

УДК 631.67

*В. Н. ДАШКОВ, Н. Ф. КАПУСТИН, А. Н. БАСАРЕВСКИЙ*

## ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЕВАНИЯ

*НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства*

*(Поступила в редакцию 11.04.2006)*

**Введение.** Анализ изменения природно-климатических и почвенных условий Республики Беларусь показывает, что развитие сельскохозяйственного производства практически невозможно без мелиоративного улучшения сельскохозяйственных угодий. Повторяющиеся в последнее время частые засухи, а также неравномерное выпадение осадков на территории в разные годы не позволяют получать стабильные урожаи сельскохозяйственных культур без орошения. Недостаток влаги сводит к минимуму влияние на урожай всех остальных факторов (удобрений, защиту растений, качество семян, обеспеченность техникой и т. д.). Однако высокая эффективность орошения обеспечивается, если дождь, создаваемый машинами, отвечает определенным агротехническим требованиям, так как растениям важно не только дать необходимое количество воды, но и обеспечить при этом определенные качественные показатели технологии.

Цель настоящей работы – изучить основные требования и условия эффективности применения дождевания, проанализировать характеристики искусственного дождя различных дождевальных устройств и на основе анализа определить критерии, которые существенно влияют на качество полива.

**Определение характеристик искусственного дождя.** Технические характеристики и возможности современной дождевальной техники зависят от требований сельскохозяйственного производства к технологии полива, которые учитывают ее назначение и специфические особенности. Условно эти требования разделены на агробиологические, агропочвенные, мелиоративные и организационно-хозяйственные. Искусственные и естественные дожди необходимо сравнить для того, чтобы дать оценку явлению, когда при одних и тех же параметрах дождя они существенно отличаются друг от друга, особенно с точки зрения водной эрозии [1]. Поэтому следует уточнить существующие критерии и в целях дальнейшего совершенствования дождевания ввести ряд новых параметров.

Для определения оптимальных параметров мобильных дождевальных машин необходимо знать следующие основные критерии эффективности применения дождевания: слой осадков и интенсивность дождя для сопоставления с впитывающей способностью почвы; силовое воздействие капель на почву и растения или размер капель и скорость их падения, позволяющие определить это силовое воздействие; концентрацию дождя и его объемное распределение; равномерность распределения осадков, выпадающих на почву за один полив.

В общем случае средняя фактическая интенсивность может быть определена по следующим формулам [2, 3]:

$$i_{\text{ср}} = \frac{h}{t} \quad (1)$$

или

$$i_{\text{ср}} = \frac{60Q}{F}, \quad (2)$$

где  $h$  – слой выпавших осадков, мм;  $t$  – продолжительность полива, мин;  $Q$  – расход воды дождевальной машины, л/с;  $F$  – площадь полива, м<sup>2</sup>.

Слой осадков зависит от скорости перемещения «облака» дождя, определяет поливную норму и оказывает влияние на впитывание воды в почву.

Поскольку интенсивность дождя в данной точке может меняться во времени, то выделяют еще одно значение интенсивности, называемое истинной интенсивностью  $i$ , характеризующей приращение слоя дождя в данной точке в данный момент времени [2, 3]:

$$i = \frac{dh}{dt}, \quad (3)$$

где  $dh$  – элементарное приращение слоя дождя в данной точке за элементарный промежуток времени  $dt$ .

Средняя интенсивность дождя не зависит от скорости движения (вращения) машины (аппарата) [2]. Ее можно определять расчетом или экспериментально (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Расчетные зависимости для определения характеристик дождя машин различных типов

Группа дождевальных машин	Действительная интенсивность дождя, мм/мин	Слой осадков за один проход или оборот машины, мм	Средняя интенсивность дождя, мм/мин
Позиционные консольного типа (ДМА-200, ДДА-100М и др.)	$\frac{60Q}{bl}$	$\frac{60Q}{vb}$	$\frac{60Q}{Lb}$
Мобильные (ДДН-70, ДДН-100, УД-2500, «MONSUN», «RM» и др.)	$\frac{60Q}{F}$	$\frac{60Q}{\pi R^2 n}$	$\frac{60Q}{\pi R^2}$
Позиционные пролетные («Фрегат», «Днепр», «Волжанка» и др.)	$\frac{60q}{F}$	–	$\frac{60Q}{bl}$

Условные обозначения:  $Q$  – расход воды машиной, л/с;  $q$  – расход воды одним аппаратом, л/с;  $b$  – ширина захвата дождем, м;  $v$  – скорость движения агрегата, м/мин;  $l$  – длина полосы дождя, м;  $L$  – длина гона машины (бьеф), м;  $F$  – одновременная площадь захвата дождем, м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус действия машины, м;  $n$  – частота вращения аппарата, об/мин.

При поливе дождеванием ирригационная эрозия почв возникает вследствие подачи воды с интенсивностью, превышающей впитывающую способность почвы. Соблюдение равенства этих характеристик является основным условием полива без образования стока и смыва почвы. Интенсивность дождя, равную интенсивности инфильтрации воды в почву, называют допустимой (по условию отсутствия стока). Она зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются: состав почвы, вид и состояние растительного покрова, уклон участка, диаметр капель, вид искусственного дождя (непрерывный или прерывистый). Прерывистое дождевание имеет место при применении большинства существующих дождевальных машин и аппаратов («Фрегат», «Днепр», «Волжанка», дальнеструйные дождевальные аппараты, а также мобильные барабанно-шланговые дождевальные машины типа УД-2500, Монсун-2). Значения допустимой интенсивности прерывистого дождевания и ее зависимость от определяющих факторов приведены в табл. 2 [4].

Т а б л и ц а 2. Допустимая интенсивность прерывистого дождевания супесчаных почв в зависимости от нормы полива\*

Норма полива, м <sup>3</sup> /га	Уклон поверхности					
	0,00–0,05		0,05–0,08		0,08–0,12	
	без растительности	с растительностью (трава)	без растительности	с растительностью (трава)	без растительности	с растительностью (трава)
100	0,38	0,57	0,29	0,44	0,18	0,31
200	0,23	0,30	0,15	0,22	0,10	0,14
300	0,14	0,21	0,08	0,12	0,07	0,09
400	0,08	0,13	0,06	0,10	0,06	0,06

\* Предполивная влажность почвы 70% НВ.

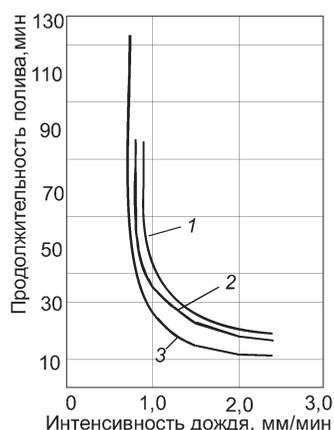


Рис. 1. Зависимость между продолжительностью полива и интенсивностью дождя: 1 – сток; 2 – большие лужи; 3 – малые лужи

На рис. 1 изображена зависимость между интенсивностью дождя и продолжительностью дождевания [5].

Показателем структуры дождя является также диаметр капель, который влияет на допустимую интенсивность дождевания, повреждаемость растений, разрушение почвенных агрегатов, величину потерь дождя на испарение в воздухе и т. д. Однако для почвы и растений имеет значение не просто размер капли, а ее механическое воздействие при падении или сила удара падающей капли. Более подробно о характеристике силового воздействия капель на почву и растения изложено в работе А. П. Исаева [6], согласно которой критерияльной величиной характеризующей значение силы удара является произведение

$$S_u = NVd_k^2, \quad (4)$$

где  $N = \frac{\rho}{6} \rho v_3$ ;  $V$  – скорость падения капли, м/с;  $d_k$  – диаметр капли, м;  $\rho$  – плотность жидкости, м<sup>3</sup>/кг;  $v_3$  – скорость распространения упругих волн в капле, т. е. скорость распространения звука в воде, м/с.

В первом приближении оценку качества дождя можно проводить по среднему значению критерия силы удара капель:

$$S'_u = \frac{\sum_{i=1}^n V_i d_{ki}^2}{n} N, \quad (5)$$

где  $n$  – количество капель.

Качество дождя можно считать удовлетворительным, а среднее значение критерия силы удара допустимым, если

$$S'_u < S_u^*, \quad (6)$$

где  $S_u^*$  – предельное значение силы удара (устанавливается для различных почв и растений на основе почвенно-биологических исследований).

Наряду с силой удара в качестве характеристики динамического воздействия капель на почву можно принять также давление  $P$  капли в месте ее контакта с почвой [6]:

$$P = \frac{4S_n}{\alpha \pi d_k^2} = \frac{2}{3} k \rho v_3 V, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, корректирующий площадь контакта, рассчитывается через  $k$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий степень деформации капли, при которой частицы воды изменяют направление движения так, что воздействие их на почву прекращается ( $k = 1/2$ ).

Непосредственное измерение силы удара, особенно в полевых условиях, затруднено. Если сила удара превышает норму, то неизвестно, какой параметр целесообразно изменять, чтобы она соответствовала норме. Поэтому, исходя из предельно допустимого значения критерия силы удара  $S_u^*$ , агротехническими требованиями устанавливаются допустимые значения диаметров капель в зависимости от скорости их падения или, наоборот, скорость падения в зависимости от диаметра для данной интенсивности дождя. В соответствии с агротехническими требованиями, средний диаметр капель дождя не должен превышать 1,5 мм. Снижение диаметра капель позволяет выдавать большую поливную норму без образования луж и стока при прочих равных условиях. О разрушающем действии дождя на структуру почвы можно судить по данным табл. 3 [5].

Т а б л и ц а 3. Влияние диаметра капель на разрушение почвенных агрегатов

Диаметр капель, мм	Интенсивность дождя, мм/мин	Разрушение агрегатов, %
1,0	0,5	5,4
2,3	0,5	11,2
5,2	0,5	14,0

Существует несколько методик определения диаметра капель дождя. Например, в работах [3, 6] предлагается вести оценку по среднеобъемному диаметру капель:

$$d_{\text{к.ср}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n i d_{\text{к}i}^3}{n}}. \quad (8)$$

В работе [7] средний диаметр наиболее крупных капель рассчитывается с учетом известных конструктивно-технологических параметров дождевального аппарата

$$d_{\text{к}} = K \sqrt{\frac{d_{\text{с}}}{v_0}}, \quad (9)$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент,  $K = 25,5$ ;  $d_{\text{с}}$  – диаметр струи воды, мм;  $v_0$  – скорость истечения воды из сопла, м/с.

Имеется также методика определения диаметра капель с помощью фильтровальной бумаги. По среднему диаметру пятен с помощью тарировочной кривой находят диаметр капли (РД 10.П.1-89).

Расчетные значения скорости падения капель можно установить по формуле, предложенной в работе [1]:

$$V_{\text{к}} = \sqrt{V_{\text{к}y}^2 \left(1 - e^{-\frac{200g}{V_{\text{к}y} h_{\text{к}}}\right)}, \quad (10)$$

где  $V_{\text{к}y}$  – установившаяся скорость падения капли данного размера, м/с;  $e$  – основание натурального логарифма;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $h_{\text{к}}$  – высота падения капель, м.

Установившаяся скорость определяется для каждого размера капель по данным Ганна и Кинцера [1], представленным графически (рис. 2).

В работе [8] определены зависимости интенсивности дождя от объемного распределения, скорости капель и их концентрации. Объемное распределение составляет часть объема тех капель, которые имеют одинаковый диаметр, и может быть выражено следующим образом [8]:

$$F_d = \frac{W_d}{W}, \quad (11)$$

где  $W_d$  – общий объем всех капель размером  $d$  в единичном объеме дождя  $W$ , м<sup>3</sup>.

Общее число капель вычисляется по формуле

$$n = 3,18 \cdot 10^4 \cdot \frac{i}{V d^3}, \quad (12)$$

где  $V$  – вертикальная составляющая скорости движения капли.

Коэффициент заполнения дождевого пространства капельной водой (концентрация) равен

$$\upsilon = \frac{i}{V} = \frac{W_{\text{к}}}{W}, \quad (13)$$

где  $W_{\text{к}}$  – общий объем капельной воды в объеме  $W$ .

Важную роль в оценке искусственных дождей играет равномерность их распределения по орошаемой площади. В мировой

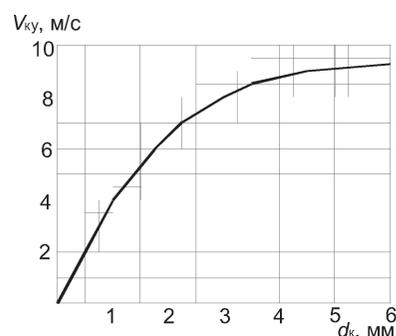


Рис. 2. Зависимость установившейся скорости падения капель от их размера

практике этот показатель оценивается коэффициентом Христиансена (ГОСТ ИСО 7749-1-2004), в России – коэффициентами эффективности полива, недостаточного и избыточного полива (определяются с помощью графиков распределения истинного слоя или осредненной интенсивности дождя) [3, 6].

Следует также отметить, что неперенным условием качественного дождевания является соблюдение сроков в соответствии с расчетными нормами полива, обеспечивающими оптимальный водный режим в корнеобитаемом слое с учетом вида и фазы развития растений и конкретных почвенно-климатических условий [9].

**Анализ показателей качества искусственного дождя различных дождевальных устройств.** Немаловажное значение для качественного полива имеет выбор оптимальной технологии дождевания. При дождевании вода подается на поля в виде искусственного дождя, переходя из состояния водяного тока в состояние воздушной и почвенной влажности без образования на поверхности луж и стока. Процесс дробления формируемой на выходе из аппаратов различных конструкций струи на капли дождя происходит за счет отрыва капель от струи при прохождении ее с определенной скоростью через слои воздуха. Высокое качество дождя у аппаратов струйного типа обеспечивается при отношении напора воды в насадке к диаметру струи (сопла), равном 1800–2400 [2].

Для более полной оценки качества дождя удобно пользоваться классификацией, данной В. Гемфрисом [8] (табл. 4).

В табл. 5 представлены характеристики дождя, рассчитанные для существующих дождевальных машин. При одинаковой крупности капель искусственного и естественного дождя скорость их падения принята одинаковой. Общее число капель и концентрация дождя рассчитаны по формулам (12) и (13).

Т а б л и ц а 4. Показатели качества естественных дождей

Характер осадков	Интенсивность дождя, мм/мин	Диаметр капель, мм	Скорость падения капель, м/с	Концентрация дождя, $v \cdot 10^{-7}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Число капель на 1 м <sup>3</sup>
Морозящий дождь	0,00642	0,20	0,75	1,42	34026
Легкий дождь	0,01600	0,45	2,00	2,33	2791
Умеренный дождь	0,06600	1,00	4,00	2,75	525
Сильный дождь	0,25000	1,25	5,00	8,33	472
Очень сильный дождь	0,66000	2,10	6,70	16,40	338
Ливень	1,67000	5,00	8,00	34,90	53

Т а б л и ц а 5. Показатели качества искусственных дождей

Тип и марка дождевальной машины		Интенсивность дождя, мм/мин	Диаметр капель, мм	Скорость падения капель, м/с	Концентрация дождя, $v \cdot 10^{-6}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Число капель на 1 м <sup>3</sup>
Пролетные	«Мини Фрегат-Фш»	0,33	1,0–1,5	4,5	1,22	2332–691
	МДШ 25/100	1,20	1,0–1,5	4,5	4,44	8480–2512
	МДШ 30/275	0,50	1,0–1,5	4,5	1,85	3533–1047
	«Ладога»	0,65	1,0–1,5	4,5	2,40	4593–1361
	«Кубань-Лш»:					
	МДЭШ 300-30	0,50	1,0–1,5	4,5	1,15	2190–649
МДЭШ-300-40	0,66	1,0–1,5	4,5	1,52	2890–858	
Консольные	ДДА-100 ВХ	3,50	1,0–2,5	6,0	9,72	18350–432
Стволовые	ДДН-100	0,34	1,0–1,5	4,5	1,26	2402–712
Барабанно-шланговые	ДШ-30	0,30	1,0–1,5	4,5	1,11	2120–628
	УД-2500	0,28	1,0–1,5	4,5	1,04	1979–586
	MONSUN 2500-II	0,31	1,0–1,5	4,5	1,15	2191–649
	RM 890GX	0,36	1,0–1,5	4,5	1,33	2544–754

Как видно из табл. 4 и 5 искусственные и естественные дожди имеют как сходные характеристики, так и существенно различные. Так, по своей интенсивности искусственные дожди попадают в категории от сильных дождей до ливней. В то же время по концентрации и количеству

капель они находятся в градации от легкого до сильного, т.е. на две категории ниже, чем естественные. По диаметру капель дождя указанные дождевальные машины соответствуют агротехническим требованиям, в соответствии с которыми этот показатель не должен превышать 1,5 мм [4]. Конечно, в идеале необходимо стремиться к уменьшению диаметра капель, что позволит снизить скорость их падения и увеличить количество капель. Нужно также снижать и интенсивность дождя до оптимальных значений (до градации «сильный дождь»). Однако известно, что при снижении последней уменьшается и производительность дождевальной машины. Среди указанных в табл. 5 показателей к оптимальным значениям интенсивности наиболее близки мобильные барабанно-шланговые дождевальные машины (УД-2500, ДШ-30, MONSUN-2500-II). У позиционных машин для улучшения структуры и качества дождя необходимо проведение модернизации, одним из направлений которой является замена дождевальных аппаратов на малоинтенсивные короткоструйные насадки секторного действия.

Существенное значение имеет время выпадения естественных осадков, которое составляет 30–40 мин при ливнях и до нескольких суток при морозящих дождях. Время воздействия у машин на порядок ниже. Кроме того, имеются различия в формировании микроклимата. Естественный дождь создает своего рода глобальный эффект, так как его влияние распространяется на большую территорию. При искусственном дождевании эффект локальный и микроклимат возвращается к исходным показателям на 2–3-е сутки (после естественных дождей – на 5–7-е сутки).

При оценке искусственных дождей первостепенное значение имеет равномерность полива. На этот показатель значительное влияние оказывает сила ветра. Для дальнеструйных дождевальных машин (ДДН-70, ДДН-100) допустимой следует считать скорость ветра примерно 2–3 м/с, для КИ-50 –  $\approx 4$ –5, «Волжанки», «Фрегата», мобильных дождевальных машин типа УД-2500, «MONSUN», «RM» –  $\approx 2$ –5 и для ДДА-100МА – 6 м/с [4].

**Заключение.** Соблюдение критериев эффективности искусственного дождевания необходимо для достижения наиболее оптимального развития растений и снабжения их водой. Это отражено также в агробиологических, агропочвенных и мелиоративных требованиях, которые в целом сводятся к сохранению и улучшению микрорельефа, структуры, механического состава почвы и мелиоративного состояния земель. Наиболее полно этим требованиям (не допускается разрушение структуры и уплотнение почвы; исключение механических повреждений растений и т. д.) отвечают мобильные барабанно-шланговые дождевальные установки (УД-2500, ДШ-30, «MONSUN», «RM»). Интегрирующим критерием, в который входят рассмотренные показатели (диаметр, количество и скорость падения капель, концентрация дождя и др.) является интенсивность дождя. Анализ показывает, что для барабанно-шланговых машин значения интенсивности наиболее близки к градации «сильный дождь» и находятся в пределах 0,28–0,36 мм/мин.

В целом, для определения оптимальных параметров мобильных дождевальных машин необходимо: наряду с общепринятыми характеристиками искусственного дождя, такими как: интенсивность, размер капель, равномерность распределения по площади, нужно учитывать концентрацию дождя, объемное распределение капель и давление жидкости на почву и стремиться к снижению интенсивности и увеличению равномерности распределения дождя по орошаемой площади, для чего машины должны иметь характеристики, не превышающие градацию «сильный дождь».

## Литература

1. Кузнецов М. С., Григорьев В. Я., Хан К. Ю. Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием. М., 1990. С. 11–16.
2. Штепа Б. Г., Винникова Н. В., Гусейнзаде С. Х. и др. Справочник по механизации орошения. М., 1979. С. 102–107.
3. Исаев А. П. Гидравлика дождевальных машин. М., 1973. С. 14–29.
4. Попков В. А. О перспективе применения передвижных дождевальных машин типа Монсун-2 (Германия) и УД-2500 (отечественный опытный образец РБ) в условиях Республики Беларусь. Мн., 2003. С. 27–37.
5. Беляев В. В., Лебедев Б. М. Дождевальные машины. М., 1957. С. 31–35.
6. Исаев А. П., Сергеев В. А., Дидур В. А. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов. М., 1990. С. 289–296.

7. Сапунков А. П. Применение дождевальной техники: современные тенденции. М., 1991. С. 8–13.
8. Губер К. В., Лямперт Г. П., Храбров М. Ю. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1998. № 8. С. 34–35.
9. Голченко М. Г., Михальцевич А. И., Шавлинский О. А. и др. Справочник по орошению дождеванием. Мн., 1993. С. 102–111.

*V. N. DASHKOV, N. F. KAPUSTIN, A. N. BASAREUSKI*

**SUBSTANTIATION OF THE EFFICIENCY CRITERIA OF APPLICATION  
OF ARTIFICIAL OVERHEAD IRRIGATION**

**Summary**

In article the basic requirements and the conditions of the efficiency of sprinkling are described, the calculation and graphic dependences for definition of characteristics of artificial rain are resulted, the parameters of the quality of natural rains are specified, and similar parameters in various irrigating devices are analysed. On the basis of the analysis the criteria of efficiency of application of artificial sprinkling are determined, and also the necessity to take them in account is shown by the optimization of irrigating devices with the purpose of increasing the ecological quality of rain. These criteria are most satisfied with mobile drum-type sprinklers, whose intensity of rain (basic integrating criterion), is within 0.28–0.36 mm/min.