

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 631.347

В. Н. ДАШКОВ, А. Н. БАСАРЕВСКИЙ

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ВЫХОДНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ БАРАБАННО-ШЛАНГОВОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства

(Поступила в редакцию 15.05.2007)

Введение. В настоящее время парк дождевальной техники насчитывает более двух десятков типов машин и установок, многие из которых создают искусственный дождь неудовлетворительного качества. Анализ их технико-экономических показателей показывает, что приоритет в использовании следует отдать барабанно-шланговым дождевальным установкам (БШДУ), как простым, наименее энерго- и материалоемким, и обеспечивающим необходимые качественные показатели технологии. Основным энергетическим фактором, приводящим к распаду струи на капли в данных установках, является давление нагнетания, т. е. применяется гидравлический способ распыливания жидкости. Следовательно, для снижения затрат мощности на единицу производительности водопроводящая система БШДУ должна подавать оросительную воду к дождеобразующему устройству с наименьшими гидравлическими потерями. Для этого необходимо определить минимальные значения гидравлических параметров на выходе из системы перед дождеобразующим устройством, при которых будут получены характеристики дождя, соответствующие агротехническим требованиям. Очевидно, что эти значения являются оптимальными.

Цель настоящей работы – установить оптимальные пределы изменения выходных гидравлических параметров водопроводящей системы, при которых будет образовываться искусственный дождь, соответствующий агротехническим требованиям, что также неразрывно будет связано с определением кинематических параметров дождевальной струи.

Определение гидравлических и кинематических параметров. Эксплуатация БШДУ возможна с различными дождеобразующими устройствами, но, как известно, работа с дальне-струйными дождевальными аппаратами (ДА) наиболее энергоемка вследствие высоких затрат мощности на придание каплям кинетической энергии [1, с. 71; 2], поэтому обоснование основных гидравлических параметров на выходе водопроводящей системы нужно вести применительно к дальнеструйным ДА, так как напора, обеспечивающего качественные показатели их работы, будет достаточно и для других дождеобразующих устройств.

Исходя из агротехнических требований, лимитирующих параметры искусственного дождя, определим напор и расход, при которых должно происходить истечение. Названные гидравлические характеристики должны удовлетворять двум условиям: обеспечение заданных интенсивности дождя и размера капель. Необходимый расход найдем на основании значений допустимой интенсивности дождя, которая при норме полива до 300 м³/га составляет: до 0,3 мм/мин – для

песчаных почв, до 0,2 мм/мин – для легких суглинистых почв, 0,1–0,2 мм/мин – для средних и тяжелосуглинистых почв [3–5]. Согласно Г. В. Ольгаренко [6, 7], оптимальное значение интенсивности – до 0,25 мм/мин. Отметим также, что при прерывистом дождевании интенсивность может повышаться до 0,5 мм/мин [1, с. 15; 5]. Тогда, предполагая, что полив происходит по всему орошаемому сектору, площадь которого определяется по формуле

$$F = \frac{R^2 \alpha}{2}, \quad (1)$$

средняя фиктивная интенсивность должна удовлетворять условию

$$i_F = \frac{Q}{F} = \frac{2Q}{R^2 \alpha} \leq i_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где F – площадь орошаемого сектора, м²; R – радиус орошения, м; α – угол сектора орошения, рад; i_F – средняя фиктивная интенсивность дождя, мм/мин; Q – расход дождевальной установки, л/мин; $i_{\text{доп}}$ – средняя допустимая интенсивность дождя, мм/мин.

Для определения дальности полета струи в настоящее время известно более 20 теоретических и эмпирических зависимостей, полученных различными исследователями [1, 8]. Однако эти формулы носят частный характер и дают большие отклонения расчетных значений от опытных.

Рассмотрим траекторию движения дождевальной струи (рис. 1).

Используя известные кинематические и динамические соотношения

$$r_0 = V_0 t \cos \theta, \quad h_0 = V_0 t \sin \theta - \frac{gt^2}{2}, \quad V_0 = \sqrt{2gH_0}, \quad (3)$$

получим уравнение траектории движения струи при отсутствии сопротивления воздуха:

$$r_0^2 + 4H_0 h_0 \cos^2 \theta = 2H_0 r_0 \sin 2\theta, \quad (4)$$

где r_0 – дальность полета струи до пересечения с осью $O'X'$, м; V_0 – начальная скорость вылета струи, м/с; t – время движения, с; θ – угол наклона ствола ДА к горизонту, рад; h_0 – высота подъема дождевальной струи, м; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; H_0 – напор на входе в ДА, м.

А. П. Исаев и Б. М. Лебедев [1, 9] предлагают оценивать величину сопротивления воздуха как часть напора, затрачиваемую на преодоление этого сопротивления, и принимают ее пропорциональной длине траектории струи, т. е. величину H_0 в уравнении(4) заменим выражением:

$$H_0 = \frac{\lambda H_0 r_0}{d \cos \theta}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент сопротивления воздуха; d – диаметр сжатой струи, мм.

Согласно [8], величина λ может быть подсчитана по формуле

$$\lambda = 0,25(1 - e^{-\frac{H_0}{1,6d}}). \quad (6)$$

Тогда уравнение (4) при наличии сопротивления воздуха после алгебраических и тригонометрических преобразований примет следующий вид:

$$\begin{aligned} r_0^2 + \frac{4H_0 h_0 \cos \theta (d \cos \theta - r_0 \lambda)}{d} = \\ = 2r_0 \sin 2\theta \left(H_0 - \frac{H_0 r_0 \lambda \sec \theta}{d} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

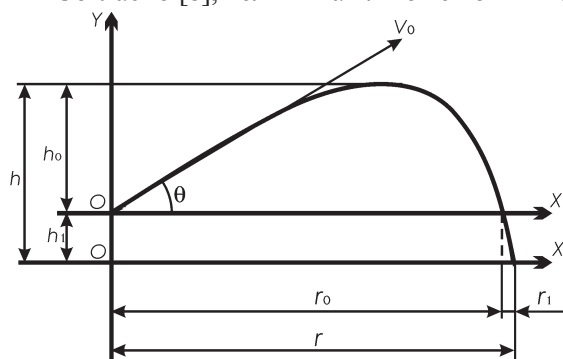


Рис. 1. Схема траектории движения дождевальной струи

В момент падения струи $y = -h_1$, $x = r$. Подставим эти значения в уравнение (7) и, решая относительно r , получим два корня:

$$r_{1,2} = \frac{4dH_0 \cos \theta \sin \theta \pm \sqrt{16dH_0 h_1 \cos^2 \theta (d + 4H_0 \lambda \sin \theta) + (4H_0 h_1 \lambda \cos \theta - 4dH_0 \cos \theta \sin \theta)^2}}{2(d + 4H_0 \lambda \sin \theta)} - \frac{4H_0 h_1 \lambda \cos \theta}{2(d + 4H_0 \lambda \sin \theta)}, \quad (8)$$

где h_1 – высота расположения ДА над поверхностью земли (ось OX), м; r – дальность полета струи до пересечения с осью OX .

Дальности полета струи отвечает первый корень уравнения. После преобразований получим

$$r = \frac{4H_0 \cos \theta (d \sin \theta - h_1 \lambda) + \sqrt{16dH_0 h_1 \cos^2 \theta (d + 4H_0 \lambda \sin \theta) + (4H_0 h_1 \lambda \cos \theta - 2dH_0 \sin 2\theta)^2}}{2(d + 4H_0 \lambda \sin \theta)}. \quad (9)$$

Величину r_0 можно определить, если подставить в уравнение (9) значение $h_1 = 0$, а величину r_1 – как разность между r и r_0 . Максимальной дальности полета при прочих равных условиях будут соответствовать значения при оптимальном угле наклона ДА к горизонту θ_0 . Его можно определить, если взять производную $\frac{\partial r}{\partial \theta}$ и приравнять полученное выражение к нулю. Однако данная задача сложна в математическом рассмотрении и оптимальные углы здесь можно определить лишь прибегая к методу последовательных приближений. М. А. Жарский в результате обработки графической зависимости, полученной А. П. Исаевым, предложил следующую формулу [10]

$$\theta_0 = 2 \arccos \left(0,93 + 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{H_0}{d_0} \right), \quad (10)$$

где d_0 – диаметр выходного сечения сопла, мм.

Если в формулу (9) вместо θ подставить θ_0 , то получим максимальную дальность полета струи. Следует отметить, что действительный радиус орошения будет отличаться от дальности полета струи r , так как при поливе ДА вращается и, кроме того, происходит нарушение компактности струи вследствие ввода в нее лопатки для привода ствола ДА, поэтому величину дальности полета струи необходимо уменьшить на 5–15% [1]:

$$R = rk_r, \quad (11)$$

где R – действительный радиус орошения, м; k_r – коэффициент, учитывающий уменьшение дальности полета струи (принимается $k_r = 0,85$ [9]).

Для расчета энергетических показателей дождя необходимо знать высоту падения капель. Из уравнения (7) найдем максимальную высоту полета h_{\max} . Для этого приравняем производную $\frac{\partial h_0}{\partial r_0}$ к нулю, и после преобразований получим уравнение

$$\frac{dr_0(r_0 \lambda \sec \theta_0 - 2d)}{4H(r_0 \lambda - d \cos \theta_0)^2} + \operatorname{tg} \theta_0 = 0. \quad (12)$$

Корнями этого уравнения будут

$$r_{h1,2} = \frac{\cos \theta_0 (d^2 + 4dH_0 \lambda \sin \theta_0 \pm \sqrt{d^3 (d + 4H_0 \lambda \sin \theta_0)})}{\lambda (d + 4H_0 \lambda \sin \theta_0)}, \quad (13)$$

где r_h – расстояние от ДА, при котором струя достигает максимальной высоты подъема, м.

Траектории полета струи отвечает второй корень. Подставляя его в уравнение (7), решая относительно h_0 и учитывая h_1 , получим максимальную высоту полета струи:

$$h_{\max} = \frac{d^2 + 2dH_0\lambda \sin \theta_0 - \sqrt{d^3(d + 4H_0\lambda \sin \theta_0)}}{2H_0\lambda^2} + h_1. \quad (14)$$

Перейдем непосредственно к определению неизвестных величин, входящих в формулы (2), (4), (7), (9). Минимально допустимый напор перед соплом определяется выражением [10]

$$H_0 = \frac{1,126 \cdot 10^2}{\varphi^2 d_k^2}, \quad (15)$$

где φ – коэффициент скорости сопла; d_k – диаметр капли, мм (по агротехническим требованиям $d_k = 1,5$ мм).

Согласно [1],

$$\varphi = 1 - 0,12 \sin \frac{\alpha_c}{2}, \quad (16)$$

где α_c – угол конусности сопла, рад.

По рекомендациям Б. М. Лебедева [1, с.53], угол конусности α_c должен находиться в пределах 60–100°, по другим данным [9, с. 179] – 40–50°. Изучая рекламно-информационные проспекты и сайты зарубежных производителей дождевальнoй техники, можно сделать вывод, что угол α_c должен быть 35–50° [11], поэтому принимаем $\alpha_c = 45^\circ$.

Для определения диаметра сжатой струи воспользуемся следующей формулой [1]:

$$d = d_0 \left(1 - 0,16 \sin \frac{\alpha_c}{2}\right). \quad (17)$$

Тогда, рассчитывая по формуле (15), напор перед ДА должен быть не менее 54,98 м. Относительный напор, определяемый по формуле [10]

$$\varepsilon_H = \frac{H_0}{d_0}, \quad (18)$$

составит 3458. Согласно справочным данным [8, 13], для получения дождя высокого качества $\varepsilon_H = 2000$ –2600, т. е. для снижения удельных затрат мощности и повышения производительности целесообразно увеличить d_0 до 21,1–27,5 мм.

Используя формулы (2), (9)–(11), (14)–(18), определим границы выходных гидравлических параметров водопроводящей системы, а также кинематических характеристик дождевальнoй струи, при которых будет получаться дождь, соответствующий агротехническим требованиям:

$H_0 \geq 54,98$ м; $Q = 39,26$ –66,68 м³/ч; $d = 19,8$ –25,8 мм; $d_0 = 21,1$ –27,5 мм; $\theta_0 = 0,52$ –0,58 рад; $h_1 = 2,00$ м; $r = 44,32$ –52,21 м; $R = 37,67$ –44,38; $h_{\max} = 8,23$ – 8,84 м.

Известно также, что максимально возможный расход воды (м³/ч) можно рассчитать по формуле [1]

$$Q = 0,0036 \frac{\mu \pi d_0^2}{4} \sqrt{2gH_0}, \quad (19)$$

где μ – коэффициент расхода, равный 0,95.

Тогда формула (2) с учетом (9), (11) и (19) после преобразований примет вид

$$i_F = \frac{2\sqrt{2}\pi\mu d_0^2 \sqrt{gH_0} (d + 4H_0\lambda \sin \theta_0)^2}{k_r^2 \alpha [4H_0 \cos \theta_0 (d \sin \theta_0 - h_1\lambda)]} + \frac{2\sqrt{2}\pi\mu d_0^2 \sqrt{gH_0} (d + 4H_0\lambda \sin \theta_0)^2}{\sqrt{16dH_0h_1 (d + 4H_0\lambda \sin \theta_0) \cos^2 \theta_0 + (4H_0h_1\lambda \cos \theta_0 - 2dH_0 \sin 2\theta_0)^2}}. \quad (20)$$

Таким образом, формула (20) связывает выходные гидравлические параметры водопродвигательной системы, конструктивные параметры ДА и кинематические характеристики дождевальной струи.

Графическая интерпретация зависимостей $R = f(\theta, H_0, h_1)$, $H_0 = f(h_1)$ и $i = f(H_0)$ представлена на рис. 2 и 3.

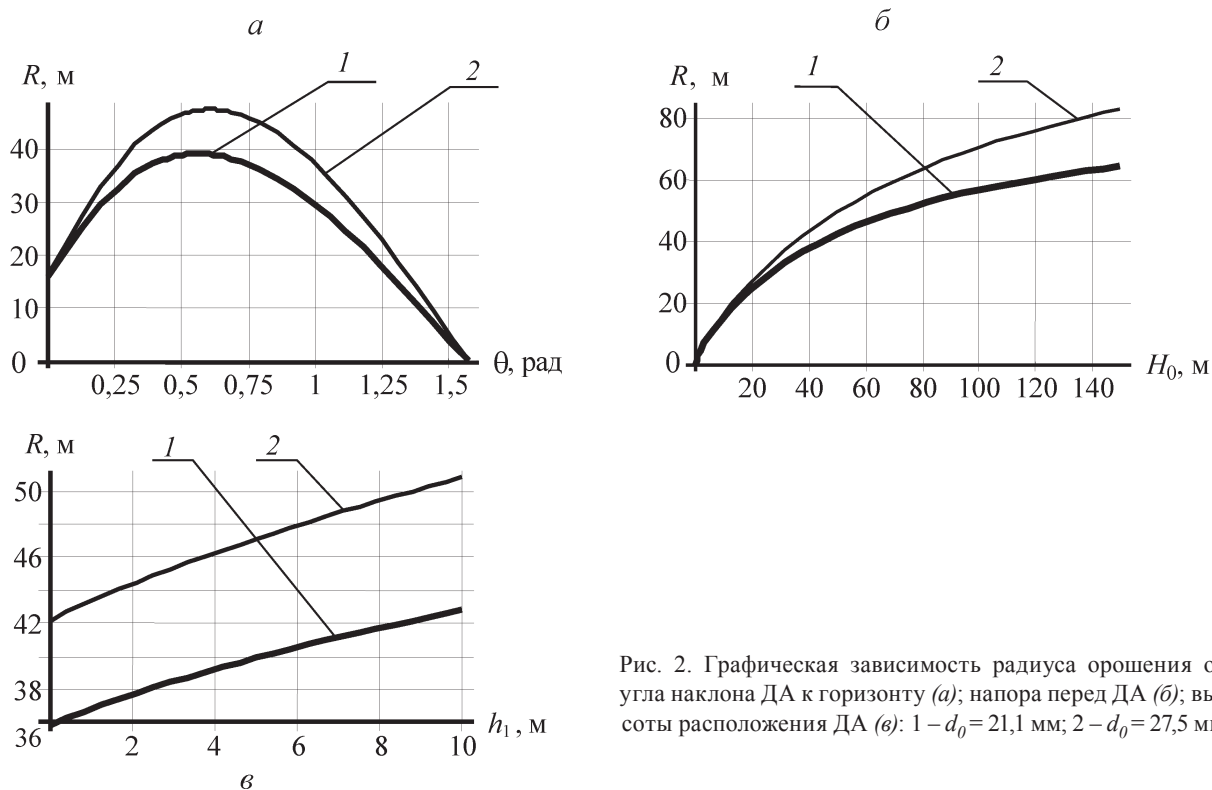


Рис. 2. Графическая зависимость радиуса орошения от угла наклона ДА к горизонту (а); напора перед ДА (б); высоты расположения ДА (в): 1 – $d_0 = 21,1$ мм; 2 – $d_0 = 27,5$ мм

Анализируя графическую зависимость радиуса орошения R от угла наклона ДА к горизонту θ при $d_0 = 21,1-27,5$ мм (рис. 2, а), следует отметить, что максимальных значений от 37,67 до 44,38 м радиус R достигает в диапазоне изменения угла $\theta = 0,52-0,58$ рад. Тем не менее в расчетах принималось $\theta = 0,4$ рад = 23° , так как при таком угле дождевальная струя меньше подвержена влиянию ветра, поэтому указанное значение принято у большинства ведущих производителей дождевальной техники [13, 14].

Как видно из рис. 2, б и 3, б, на производительность дождевальной установки и характеристики искусственного дождя в значительной мере влияет напор H_0 перед соплом ДА. Как отмеча-

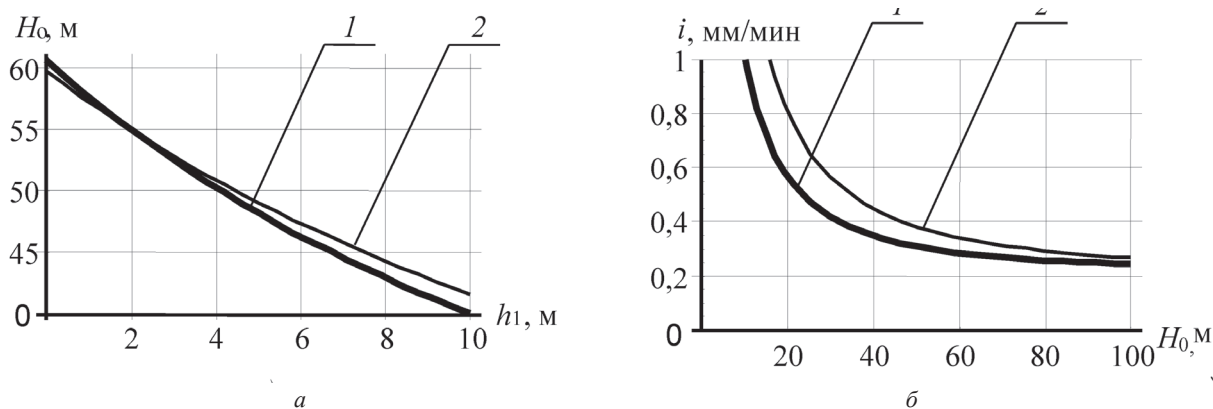


Рис. 3. Графические зависимости: а – напора от высоты расположения ДА; б – интенсивности от напора: 1 – $d_0 = 21,1$ мм, 2 – $d_0 = 27,5$ мм

лось ранее, при $H_0 = 54,98$ м получается дождь, соответствующий агротехническим требованиям. Дальнейшее повышение H_0 при постоянных конструктивных параметрах будет связано со значительными гидравлическими потерями, а следовательно, и затратами мощности. Интенсивность i при $H_0 = 54,98$ м будет изменяться в пределах 0,29–0,35 мм/мин (соответственно при $d_0 = 21,1$ –27,5 мм), что вполне допустимо для прерывистого дождевания [1, с. 15; 5].

Увеличение высоты расположения ДА h_1 приведет к некоторому возрастанию радиуса орошения, но также и к убыванию напора H_0 , о чем можно судить из рис. 2, в и 3, а. Так, при $d_0 = 21,10$ мм и изменении h_1 от 0 до 2,00 м произойдет увеличение R на величину $r_1 = 2,26$ м и понижение напора H_0 с 60,64 до 54,98 м. Радиус орошения R с учетом изменения двух факторов составит 44,38 м. Он остается постоянным и при дальнейшем увеличении h_1 , т. е. имеет место уравновешивание влияния этих факторов на выходную функцию (в данном случае R).

Анализ структуры и энергетических показателей образуемого искусственного дождя. Средний слой осадков за цикл полива определяется по формуле [3]

$$h_{\text{сл}} = i_{\text{ср}} t. \quad (21)$$

Так как

$$i = \frac{Q}{F}, F = lb, \text{ а } t = \frac{l}{V_t},$$

то получим

$$h_{\text{сл}} = \frac{Q}{V_t b} = \frac{Q}{2V_t R}, \quad (22)$$

где $h_{\text{сл}}$ – средний слой осадков, м; l – длина орошаемой полосы, м; b – ширина орошаемой полосы, м; V_t – теоретическая скорость движения ДА, м/ч.

При заданных значениях H_0 , d_0 (или Q) и b величина слоя осадков является функцией изменения скорости V_t . Графически эта зависимость представлена на рис. 4. Как видим, изменение скорости движения ДА позволяет выдавать различную поливную норму. К примеру, чтобы получить поливную норму 300 м³/га, или 30 мм при $H_0 = 54,98$ м и $d_0 = 21,1$ мм, скорость движения ДА должна быть 0,29 м/мин.

Для полученных выходных гидравлических параметров водопроводящей системы проведем энергетический анализ характеристик образуемого искусственного дождя по следующим формулам.

Кинетическая энергия, приведенная к миллиметровому слою осадков, Дж/м²·мм [15]:

$$E = \frac{E}{i} = 0,5V_k^2, \quad (23)$$

где V_k – скорость падения капель, м/с.

Средняя удельная мощность, Вт/м² [16]:

$$M = 8,35 \cdot 10^{-7} i V_k^2. \quad (24)$$

Среднее значение критерия силы удара, Н [9]:

$$S_k^c = V_k d_k^2 N, \quad (25)$$

где $N = \frac{\pi}{6} \rho v_3$; ρ – плотность жидкости, м³/кг; v_3 – скорость распространения звука в воде, м/с.

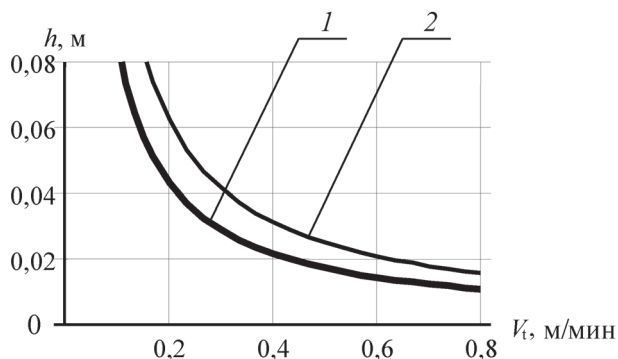


Рис. 4. График зависимости величины слоя осадков от скорости движения ДА: 1 – $d_0 = 21,1$ мм; 2 – $d_0 = 27,5$ мм

Расчетные значения скорости падения капель, м/с [16]:

$$V_k = \sqrt{V_{к,у}^2 \left(1 - e^{-\frac{2gh_{\max}}{V_{к,у}}}\right)}, \quad (26)$$

где $V_{к,у}$ – установившаяся скорость падения капли данного размера, м/с; e – основание натурального логарифма.

Концентрация дождя, м³/м³ [17]:

$$v = \frac{i}{V_k}. \quad (27)$$

Общее число капель [17]:

$$n = 3,18 \cdot 10^4 \cdot \frac{i}{V_k d^3}, \quad (28)$$

При расчетной скорости падения капель $V_k = 5,49$ м/с среднее значение критерия силы удара составит $S_k^c = 9,34$ Н. Аналогично работе [9], предполагаем, что естественный дождь благоприятен при размере капель до 2 мм, и при $V_k = 6,49$ м/с [16] предельное значение критерия силы удара составит $S_k^{np} = 19,6$ Н. Как видим, $9,34 \text{ Н} < 19,6 \text{ Н}$.

Кинетическая энергия, приведенная к миллиметровому слою осадков, равна 15,07 Дж/м²·мм; удельная мощность – 0,06 Вт/м². Согласно [6, 7], предельные значения указанных показателей должны быть 24 Дж/м²·мм и 0,12 Вт/м² соответственно; $15,07 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{мм} < 24 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{мм}$ и $0,06 \text{ Вт/м}^2 < 0,12 \text{ Вт/м}^2$.

Качественные показатели дождя по классификации, данной В. Гемфрисом [18], будут следующими: концентрация дождя $v = 7,58 \cdot 10^{-7}$ м³/м³, количество капель на 1 м³ $n = 429$. Следовательно, образуемый искусственный дождь соответствует агротехническим требованиям и не превышает градацию «сильный дождь».

Выводы. Для образования искусственного дождя, соответствующего агротехническим требованиям, оптимальными пределами изменения выходных гидравлических параметров водопроводящей системы для диапазона значений диаметров выходного сечения сопла 21,1–27,5 мм следует считать: напор на входе в дождевальную аппаратуру – не менее 54,98 м; расход – 39,26–66,68 м³/ч (соответственно при интенсивности 0,29–0,35 мм/мин). При этом кинематические параметры дождевальной струи будут иметь следующие значения: диаметр сжатой струи – 19,8–25,8 мм, угол наклона ДА к горизонту – 0,4 рад, высота расположения ДА – 2,00 м, дальность полета струи – 44,32–52,21 м, действительный радиус орошения – 37,67–44,38 м, максимальная высота полета струи – 8,23–8,84 м.

Литература

1. Лебедев Б. М. Дождевальные машины. М.: Машиностроение, 1977.
2. Костяков А. Н. Основы мелиораций. М.: Сельхозгиз., 1960. С. 134–135.
3. Степа Б. Г. Механизация полива: Справ. М.: Агропромиздат, 1990. С. 117–122.
4. Сапунков А. П. Применение дождевальной техники: современные тенденции. М.: Агропромиздат, 1991. С. 8–12.
5. Миленин Б. О. // Гидротехника и мелиорация: Работы молодых ученых М., ВАСХНИЛ, 1968. С. 60–70.
6. Ольгаренко Г. В. // Проблемы и перспективы развития орошаемого земледелия. Вып. 30. Новочеркасск, 2000. С. 212–215.
7. Ольгаренко Г. В. // Проблемы мелиорации и орошаемого земледелия юга России: Материалы совмест. выезд. засед. коллегии Минсельхоза и Президиума Россельхозакадемии, 14–15 июня 2001 г. Ростов н/Д, 2001. С. 106–117.
8. Миршелев В. Исследование дальности полета струи дождевальных аппаратов // Гидротехника и мелиорация. 1985. № 2. С. 70–73.
9. Исаев А. П. Гидравлика дождевальных машин. М.: Машиностроение, 1973. С. 127–155.
10. Жарский М. А. Совершенствование гидравлического расчета струйных дождевальных аппаратов // Механизация мелиоративных работ: Сб. науч. тр. Горки, 1997. С. 9–14.
11. Agrometer lager-og butikskatalog // [Electronic resource]. 2006. Mode of acces: <http://www.agrometer.dk/documents/00159.pdf>. Дата доступа: 15.03.2007.

12. В ы с о ч к и н а Л. И., К о к у р и н И. С. Переводить дождевальные системы на низконапорный режим работы нецелесообразно // Мелиор. и водн. хоз. 2003. № 3. С. 39–40.
13. В у к о л о в В. В. Перспективный ряд дождевальных аппаратов // Тракт. и с-х. машины. 2001. № 7. С. 36–37.
14. К о з л о в А. И., О л е ф и р Е. П., Р ы ч к о в Ю. Н. Новые конструкции дождевальных аппаратов // Мелиор. и водн. хоз. 1989. № 5. С. 38–39.
15. М о с к о в к и н В. М. Оценка капельно-ударных характеристик искусственного дождя // Гидротехника и мелиорация. 1982. № 3. С. 39–41.
16. Ш в е б с Г. И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. С. 70–76.
17. Г у б е р К. В., Л я м п е р т Г. П., Х р а б р о в М. Ю. Требования, предъявляемые к дождевальной технике // Тракт. и с-х. машины. 1998. № 8. С. 34–35.

V.N. DASHKOV, A.N. BASAREUSKI

**SUBSTANTIATION OF THE OPTIMUM OUTPUT
HYDRAULIC PARAMETERS OF A WATER SYSTEM OF A DRUM-TYPE SPRINKLER**

Summary

In the article, proceeding from the agrotechnical demands, optimum boundary lines of target hydraulic parameters of a water system and motion characteristics of an irrigating jet of a drum-type sprinkler are determined. Formulas-determination of a jet range and heights are obtained in view of the position of the sprinkler above the earth surface. A graphical interpretation of the dependences connecting hydraulic and kinematic parameters is given. The analysis of the structure and power parameters of a formed artificial rain is made. It is shown that at constant values of flow rate irrigation radius the magnitude of a layer of a rainfall is a function of a speed. It is established that the high-quality artificial rain for a range of values of nozzle diameters 21.1–27.5 mm will be gained at a pressure of no less than 54.98 m and flow rate of 39.26–66.68 m³/h (at a rain intensity of 0.29–0.35 mm/min, respectively).