

УДК 614.84

**ТЕОРИЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ ФОРСУНКАМИ**

**Иванов Б.Л., Зиганшин Б.Г., Шарафеев Р.Ф., Сагбиев И.Р.**

**Реферат.** Рассмотрены основные характеристики и приведены расчеты основных показателей форсуночных устройств. Проведены лабораторные испытания форсунок различных конфигураций, с целью определения рабочей ширины пятна при различном расстоянии до орошаемой поверхности и угле факела распыла, а также установлены зависимости по определению эффективного режима их работы. В результате испытаний форсунок с различными формами распыла при определении ударной силы струи выявлено, что по мере увеличения угла распыла факела значение ударной силы струи  $F$  уменьшается. Это связано с тем, что при увеличении начальной скорости струи длина факела достигает максимума, при этом не только растёт кинетическая энергия, но и уменьшаются размеры (диаметры) капель распыляемой среды, что приводит к уменьшению массы капель и увеличению аэродинамического сопротивления частиц струи факела. Разработан стенд для определения ударной силы струи различных форсунок и получены результаты испытаний. В ходе эксплуатации из-за эрозионного изнашивания сопловых отверстий форсунок увеличивается их диаметр, в результате падает рабочее давление распыливания, увеличивается число и размер крупных частиц. Поэтому, необходимо периодически проверять диаметр отверстий сопел и не использовать форсунки, у которых диаметр отверстий больше начального на 10 и более процентов. При исследовании форсунок установлены зависимости характеристик форсунок от начальных параметров истечения струи жидкости до дисперсности и формы факела. Установлены значения ширины пятна орошения в зависимости от угла факела и расстояния от форсунки до орошаемой поверхности. Определена величина силы удара струи, которая возникает в месте контакта струи жидкости с орошаемой поверхностью.

**Ключевые слова:** Распыление, форсунка, форма распыла, угол распыла факела, ударная сила струи, орошаемая поверхность.

**Введение.** Во многих отраслях имеется ряд задач, которые уже в течение длительного времени особенно эффективно решаются при помощи форсуночных устройств.

Оптимальный результат достигается только в тех случаях, когда с момента планирования до этапа реализации применяются высокотехнологичные технические решения в той или иной отрасли [1].

При этом для решения одной и той же проблемы зачастую могут быть использованы принципиально разные форсунки.

Для того чтобы обеспечить выбор наиболее эффективного решения в каждом конкретном случае, необходимо провести обзор и анализ рабочих характеристик форсуночных устройств [2,3,4].

**Анализ и обсуждение результатов исследования.** К основным характеристикам форсунок относятся: расход (производительность), корневой угол факела форсунки, ширина распыла, размер капель распыляемой среды, ударная сила струи.

Расходный показатель форсунки зависит от давления жидкости на входе в форсунку [5,6].

Теоретическую зависимость расхода и давления описывает следующая формула:

$$Q = k \cdot \sqrt{P_1 - P_2},$$

где:  $Q$  – расход жидкости через форсунку, л/с;

$k$  – коэффициент пересчета;

$P_1$  – рабочее давление жидкости в системе, кг/см<sup>2</sup>;

$P_2$  – потери давления в трубопроводах и в форсунке, кг/см<sup>2</sup>.

Для расчета расходного показателя какой-либо форсунки при распылении жидкости, отличающейся от воды плотностью, расходный показатель необходимо умножить на коэффициент пересчета этой жидкости. Плотность является отношением массы объема какой-либо жидкости к массе того же объема воды [7]. Данный коэффициент пересчета учитывает только влияние плотности на расход и не учитывает никаких других факторов влияния. Значения коэффициента пересчета приведены в табл. 1.

Из зависимости расходной характеристики и давления вытекает, что при увеличении давления в 4 раза расход распыляемой жидкости

Таблица 1 – Значения коэффициента пересчета

№ п/п	Плотность	Коэффициента пересчета
1	0,84	1,09
2	0,96	1,02
3	1,00 (вода)	1,00
4	1,09	0,95
5	1,20	0,91
6	1,32	0,87
7	1,44	0,83
8	1,69	0,77

Таблица 2 – Значения ширины пятна орошения в зависимости от угла факела и расстояния от форсунки до орошаемой поверхности

Угол факела распыла	Ширина пятна при различном расстоянии до орошаемой поверхности, см.											
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100
5°	0,4	0,9	1,3	1,8	2,2	2,6	3,5	4,4	5,2	6,1	7,0	8,7
15°	1,3	2,6	4,0	5,3	6,6	7,9	10,5	13,2	15,8	18,4	21,1	26,3
25°	2,2	4,4	6,7	8,9	11,1	13,3	17,7	22,2	26,6	31,0	35,5	44,3
35°	3,2	6,3	9,5	12,6	15,8	18,9	25,2	31,5	37,8	44,1	50,5	63,1
45°	4,1	8,3	12,4	16,6	20,7	24,9	33,1	41,4	49,7	58,0	66,3	82,8
55°	5,2	10,4	15,6	20,8	26,0	31,2	41,7	52,1	62,5	72,9	83,3	104
65°	6,4	12,7	19,1	25,5	31,9	38,2	51,0	63,7	76,5	89,2	102	127
75°	7,7	15,4	23,0	30,7	38,4	46,0	61,4	76,7	92,1	107	123	153
85°	9,2	18,3	27,5	36,7	45,8	55,0	73,3	91,6	110	128	147	183
95°	10,9	21,8	32,7	43,7	54,6	65,5	87,3	109	131	153	175	218
110°	14,3	28,6	42,9	57,1	71,4	85,7	114	143	171	200	229	286
120°	17,3	34,6	52,0	69,3	86,6	104	139	173	208	243	–	–
130°	21,5	42,9	64,3	85,8	107	129	172	215	257	–	–	–
140°	27,5	55,0	82,4	110	137	165	220	275	–	–	–	–
150°	37,3	74,6	112	149	187	224	299	–	–	–	–	–
160°	56,7	113	170	227	284	–	–	–	–	–	–	–
170°	114	229	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

увеличиваться примерно в 2 раза. Кроме этого, повышенное давление введет к уменьшению размера капель и оказывает влияние на угол распыла, а также на степень покрытия орошаемой поверхности [8,9].

Необходимо отметить, что плотность и вязкость распыляемой жидкости оказывают влияние на объем проходящего через форсунку потока (расход) [4,8].

Авторами настоящей статьи в лабораторных условиях были проведены исследования форсунок с различными углами распыла жидкости. В качестве распыляемой среды взята вода с температурой 25 °С. В основу этих расчетов было положено теоретическое допущение, что угол факела распыла остается неизменным по всей длине струи.

Опытные значения ширины пятна орошения в зависимости от угла факела и расстояния от форсунки до орошаемой поверхности приведены в табл. 2.

В приведенной таблице прочерками отмечены ячейки, где практически не происходит покрытия жидкостью орошаемой поверхности ввиду сноса капель, другими словами, качество покрытия орошаемой поверхности зависит не только от рабочего давления, но и от расстояния до орошаемой поверхности и угла факела форсунки.

Размер капли является ключевым фактором при выборе распылителя. Например, более мелкие частицы из-за малых размеров и веса длительно остаются во взвешенном состоянии. Время «зависания» таких частиц в разы больше, чем при обычном крупнокапельном орошении, кроме того, мелкодисперсные

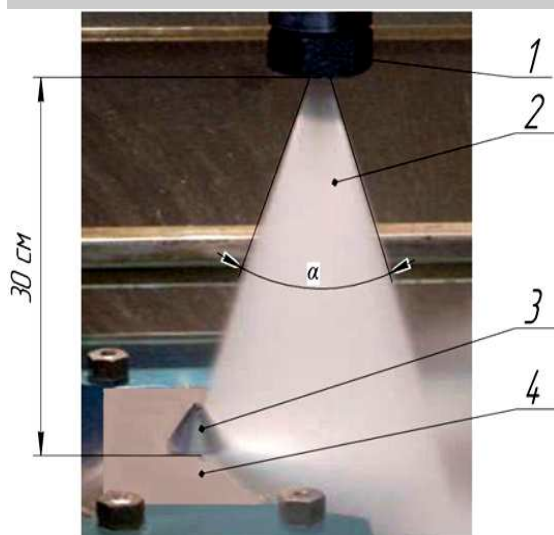
частицы жидкости распределяются равномернее и площадь взаимодействия с орошаемой поверхностью увеличивается [10].

При диспергировании жидкости капли имеют самые разные размеры. Диапазон размеров называется спектром капель. Спектр капель зависит от вида распыляемой жидкости, расхода, давления, формы угла факела и значительно отличается от формы к форме. Наименьшие по размеру капли (мелкодисперсный распыл) достигаются форсунками двухфазных сред, самые крупные – полноконусными форсунками при гидравлическом распылении [10,11].

Для того чтобы иметь возможность сравнивать размеры капель различных типов форсунок, необходимо брать за основу средний диаметр частиц. Размер капли указывается в микронах. Существует множество методов определения размера капель. Наиболее распространенными являются: методы среднемассового диаметра, диаметр по Заутеру и средний числовой диаметр [12].

Метод среднемассового диаметра – определение размеров капель по отношению к распыленному объему.

В основу метода среднемассового диаметра положено предположение, что из общего объема распыленной жидкости 50% капель больше по размеру, и 50% меньше, чем средний показатель. Метод диаметра по Заутеру – определения дисперсности распыления по отношению к созданной общей поверхности струи. Диаметр по Заутеру определяется отношением объема поверхности к общей орошаемой поверхности всех капель. Метод среднего



$\alpha$  – угол факела распыла; 1 – распылитель; 2 – факел;  
3 – чувствительный сенсор; 4 – орошаемая поверхность  
Рисунок 1 – Схема стенда для определения ударной силы струи

числового диаметра основан на определении размера капли по отношению к количеству капель в факеле распыла и исходит из того, что из общего числа капель 50% меньше, а 50% больше, чем средний диаметр капель.

К основным факторам процесса диспергирования жидкости при контакте струи с орошаемой поверхностью относятся, скорость истечения струи, скорость распространения ударной силы струи (ударной волны), давление струи с орошаемой поверхностью, сила расплющивания капли жидкости в момент удара ее об орошаемую поверхность, динамическая вязкость жидкости и величина поверхностного натяжения [13].

Для определения ударной силы струи исследованы форсунки с различными характеристиками распыла. Для этого были установлены форсунки на расстоянии 30 см от орошаемой поверхности (рисунок 1). Распыление жидкости (воды) осуществлялось с рабочим давлением

4 МПа при фиксированном угле распыла факела.

Для измерения распространения ударной силы и удельного давления струи использовали чувствительный сенсор 3, который установлен на орошаемой поверхности 4. Чувствительный сенсор реагирует на давление, оказываемое на него. Действующее на него давление преобразуется в электрический сигнал и фиксируется измерительным прибором. Существенное влияние на равномерность воздействия струи на орошаемую поверхность оказывает значение ударной силы. Особое практическое значение эти данные имеют при использовании высокого давления, так как в этом случае речь идет о максимальном пре-

вращении рабочего давления насосной установки в очистительное действие орошаемой поверхности.

Величина ударной силы или воздействие факела распыла на поверхность орошения измеряется в Н/см<sup>2</sup>. В целом, ударная сила зависит от формы и угла факела распыла  $\alpha$ . Для того, чтобы рассчитать ударную силу форсунки, необходимо вычислить теоретическую ударную силу с помощью формулы [13]:

$$I_T = m \cdot Q \cdot \sqrt{P},$$

где:  $m$  – масса средней капли,  $m = 0,0024$  кг;

$Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.;

$P$  – давление, которое действует на чувствительный сенсор, Па.

Фактическая ударная сила форсунки  $I_\Phi$  определяется путем умножения теоретической ударной силы на процентное значение силы удара:

$$I_\Phi = I_T \cdot F,$$

где:  $I_T$  – теоретическая ударная сила, Па;

$F$  – сила удара, %.

Таблица 3 – Результаты испытаний по определению силы удара струи

Форма распыла	Угол распыла факела, $\alpha$	Сила удара $F$ от $I_T$ , %
Плоскоструйный распыл	15°	30
	35°	13
	55°	11
	75°	8,0
Полноконусный распыл	15°	11
	35°	2,5
	55°	1,0
	75°	0,3
Полоконусный распыл	65°...85°	1,0...2,0

В результате испытаний форсунок с различными формами распыла при определении ударной силы струи выявлено, что по мере увеличения угла распыла факела значение ударной силы струи  $F$  уменьшается. Это связано с тем, что при увеличении начальной скорости струи длина факела достигает максимума, при этом не только растет кинетическая энергия, но и уменьшаются размеры (диаметры) капель распыляемой среды, что приводит к уменьшению массы капель и увеличению аэродинамического сопротивления частиц струи факела [14].

Необходимо отметить, что при уменьшении диаметра отверстий сопел, давление и скорость истечения жидкости растут, вследствие чего, уменьшаются размеры частиц, угол распыла факела, а длина и ударная сила струи, наоборот, уменьшаются.

В ходе эксплуатации из-за эрозионного

изнашивания сопловых отверстий форсунок увеличивается их диаметр, в результате падает рабочее давление распыливания, увеличивается число и размер крупных частиц. Поэтому, необходимо периодически проверять диаметр отверстий сопел и не использовать форсунки, у которых диаметр отверстий больше начального на 10 и более процентов.

**Заключение.** Таким образом, при исследовании форсунок установлены зависимости

характеристик форсунок от начальных параметров истечения струи жидкости до дисперсности и формы факела. Установлены значения ширины пятна орошения в зависимости от угла факела и расстояния от форсунки до орошаемой поверхности. Определена величина силы удара струи, которая возникает в месте контакта струи жидкости с орошаемой поверхностью.

#### Литература

1. Иванов Б.Л. Дисперсные системы для технических средств распыления дезрастворов/ Иванов Б.Л., Рудаков А.И., Нафиков И.Р.// Тр. междунар. научн. конф. «Математ. методы в технике и технологиях», секция 3, Псков, 2009 г. с. 25-27.
2. Патент на полезную модель РФ №119264 «Пневматический распылитель»/Иванов Б.Л., Лушнов М.А., Маркин О.Ю., Нафиков И.Р., Рудаков А.И.//Заявл. 28.02.2012; Оpubл. 28.08.2012. Бюл. №23.
3. Патент на полезную модель РФ № 123475 «Струйный распылитель жидкостей»/Иванов Б.Л., Лушнов М.А., Маркин О.Ю., Нафиков И.Р., Рудаков А.И.//Заявл. 28.02.2012; Оpubл. 27.12.2012; Бюл. №36.
4. Андрижьевский А.А. Механика жидкости и газа: учебное пособие / А.А. Андрижьевский. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 208 с.
5. Гельфанд Б. Е. Разрушение капель жидкости / Б. Е. Гельфанд, М.В. Сильников, К. Такаяма. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. – 306 с.
6. Котоусов Л.С. Исследование скорости водяных струй на выходе из сопел с различной геометрией // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, вып. 9. – С. 8-14.
7. Симаков Н.Н. Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки// ЖТФ. 2004. – Т. 74, вып. 2. С.46-50.
8. Анаников С.В. О движении капли в свободной струе/ С.В. Анаников, Е.В. Поляков // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 1977. - №1. С.11-16.
9. Терехов В.И. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости/ В.И. Терехов, В.В. Терехов, Н.Е. Шишкин, К.Ч. Би// Инж.-физ. журнал. 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
10. Han Z., Parrish E., Farrell P.Y., Reitz R.D. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays // Atom. Sprays. 1997. – Vol. 7. – P. 663-684.
11. Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде. – М.: Мир, 1986. – 314 с.
12. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. P.308 – 316.
13. Васильев А.Ю., Майорова А.И., Физические особенности дробления жидкостей различными способами распыливания, ТВТ, 2014, том 52, выпуск 2, С. 261–270.
14. Handbook of Atomization and Sprays / Ed. Naser Ashgriz. N.Y.: Springer, 2011. P. 935.

#### Сведения об авторах:

Иванов Борис Литта – ст. преподаватель кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе, e-mail: lit-tab@mail.ru

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор, профессор РАН, e-mail: zig-anb6@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

Шарафеев Рустем Фаридович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: sharafeevrf@mail.ru

Сагбиев Ильгизар Раффакович – д.т.н., профессор, e-mail: sagbiev@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

#### THEORY OF LIQUID DISPERSION BY THE NOZZLES

Ivanov B.L., Ziganshin B.G., Sharafiev R.F., Sagbiev I.R.

**Abstract.** The main characteristics are considered and calculations of the main indicators of nozzle devices are given. Laboratory tests of nozzles of various configurations were carried out to determine the working width of the spot at different distances to the irrigated surface and the angle of the spray pattern, and dependencies were established to determine their effective mode of operation. As a result of testing nozzles with different spray patterns when determining the impact force of the jet, it was found that as the spray angle increases, the value of the impact force of the jet  $F$  decreases. This is due to the fact, that with an increase in the initial jet velocity, the torch length reaches a maximum, not only does the kinetic energy increase, but the sizes (diameters) of the sprayed medium drops, which leads to a decrease in droplet mass and an increase in the aerodynamic resistance of the torch jet particles. A bench for determining the impact force of a jet of various nozzles was developed and test results were obtained. During operation, due to the erosive wear of the jet holes of the nozzles, its diameter increases, as a result, the working atomization pressure drops, and the number and size of large particles increase. Therefore, periodically it is necessary to check the diameter of the nozzle holes and not to use nozzles, that have a hole diameter greater than the initial one by 10 or more percent. In the study of nozzles, the dependences of noz-

zles' characteristics on the initial parameters of the outflow of the liquid jet to the dispersity and shape of the torch were established. The values of irrigation spot width are established depending on the angle of the torch and the distance from the nozzle to the irrigated surface. The magnitude of the impact force of the jet, which occurs at the point of contact of the fluid jet with the irrigated surface, is determined.

**Key words:** dispersion, nozzle, spray pattern, torch spray angle, impact force of stream, irrigated surface.

#### References

1. Ivanov B.L. *Dispersnye sistemy dlya tekhnicheskikh sredstv raspyleniya dezrastvorov*. // Tr. mezhdunar. nauchn. konf. "Matemat. metody v tekhnike i tekhnologii", sektiya 3. (Disperse systems for technical means of spraying disinfectants. / Ivanov B.L., Rudakov A.I., Nafikov I.R., Proceedings of International scientific conference "Mathematic methods in engineering and technology", section 3). Pskov, 2009. P. 25-27.
2. Patent na poleznuyu model RF №119264 "Pnevmaticheskiy raspylitel". [Pneumatic nebulizer]. / Ivanov B.L., Lushnov M.A., Markin O.Yu., Nafikov I.R., Rudakov A.I. // Zayavl. 28.02.2012; Opubl. 28.08.2012. Bul. №23.
3. Patent na poleznuyu model RF № 123475 "Struyunnyy raspylitel zhidkostey". [Jet fluid dispenser]. / Ivanov B.L., Lushnov M.A., Markin O.Yu., Nafikov I.R., Rudakov A.I. // Zayavl. 28.02.2012; Opubl. 27.12.2012; Bul. №36.
4. Andrizhievskiy A.A. *Mekhanika zhidkosti i gaza: uchebnoe posobie*. [Fluid and gas mechanics: study guide]. / A.A. Andrizhievskiy. – Minsk: Vysheyschaya shkola, 2014. – P. 208.
5. Gelfand B.E. *Razrushenie kapel zhidkosti*. [Destruction of liquid droplets]. / B.E. Gelfand, M.V. Silnikov, K. Takayama. – Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2008. – P. 306.
6. Kotousov L.C. *Investigation of the speed of water jets at the exit of nozzles with different geometries*. [Issledovanie skorosti vodyanykh struy na vykhode iz sopol s razlichnoy geometriey]. // ZhTF. – 2005. – Vol. 75, issue 9. – P. 8-14.
7. Simakov N.N. *Crisis resistance of drops at transition numbers of Reynolds in a turbulent two-phase flow of a spray torch of a mechanical nozzle*. [Krizis soprotivleniya kapel pri perekhodnykh chislakh Reynoldsa v turbulentnom dvukhfaznom potoke fakela raspyla mekhanicheskoy forsunki]. // ZhTF. 2004. – Vol. 74, issue 2. P. 46-50.
8. Ananikov S.V. Drop's motion in a free stream. [O dvizhenii kapli v svobodnoy strue]. / S.V. Ananikov, E.V. Polyakov // *Izv. VUZov. Aviatsonnaya tekhnika. – Proceedings of Institute of higher education. Aviation.* – 1977. - №1. P. 11-16.
9. Terekhov V.I. Experimental and numerical studies of non-stationary evaporation of liquid droplets. [Eksperimentalnoe i chislennoe issledovaniya nestatsionarnogo ispareniya kapel zhidkosti]. / V.I. Terekhov, V.V. Terekhov, N.E. Shishkin, K.Ch. Bi // *Inzh.-fiz. zhurnal. – Engineering and fizical journal*. 2010. Vol. 83, № 5. P. 829–836.
10. Han Z., Parrish E., Farrell P.Y., Reitz R.D. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays // *Atom. Sprays*. 1997. – Vol. 7. – P. 663-684.
11. Fuks N.A. *Isparenie i rost kapel v gazoobraznoy srede*. [Evaporation and growth of droplets in a gaseous medium]. – M.: Mir, 1986. – P. 314.
12. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique // *Measurement Science and Technology*. 2002. Vol. 13. P.308 – 316.
13. Vasilev A.Yu., Mayorova A.I. *Fizicheskie osobennosti drobleniya zhidkostey razlichnymi sposobami raspylivaniya, TVT*. [Physical features of the fragmentation of liquids by various methods of atomization], 2014, vol. 52, issue 2, P. 261–270.
14. Handbook of Atomization and Sprays / Ed. Naser Ashgriz. N.Y.: Springer, 2011. P. 935.

#### Authors:

Ivanov Boris Litta - Senior Lecturer of Machinery and equipment in agribusiness Department, e-mail: littab@mail.ru  
 Ziganshin Bulat Gusmanovich - Doctor of Technical sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, e-mail: zigan66@mail.ru  
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.  
 Sharafiev Rustem Faridovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sharafeevrf@mail.ru  
 Sagbiev Ilgizar Raffakovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sagbiev@mail.ru  
 Kazan National Research Technological University