

Обоснование конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя

Леонид Анатольевич Марченко¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: marchenko1312@mail.ru;

Максим Александрович Сафонов²,
преподаватель

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Колледж «Подмосковье», г. Клин, Российская Федерация

Реферат. Сельскохозяйственные штанговые опрыскиватели оснащаются инжекторными распылителями преимущественно зарубежного производства. Основные параметры инжекторных распылителей, приводимые в каталогах, отображают расходные характеристики в определенных диапазонах без учета конструктивных параметров. (*Цель исследования*) Обосновать конструктивно-технологические параметры инжекторного распылителя для внесения пестицидов. (*Материалы и методы*) Инжекторный распылитель относится к классу двухфазных жидкостно-газовых изотермических струйных аппаратов с образованием на выходе водовоздушной смеси. Установили, что расчетная модель рабочего процесса инжекторного распылителя основывается как на законах сохранения массы, энергии, импульса, на теоретических зависимостях в виде уравнений характеристики двухфазных струйных аппаратов, так и эмпирических зависимостях, характеризующих параметры потоков, геометрические поперечные и продольные размеры каналов распылителя. (*Результаты и обсуждения*) Получили следующие аналитические зависимости: относительного перепада давлений, создаваемого инжекторным распылителем, от объемного коэффициента инжекции при различных отношениях площади выходного отверстия рабочего сопла к сечению проточной части распылителя; отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла от коэффициента инжекции; относительного перепада давлений от коэффициента инжекции; отношения площади сечений камеры смешения и рабочего сопла от относительного перепада давлений. Определили совокупность безразмерных напорных характеристик инжекторного распылителя при различных отношениях площади сечения рабочего сопла к площади сечения камеры смешения. Установили, что с повышением коэффициента инжекции увеличивается отношение сечений площади камеры смешения к площади рабочего сопла. Показали, что для каждого коэффициента инжекции существует свой достижимый относительный перепад давления в инжекторном распылителе. (*Выводы*) Предложили расчетные уравнения, определяющие характеристики работы инжекторного распылителя и его основные конструктивные параметры – диаметры сопла и камеры смешения. Рассчитали основные размеры распылителя при авиационном способе внесения рабочих растворов пестицидов.

Ключевые слова: распылитель инжекторный, сопло, давление.

■ **Для цитирования:** Марченко Л.А., Сафонов М.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 31-38. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-31-38.

Determination of an Injection Sprayer's Technological Parameters

Leonid A. Marchenko¹,
Ph.D.(Eng), key researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;

Maksim A. Safonov²,
lecturer

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²«Podmoskovye» College, Klin, Russian Federation

Abstract. Agricultural boom sprayers are equipped with injection sprayers of mainly foreign origin. The main parameters of the injection sprayers shown in the catalogs display the consumption characteristics in certain ranges without taking into account the design parameters. (*Research purpose*) Determination of the design and technological parameters of an injection sprayer for the introduction of pesticides. (*Materials and methods*) The injection sprayer belongs to the class of

two-phase liquid-gas isothermal jet devices with the formation of an air-gas mixture at the outlet. It has been established that the design model of the working process of an injection sprayer is based both on the laws of the conservation of mass, energy, momentum, as well as theoretical relationships in the form of equations describing two-phase jet devices, and empirical relationships characterizing flow parameters, geometric transverse and longitudinal dimensions of the spray channels. (*Results and discussion*) The following analytical relationships have been obtained: the relative pressure difference generated by an injection sprayer and the volume injection coefficient for different surface area ratios of the working nozzle to the flow section of the sprayer; the ratio between the cross-sectional area of the mixing chamber to the area of the working nozzle outlet and the injection ratio; relative pressure difference and the injection ratio; the ratio between the cross-sectional area of the mixing chamber and the working nozzle and the relative pressure difference. The authors have determined a set of dimensionless pressure characteristics of the injection sprayer for different ratios between the cross-sectional areas of the working nozzle and the mixing chamber. It has been established that the ratio between the cross sections of the mixing chamber area and the working nozzle area increases as the injection ratio increases. It has been shown that for each injection coefficient, there is an achievable relative pressure difference in the injection sprayer. (*Conclusions*) The authors have proposed the design equations that determine the characteristics of an injection sprayer and its main design parameters – the diameters of nozzle and mixing chambers. They have calculated the main dimensions of the sprayer for aerial top-dressing by introducing working solutions of pesticides.

Keywords: injection sprayer, nozzle, pressure.

For citation: Marchenko L.A, Safonov M.A. Determination of an injection sprayer's technological parameters. *Selskokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(4): 31-38. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-31-38. (In Russian).

Эффективность работы сельскохозяйственных опрыскивателей характеризуется качеством внесения рабочих растворов пестицидов с установленной агротехнической нормой на каждом участке обрабатываемого поля, равномерным их распределением по ходу движения и на рабочей ширине захвата опрыскивателя, заданной густотой покрытия обрабатываемой поверхности растений и монодисперсным распылом. Из многочисленных факторов, влияющих на качество внесения пестицидов, одним из определяющих служит дисперсность распыла [1]. Монодисперсный распыл минимизирует снос пестицидов с обрабатываемого участка поля [2].

В настоящее время на опрыскивателях широко применяют инжекторные распылители, позволяющие создать относительно монодисперсный спектр капель, увеличить их объем за счет насыщения капель воздухом, что уменьшает снос капель при воздействии внешних факторов и повышает качество обработки посевов. Проведенные исследования показали эффективность таких распылителей [3-6]. Несмотря на широкое применение инжекторных распылителей в сельскохозяйственных опрыскивателях до настоящего времени оптимального метода расчета их параметров нет.

Цель исследования – обосновать конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя для внесения пестицидов.

Материалы и методы. Инжекторный распылитель относится к классу двухфазных жидкостно-газовых изотермических струйных аппаратов, в проточных каналах которого осуществляется подача

и смешение двух струй (жидкости и воздуха) с образованием на выходе газожидкостной смеси, поступающей далее в щелевое сопло, посредством которого она диспергируется на обрабатываемые растения в виде пузырьковых капель, насыщенных воздухом.

Расчетная модель рабочего процесса инжекторного распылителя основывается на законах сохранения массы, энергии, импульса, теоретических зависимостях в виде уравнений характеристики двухфазных струйных аппаратов, эмпирических зависимостях, характеризующих параметры потоков, геометрические поперечные и продольные размеры каналов распылителя. Характерной особенностью исследуемых инжекторных аппаратов является то, что полное давление газожидкостной смеси на выходе из аппарата больше полного давления газового компонента, но меньше полного давления рабочего потока жидкости на входе в аппарат, при этом массовый расход инжектируемого воздуха на несколько порядков меньше массового расхода рабочей жидкости, что предполагает использование объемного коэффициента инжекции. Основной характеристикой двухфазных струйных аппаратов, к которым относится инжекторный распылитель, служит зависимость относительного перепада давлений от отношения площадей сечений проточной части аппарата, коэффициента инжекции, гидравлических коэффициентов [7, 8]:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = F\left(\frac{f_3}{f_{p1}}, U_0, \varphi_1\right), \quad (1)$$

где ΔP_c – перепад давлений, создаваемый инжекто-



ром; ΔP_p – перепад давлений рабочего потока; f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения; f_{p1} – площадь выходного отверстия сечения рабочего сопла; U_0 – объемный коэффициент инжекции; φ_i – гидравлический коэффициент.

$$U_0 = \frac{V_n}{V_p}, \quad (2)$$

где V_n – объемный расход инжектируемой среды; V_p – объемный расход рабочей среды.

Схема инжекторного распылителя приведена на рисунке 1.

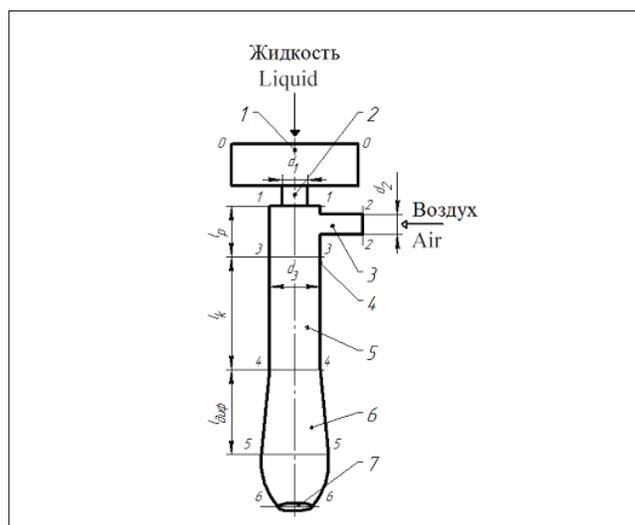


Рис. 1. Схема инжекторного распылителя:

1 – подведенный трубопровод; 2 – сопло рабочей; 3 – сопло воздушно; 4 – приемная камера; 5 – камера смешения; 6 – диффузор; 7 – сопло щелевое; 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 – сечения потоков жидкости, воздуха и смешанного потока в проточных камерах распылителя; d_1 – диаметр рабочего сопла; d_2 – диаметр воздушно сопла; d_3 – диаметр камеры смешения; l_p – расстояние от рабочего сопла до камеры смешения; l_k – длина камеры смешения; $l_{диф}$ – длина диффузора
Fig. 1. Diagram of the injection sprayer: 1 – a ducted pipeline; 2 – a working nozzle; 3 – an air nozzle; 4 – an inlet chamber; 5 – a mixing chamber; 6 – a diffuser; 7 – a slotted nozzle; 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 – sections of liquid, air and mixed flows in the flow chambers of the injection sprayer; d_1 – the working nozzle diameter; d_2 – the air nozzle diameter; d_3 – the mixing chamber diameter; l_p – the distance from the working nozzle to the mixing chamber; l_k – the mixing chamber length; $l_{диф}$ – the diffuser length

Для обоснования конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя в общем случае должны быть заданы следующие параметры: рабочий диапазон давлений рабочего P_p и инжектируемого P_n потоков, температура рабочей T_p и инжектируемой T_n сред, рабочий диапазон массовых расходов рабочего G_p и инжектируемого G_n потоков, рабочий диапазон значений объемно-

го коэффициента инжекции U_0 . Определяют оптимальное значение основного геометрического параметра – отношения площадей сечений цилиндрической камеры смешения f_3 и выходного отверстия сопла f_{p1} , рассчитывают геометрические параметры, влияющие на рабочую характеристику инжекторного распылителя.

Для расчета угла расширения внешней границы струи рабочего потока, характеризуемого величиной корневого угла факела распыла, воспользуемся зависимостью [9] в виде:

$$tg(\alpha/2) = CWe^k Lp^l M^m, \quad (3)$$

где α – угол расширения факела жидкости, распыленной струйным соплом; C, k, l – постоянные числа, полученные при обработке опытных данных; We – критерий Вебера; Lp – критерий Лапласа; M – критерий, характеризующий собой инерционные свойства газовой среды и жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для установления связи между давлением и скоростью в сечениях проточной части инжекторного распылителя составлена система уравнений Бернулли для рабочего потока в сопловом устройстве (сечения 0-0 и 1-1), рабочего потока, поступающего в камеру смешения (сечения 1-1 и 3-3), потока воздуха, поступающего в приемную камеру (сечения 2-2 и 3-3), для потока газожидкостной смеси, поступающей в диффузор (сечения 4-4 и 5-5) и внутренний корпус щелевой форсунки (сечения 5-5 и 6-6).

Система уравнений Бернулли замыкается уравнением импульсов в гидродинамической форме для контрольного отсека камеры смешения ограниченного сечения 3-3 и 4-4:

$$\frac{P_p}{\rho_p g} + \frac{\omega_p^2}{2g} = \frac{P_{p1}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p1}^2}{2g} (1 + \zeta_c), \quad (4)$$

$$\frac{P_{p1}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p1}^2}{2g} = \frac{P_{p3}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p3}^2}{2g} (1 + \zeta_{вх}), \quad (5)$$

$$\frac{P_n}{\rho_n g} + \frac{\omega_n^2}{2g} = \frac{P_{n3}}{\rho_n g} + \frac{\omega_{n3}^2}{2g} (1 + \zeta_{вх}), \quad (6)$$

$$\frac{P_{c4}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c4}^2}{2g} = \frac{P_{c5}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c5}^2}{2g} (1 + \zeta_{диф.}), \quad (7)$$

$$\frac{P_{c5}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c5}^2}{2g} = \frac{P_{c6}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c6}^2}{2g} (1 + \zeta_{щ.}), \quad (8)$$

где: $P_p, P_{p1}, P_n, P_{p3}, P_{n3}, P_{c4}, P_{c5}, P_{c6}$ – давления рабочего потока перед инжекторным распылителем, в выходном сечении рабочего сопла, инжектируемого потока перед инжекторным распылителем, рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения, смешанного потока в выходном сечении камеры смешения, на выходе из

диффузора и внутреннем корпусе щелевой форсунки соответственно;

$\omega_p, \omega_{p1}, \omega_n, \omega_{p3}, \omega_{n3}, \omega_{c4}, \omega_{c5}, \omega_{c6}$ – скорость рабочего потока перед инжекторным распылителем, на выходе из рабочего сопла, инжектируемого потока перед воздушным соплом, рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения, смешанного потока в выходном сечении камеры смешения, на выходе из диффузора и внутреннем корпусе щелевой форсунки;

ρ_p, ρ_n, ρ_c – плотность рабочего, инжектируемого и смешанного потоков;

$\zeta_c, \zeta_{вх}, \zeta_{диф}, \zeta_{щ}$ – коэффициенты сопротивления сопла, входа в камеру смешения диффузора и щелевой форсунки;

g – ускорение свободного падения.

Для замыкания системы уравнений (4)-(8) записывается уравнение импульсов в гидродинамической форме для контрольного отсека камеры смешения ограниченного сечения 3-3 и 4-4, характеризующее изменение количества движения, равное импульсу силы:

$$\begin{aligned} \varphi_2(G_p \omega_{p1} + G_n \omega_{n3}) + (G_p + G_n) \cdot \omega_{c4} = \\ = (P_{c4} - P_{n3})f_{n3} + (P_{c4} - P_{p1}) \cdot f_{p1} = \\ = P_{c4}f_3 - P_{n3}f_{n3} - P_{сн}f_{p1} - P_{p1}f_{p1} \end{aligned} \quad (9)$$

где φ_2 – коэффициент скорости потока смеси в камере смешения, учитывающий потери количества движения в камере смешения из-за трения ($\varphi_2 < 1$).

В уравнении (9) принимается, что площадь рабочего потока во входном сечении камеры смешения f_{p3} равна площади выходного отверстия рабочего сопла f_{p1} и скорость рабочего потока во входном сечении камеры смешения ω_{p3} равна скорости рабочего потока ω_{p1} в выходном сечении рабочего сопла.

Система уравнений (4)-(9) позволяет по известным параметрам рабочего и инжектируемого потоков на входе в инжекторный распылитель найти основные конструктивно-технологические параметры, определяющие эффективность работы распылителя.

В результате совместного решения уравнений Бернулли и уравнения импульсов выводят безразмерную характеристику инжекторного распылителя, аналогичная основной характеристике водовоздушного эжектора [8]:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \varphi_c^2 \frac{f_{p1}}{f_3} [2\varphi_{см} - (2 - \varphi_{диф.}^2) \frac{f_{p1}}{f_3} (1 + u_0)^2], \quad (10)$$

где ΔP_c – перепад давлений, создаваемый инжекторным распылителем; ΔP_p – перепад давлений рабочего потока; f_{p1} – площадь выходного отверстия сечения рабочего сопла; f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения; $\varphi_c, \varphi_{вх.см}, \varphi_{диф.}$ – коэффициенты скорости потока смеси в поперечном сечении сопла, входного участка камеры смешения, диффу-

зора; u_0 – объемный коэффициент инжекции;

$$\Delta P_c = \Delta P_c - P_{н3}; \Delta P_p = \Delta P_p - P_{п1}.$$

Используя уравнение (10), построим зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p = F(U_0)$ при ограничениях $0,1 \leq f_{p1} \leq 0,6$, представляющие собой совокупность безразмерных характеристик инжекторного распылителя (рис. 2). Параметром совокупности характеристик будет относительная величина сечений проточной части распылителя f_{p1}/f_3 . Из рисунка 2 следует, что зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p = F(U_0)$ расположены в нижней левой части координатной плоскости и ограничиваются осями ординат, абсцисс и огибающей кривой, которая определяет область возможных режимов работы распылителя и устанавливает предельные значения его параметров.

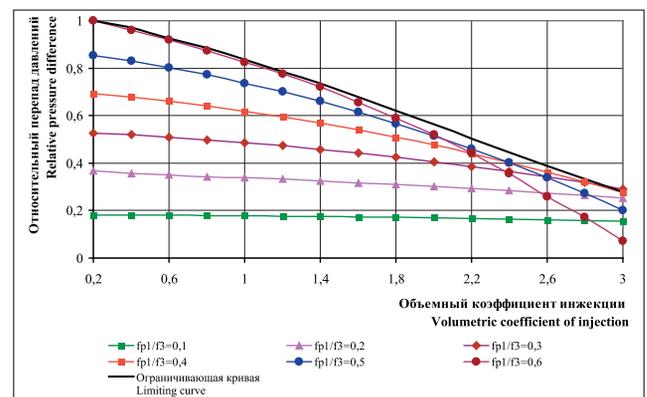


Рис. 2. Зависимость относительного перепада давлений $\Delta P_c/\Delta P_p$, создаваемого инжекторным распылителем, от объемного коэффициента инжекции U_0 при различных отношениях площади выходного отверстия рабочего сопла к сечению проточной части распылителя f_3/f_{p1}

Fig. 2. Relationship between the relative pressure $\Delta P_c/\Delta P_p$ difference made by the injection sprayer and the volumetric injection coefficient U_0 at different ratios of the outlet section of the working nozzle to the flowing part section of the injection sprayer f_3/f_{p1}

Дифференцируем уравнение (10) по переменной f_{p1}/f_3 , приравнявая производную к нулю, решаем полученное уравнение и делаем соответствующие преобразования, получаем зависимости для определения оптимального значения отношения сечений (f_{p1}/f_3), достижимого перепада давления $\Delta P_c/\Delta P_p = F(u_0)$ без необходимости расчета поперечных сечений сопла f_{p1} и камеры смешения f_3 и зависимость для определения оптимального отношения f_3/f_{p1} проточной части распылителя по заданному относительному перепаду давления $\Delta P_c/\Delta P_p$:

$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_{opt} = \frac{(2 - \varphi_{диф.}^2) \cdot (1 + U)^2}{\varphi_{см}}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \frac{\varphi_c^2 \cdot \varphi_{см}^2}{(2 - \varphi_{диф.}^2) \cdot (1 + u_0)^2}, \quad (12)$$



$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_{opt} = \varphi_c^2 \cdot \varphi_{cm} \cdot \frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} \quad (13)$$

На основании уравнения (11) построена зависимость $(f_3/f_{p1})_{opt} = F(U_0)$ (рис. 3), иллюстрирующая факт увеличения отношения сечений $(f_3/f_{p1})_{opt}$ с повышением коэффициента инжекции, то есть каждому оптимальному значению $(f_3/f_{p1})_{opt}$ соответствует свое значение коэффициента инжекции.

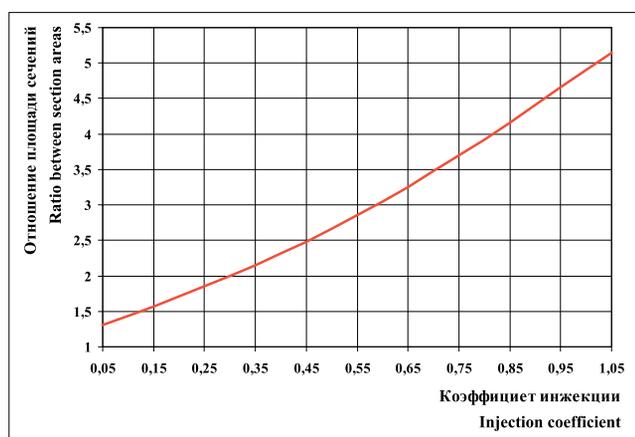


Рис. 3. Зависимость отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла f_3/f_p от коэффициента инжекции U_0

Fig. 3. Relationship between the ratio of the cross-sectional area of the mixing chamber to the outlet section area of the working nozzle f_3/f_p and the injection coefficient U_0

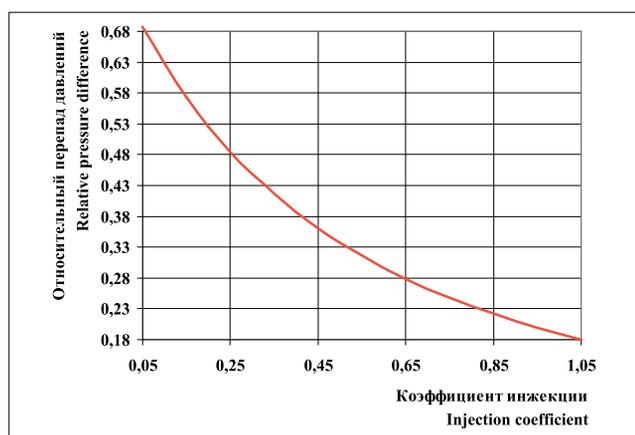


Рис. 4. Зависимость относительного перепада давлений $\Delta P_c/\Delta P_p$ от коэффициента инжекции U_0

Fig. 4. Relationship between the relative pressure $\Delta P_c/\Delta P_p$ difference and the injection coefficient U_0

На рисунке 4 представлена зависимость, рассчитанная по уравнению (12). Она показывает достижимый относительный перепад давления $\Delta P_c/\Delta P_p$ в инжекторном распылителе для каждого значения коэффициента инжекции.

Построенная по уравнению (13) зависимость оптимального отношения сечений $(f_3/f_{p1})_{opt}$ от перепада давлений $\Delta P_p/\Delta P_c$ имеет линейный характер,

и отношение сечений увеличивается с ростом перепада давлений (рис. 5).

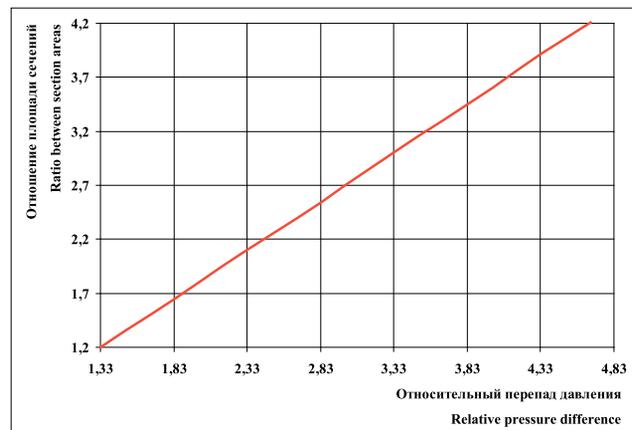


Рис. 5. Зависимость отношения площади сечений камеры смешения и рабочего сопла f_3/f_p от относительного перепада давлений P_p/P_p

Fig. 5. Relationship between the ratio of the cross-sectional area of the mixing chamber f_3/f_p and the working nozzle and the relative pressure difference P_p/P_p

Расход рабочей жидкости через один распылитель определяют, исходя из конструктивно-технологических параметров: нормы внесения рабочей жидкости H (кг/м²), рабочей ширины захвата B_p (м), рабочей скорости движения V_p (м/с) опрыскивателя, количества распылителей n_p на штанге. С учетом данных параметров площадь выходного отверстия рабочего сопла рассчитывают по формуле:

$$f_{p1} = \frac{H \cdot B_p \cdot V_p}{n_p \cdot \mu_c} \sqrt{\frac{1}{2\Delta P_p \nu_p}} \quad (14)$$

Зная значения f_{p1} , рассчитывают площадь камеры смешения f_3 и соответственно диаметры сопла d_1 и камеры смешения d_3 .

Расстояние l_p от выходного сечения рабочего сопла до входного сечения камеры смешения с учетом корневого угла факела, рассчитываемого по формуле (3) определяется отношением половины разности диаметров камеры смешения d_3 и рабочего сопла d_1 к значению тангенса половины угла расширения факела жидкости, распыленной струйным соплом.

Длина цилиндрической камеры смешения l_{kc} выбирается обычно в пределах 6-10 диаметров камеры смешения [8].

Площадь выходного сечения диффузора l_3 определяется по формуле:

$$f_{c5} = \frac{v_p \cdot \rho_p \cdot (1 + U_0)}{\rho_c \cdot \omega_{c5}} \quad (15)$$

где v_p – объемный расход рабочего потока; ρ_c, ρ_p – плотность смешанного и рабочего потоков соответственно; ω_{c5} – скорость смешанного потока на

выходе из диффузора. При известном значении площади f_c рассчитывают диаметр диффузора.

Скорость ω_{c3} в выходном сечении диффузора определяется по формуле:

$$\omega_{c5} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{c5}}{(1 + \xi_{\text{диф.}}) \cdot \rho_c}}, \quad (16)$$

где ΔP_{c5} – перепад давления водовоздушного потока на выходе из диффузора; ρ_c – плотность водовоздушной смеси.

Длину диффузора $l_{\text{диф.}}$ определяют по углу расширения диффузора как отношение половины разности диаметров выходного сечения диффузора d_{c5} и камеры смешения d_3 к значению тангенса половины угла расширения диффузора $\alpha_{\text{диф.}}$.

Угол расширения диффузора обычно выбирают в пределах $6 \leq \alpha_{\text{диф.}} \leq 10^\circ$, из расчета относительно низких значений коэффициента общих потерь давления в диффузоре, связанных с потерями на трение и расширение диффузора.

Оптимальным считается угол расширения диффузора $\alpha_{\text{диф.}} = 8^\circ$. Коэффициент сопротивления диффузора при значениях $\alpha_{\text{диф.}}$ в установленных пределах составляет $\zeta_{\text{диф.}} = 0,08 + 0,16 [10]$.

Диаметры сопла d_1 и камеры смешения d_3 служат определяющими размерами инжекторного распылителя, с которыми связаны все остальные диаметральные и линейные размеры.

Основные исходные данные при расчете инжекторного распылителя включают: пределы изменения давления рабочего потока перед соплом $P_{p\text{min}} \leq P_p \leq P_{p\text{max}}$; давление инжектируемого потока (воздуха) P_n ; давление смешанного потока P_{c5} на выходе из диффузора, обеспечивающего заданные нормы расхода жидкостно-воздушной смеси; пределы объемного коэффициента инжекции $U_{0\text{min}} \leq U_0 \leq U_{0\text{max}}$; плотности рабочей ρ_p , инжектируемой ρ_n сред; температуру рабочей T_p и инжектируемой T_n сред; динамическую μ_p и кинематическую γ вязкость рабочей среды; коэффициент поверхностного натяжения рабочей среды σ_p .

В качестве рабочего сопла распылителя, в соответствии с рекомендациями, выбрано короткое цилиндрическое сопло с соотношением длины к диаметру в пределах 1,5-2,0 [11, 12].

При истечении маловязких жидкостей (вода и другие) из коротких цилиндрических сопел при достаточно больших числах Рейнольдса коэффициент истечения изменяется незначительно, и в расчетах принимают следующие значения коэффициентов: сжатия $\varepsilon_c = 0,64$, скорости $\varphi_c = 0,97$, расхода $\mu_c [9-11]$.

Значения коэффициентов скорости входа в камеру смешения, в камере смешения и диффузора составляют соответственно: $\varphi_{\text{вх.см}} = 0,925$; $\varphi_{\text{см}} = 0,958$; $\varphi_{\text{диф.}} = 0,928$. Угол расширения диффузора 8° . Коэф-

фициент сопротивления цилиндрической камеры между выходным сечением диффузора и щелевым соплом $\zeta_{c6} [8, 13]$.

Давление инжектируемого воздуха перед воздушным соплом принято равным атмосферному давлению $P_n = 0,1$ МПа.

Давление смешанного потока на выходе из диффузора в пределах $P_{c5} = 0,3 + 0,7$ МПа выбирается из необходимости обеспечивать заданные нормы расхода водовоздушной смеси и процесс ее диспергирования.

Давление водовоздушного потока за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом принято равным $0,5 + 0,8$ МПа.

Основные физические свойства взаимодействующих сред: плотности рабочей $\rho_p = 1000$ кг/м³ и инжектируемой $\rho_n = 1,225$ кг/м³ сред; вязкость рабочей среды динамическая $\mu_p = 1,14 \cdot 10^{-3}$ (Па·с)/м³ и кинематическая $\gamma_p = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с; коэффициент поверхностного натяжения рабочей среды $\sigma_p = 72,25 \cdot 10^{-3}$ н/м; температура рабочей $T_p = 15^\circ\text{C}$ и инжектируемой T_n сред = 15°C ; давление насыщенных паров $P_n = 1704$ Па.

Если $Re > 10^4$, то зависимость $\varphi_c = \varphi(Re)$ незначительна и значения коэффициентов φ_c и μ_c в расчетах принимают постоянными.

Расчет основных размеров инжекторного распылителя и его достижимых коэффициентов инжекции проведем при малых нормах расхода рабочей жидкости 20 л/га, что характерно при внесении пестицидов беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Рабочая скорость полета БЛА – 40 км/ч. Расстояние между распылителями 0,25 м. Пределы изменения давления рабочего потока перед соплом распылителя $P_p = 0,6 + 1,0$ МПа.

Давление водовоздушной смеси в выходном сечении из диффузора $P_{c5} = 0,4$ МПа, за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом составляет $P_{c6} = 0,5$ МПа, а давление инжектируемого воздуха перед распылителем – $P_n = 0,1$ МПа.

В результате получили следующие параметры распылителя.

Перепад давления водовоздушного потока, создаваемого инжекторным распылителем, $\Delta P_c = 0,3$ МПа. Перепад давлений рабочего потока с пределами изменения, ΔP_p составляет от 0,5 до 0,9 МПа. Объемный расход рабочей жидкости через один распылитель при норме внесения 20 л/га составляет $V_p = 0,556 \cdot 10^{-6}$ м³/с. В пределах изменения перепада рабочего давления перед соплом (0,5-0,9 МПа) диапазоны значений площади f_{p1} , диаметра d_{p1} выходного отверстия рабочего сопла, скорости истечения ω_{p1} , предельных значений коэффициента Рейнольдса Re составили: $f_{p1} = 0,0286 \cdot 10^{-6} - 0,0213 \cdot 10^{-6}$ м²; $d_{p1} = 0,0190 \cdot 10^{-3} - 0,165 \cdot 10^{-3}$ м; $\omega_{p1} = 30,37 - 40,76$ м/с; $Re = 5061,67 - 18628,0$.



Пределы оптимального отношения сечений $(f_{p1}/f_3)_{opt}$ распылителя при относительном перепаде давлений $\Delta P_p / \Delta P_c$ от 1,667 до 3,0: $(f_{p1}/f_3)_{opt} = 1,502-2,704$.

При ΔP_p в пределах 0,5-0,9 МПа площадь камеры смешения и диаметр камеры смешения d_3 соответственно составляют: $f_3 = 0,043 \cdot 10^{-6} - 0,058 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $d_3 = 0,234 \cdot 10^{-3} - 0,270 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; критерии Вебера: $We = 7703,0-11980,0$, Лапласа $Lp = 33523,0-28964,0$, критерий $M = 1,225 \cdot 10^{-3}$.

Значение критерия $M = 1,225 \cdot 10^{-3}$ характеризует малое противодавление перед соплом инжекторного распылителя. При малых противодавлениях значения констант составляют: $C = 0,00364$; $\kappa = 0,32$; $\ell = 0,07$; $m = 0$; угол распыления струи: $\alpha = 15-17,2^\circ$; расстояние от выходного сечения рабочего сопла до выходного сечения камеры смешения: $\ell_p = 0,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; длина камеры смешения: $\ell_{kc} = 4,16 \cdot 10^{-3} - 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Коэффициент инжекции: при $f_3/f_{p1} = 1,502-0,666$, $\Delta P_c / \Delta P_p = 0,6$ ($\Delta P_c = 0,3 \text{ МПа}$; $\Delta P_p = 0,5 \text{ МПа}$) составляет $U_0 = 0,03$; при $f_3/f_{p1} = 0,333$, $f_{p1}/f_3 = 0,34$, $\Delta P_c / \Delta P_p = 0,333$ ($\Delta P_c = 0,3 \text{ МПа}$; $\Delta P_p = 0,9 \text{ МПа}$) = $U_0 = 0,56$. Плотность водовоздушного потока: $P_c = 970,07-440,68 \text{ кг/м}^3$. Скорость водовоздушного потока на выходе из камеры смешения $\omega_{c4} = 13,73-32,46 \text{ м/с}$.

Давление P_{c4} в выходном сечении камеры смешения и выходном сечении диффузора: $P_{c4} = 286226-122816 \text{ Па}$. Перепад давления на диффузоре: $\Delta P_{диф} = 106176-269584 \text{ Па}$. Перепад давления за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом распылителя: $\Delta P_{c4} = 98100 \text{ Па}$. Площадь вы-

ходного сечения диффузора: $f_{c5} = 0,043 \cdot 10^{-6} - 0,094 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Скорость в выходном сечении диффузора: $\omega_{c5} = 13,95-20,69 \text{ м/с}$. Диаметр выходного сечения диффузора: $d_{c5} = 0,23 \cdot 10^{-3} - 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Длина диффузора: $\ell_{диф.} = 0-0,551 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При коэффициенте инжекции $U_0 = 0,03$ диффузор не нужен. При коэффициенте инжекции $U_0 = 0,54$ длина диффузора: $\ell_{диф.} = 0-0,551 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Выводы

Определение основных параметров инжекторного распылителя состоит в построении характеристики его работы, представляющей зависимость относительного перепада давления, создаваемого инжекторным распылителем от объемного коэффициента инжекции, определении отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла при установленных значениях коэффициентов скорости водовоздушной смеси в основных проточных элементах распылителя: рабочего сопла, камеры смешения, диффузора, определении основных размеров проточной части распылителя: диаметров рабочего сопла, камеры смешения, выходного сечения диффузора; длины камеры смешения и диффузора.

Диаметры сопла и камеры смешения служат определяющими размерами инжекторного распылителя, с которыми связаны все остальные диаметрально и линейные размеры.

Рассчитали основные размеры распылителя при авиационном способе внесения рабочих растворов пестицидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев И.В., Марченко Л.А., Кузьмин А.Ю. Технологические аспекты внесения пестицидов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. N11. С. 13-16.
2. Веретенников Ю. М., Долженко В.И., Горбачев И. В. и др. Монодисперсные техногенные аэрозоли. М.: Россельхозакадемия. 2013. 42 с.
3. Langenbruch G.A. Maiszünsler bald im hohen Norden? Starkere Ausbreitung des Schadlings in Deutschland befurchtett // DLZ Agramag. AgroBonus. Jg.52. N5. pp. 36-38.
4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H., Waddelow S., Bradiey A., Tuck C.R. De-sign factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzies // Biosystems Engg. 2002. Vol. 82. N3. pp. 289-296.
5. Neue Spritzdusen mit Luftunterstützung // Profi Magazin für professionelle Agrar-technik. 2010. N7. pp. 107.
6. Корнилов Т.В. Сравнительные характеристики стандартного щелевого распылителя и щелевого распылителя с эжекцией воздуха // Защита и карантин растению. 2010. N2. С. 46-48.
7. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. 408 с.
8. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат. 1989. 252 с.
9. Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л.: Судостроение. 1976. 100 с.
10. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение. 1969. 524 с.
11. Сивов Б.Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодавлением. М.: Машиностроение. 1968. 140 с.
12. Паж Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. М.: Химия. 1979. С. 53-54.
13. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. 2-е изд. М.: Машиностроение. 1982. 109 с.

REFERENCES

1. Gorbachev I.V., Marchenko L.A., Kuz'min A.Yu. Tekhnologicheskiye aspekty vneseniya pestitsidov [Technological aspects of pesticide application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. 11. 13-16.
2. Veretennikov Yu. M., Dolzhenko V.I., Gorbachev I. V. et al. Monodispersnyye tekhnogennyye aero-zoli [Monodisperse technogenic aerosols]. Moscow. Rossel'khozakademiya. 2013. 42.
3. Langenbruch G.A. Maiszunsler bald im hohen Norden? Starkere Ausbreitung des Schadlings in Deutschland befurchtett. DLZ Agramag. AgroBonus. Jg. 52. 5. 36-38.
4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H., Waddelow S., Bradiey A., Tuck C.R. Design factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzies. *Biosystems Engg*. 2002. 82. 3. 289-296.
5. Neue Spritzdusen mit Luftunterstutzung. Profi Magazin fur professionelle Agrartechnik. 2010. 7. 107.
6. Kornilov T.V. Sravnitel'nyye kharakteristiki standartnogo shchelevogo raspylitelya i shchelevogo raspylitelya s ezheksiyey vozdukha [Comparative characteristics of a standard slit sprayer and slit nozzle with air ejection]. *Zashchita i karantin rasteniyu*. 2010. 2. 46-48.
7. Tsegel'skiy V.G. Dvukhfaznyye struynnyye apparaty [Two-phase jet devices]. Moscow. MGTU im. N.E. Baamana. 2003. 408.
8. Sokolov Ye.Ya., Zinger N.M. Struynnyye apparaty [Jet installations]. M.: Energoatomizdat. 1989. 3rd ed.: 252.
9. Lyshevskiy A.S. Raspylivaniye topliva v sudovykh dizelyakh [Spraying of fuel in marine diesel engines]. Ltningrad. Sudostroyeniye. 1976. 100.
10. Povkh I.L. Tekhnicheskaya gidromekhanika [Technical hydromechanics]. Leningrad. Mashinostroyeniye. 1969. 524.
11. Sivov B.N. Istecheniye zhidkosti cherez nasadki v srede s protivodavleniyem [Expiration of liquid in-to the atmosphere through the nozzles with back pressure]. Moscow. Mashinostroyeniye. 1968. 140.
12. Pazhi D.G., Galustov V.S. Raspyliteli zhidkostey [Sprayers of liquids]. Moscow. Khimiya. 1970. 53-54.
13. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. et al. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. 2nd ed. Moscow. Mashinostroyeniye. 1982. 109.

Статья поступила в редакцию 11.05.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.05.2018

Статья принята к публикации 25.07.2018
The paper was accepted
for publication on 25.07.2018

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.