При постоянной по длине машины ширине полосы захвата дождем $b = 5,2 \text{ м}$ для различных периодов полного оборота дождевальной машины получим следующие результаты:

Таблица 1. Относительная площадь, на которой формируется поверхностный сток при различной скорости движения дождевальной машины Reinke длиной $L = 354,6 \text{ м}$ с расходом $Q = 36,07 \text{ л/с}$.

Время полного оборота ДМКД, сут	Поливная норма за один проход, мм	Расстояние от центральной опоры, на котором возможно появление стока, м	Доля площади поля с поверхностным стоком
1,0	7,9	стока нет	0
2,0	15,8	стока нет	0
2,75	21,7	стока нет	0
3,0	23,7	331,8	0,12
4,0	31,6	256,0	0,48
5,0	39,4	210,6	0,65

Анализ таблицы показывает, что поливная норма за один проход, выдаваемая дождевальной машиной, не должна превышать 22 мм из условия предотвращения поверхностного стока. Для увеличения досточковой нормы, выдаваемой за один проход, можно снизить предполивную влажность (если это допускается по агрономическим условиям) – например, снижение влажности до $0,20 \text{ м}^3\text{м}^{-3}$ (примерно 0,55 ППВ) позволяет повысить норму до 27,5 мм при

времени полного оборота 3,5 сут. Анализ формулы 8 показывает, что повысить достокую поливную норму одного прохода можно за счет увеличения ширины увлажняемой полосы, например, с помощью иных дождевальных аппаратов или гусakov, открылков для разнесения форсунок в плане.

Заключение:

1. Предложена формула, позволяющая оценить применимость дождевальных машин кругового действия с точки зрения предотвращения поверхностного стока в конкретных почвенных условиях.

2. Формула позволяет обоснованно вносить изменения в расположение дождевальных аппаратов относительно водопроводящего трубопровода дождевальной машины для расширения полосы захвата дождем и снижения таким образом интенсивности дождя на наиболее удаленных от центральной опоры участках.

Библиографический список

1. **Ерхов Н.С.** Поливной режим, как элемент технологии полива. [Текст] // Гидротехника и мелиорация. – 1996. - №4.

2. **Голованов А.И.,** Сорокин Р.А., Определение достокых поливных норм при дождевании [Текст] // «Природообустройство и рациональное природопользование - необходимые условия социально-экономического развития России». – М.: МГУП, 2005.

3. **Мелиорация земель** [Текст] / А.И. Голованов, И.П. Айдаров, М.С. Григоров и др.; Под ред. А.И. Голованова – М.: КолосС, 2011. С. 102-104.

4. **Данильченко Д.А.** Способы и результаты определения влагопроводности почвы при напорном и безнапорном впитывании. [Текст] // Мелиорация и водное хозяйство, 2013, 2, 19-21.