

УДК 519.63

В. В. ВОРОНЬКО, Д. А. БРЕГА, Д. Ю. САХАРОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАСПЫЛА УДОБРЯЮЩИХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ДЕФЛЕКТОРНЫМ ПУЛЬВЕРИЗАТОРОМ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

*Предложена математическая модель процесса распыления удобрений химическими веществами посредством дефлекторного пульверизатора с плоско-факельным распылением, работа которого основана на эффекте Вентури. Рассмотрено несколько режимов работы пульверизатора с осуществлением регулировки скорости потока, а также угла факела распыления посредством изменения геометрических параметров сопловой насадки. Определены наиболее рациональные параметры течения компонентов распыляемой среды, а также геометрические параметры распылителя с учётом скорости движения летательного аппарата и эффекта экрана от поверхности полива.*

**Ключевые слова:** дефлекторный пульверизатор, факел распыла, модель распыления, геометрия пульверизатора, регулировочная игла, параметры течения, БПЛА.

### Введение

Одним из базовых элементов ресурсосберегающих технологий в сельском хозяйстве является "точное земледелие" суть которого сводится к управлению продуктивностью посевов и внесения удобрений с учётом внутривидовой вариативности среды обитания растений [1]. Международный опыт показывает, что применение подходов точного земледелия обеспечивает гораздо больший экономический эффект и, самое главное, позволяет повысить воспроизводство почвенного плодородия и уровень экологической чистоты сельскохозяйственной продукции.

Для реализации такого подхода необходимы разработки системы распыления, которая сможет реализовать эффективный процесс мелкокапельного распыления с учётом специфики полёта БПЛА. Такая система основана на эффекте Вентури.

Регулировка скорости потока такого распылителя осуществляется посредством иглы, а угол факела распыления зависит от геометрии сопловой насадки.

Моделирование выполнено в системе конечно-элементного анализа – Ansys Fluent с целью определения наиболее рациональных параметров течения компонентов распыляемой среды, а также геометрических параметров распылителя с учётом скорости движения летательного аппарата и эффекта экрана от поверхности полива.

Для моделирования мелкокапельного процесса распыления, необходимо учитывать следующие

свойства рабочей среды.

Размер капель – важный параметр качественно-количественного опрыскивания. Размер капель определяет количество рабочего состава, осевшего на обрабатываемую поверхность. Чем меньше размер капель, тем больше вероятность обтекания целевого объекта с потоками воздуха. Крупные капли отрываются от потока воздуха и падают на листья. На практике установлено, что оптимальный размер капель для попадания рабочего состава на обрабатываемый объект составляет 200–300 мкм при высокой скорости падения. Однако на практике при опрыскивании образуются капли разного размера. Согласно статистике, по количеству рабочей жидкости на 1 га и преобладающему размеру капель опрыскивание подразделяют на [2]:

**Малолитражное крупнокапельное (обычное) опрыскивание.** Норма расхода рабочей жидкости – 300–600 л для обработки полей и 800–2000 л для обработки древесных насаждений.

**Микролитражное среднекапельное (малообъёмное) опрыскивание.** Норма расхода для обработки полей – 100...250 л. Размер капель – 15...300 мкм. Применяется для обработки посевов гербицидами.

**Микролитражное мелкокапельное (микрообъёмное).** Норма расхода рабочей жидкости на полях – 25...100 л. Обработка древесных насаждений требует 50...200 л. Размер капель – 30...150 мкм.

**Ультрамалообъёмное (УМО).** Опрыскивание концентрированными, не разбавленными водой

эмульсиями пестицидов и масляными растворами. Норма расхода – 0,6...5 л. Размер капель может колебаться от 1 до 20 мкм. Практически, ультрамалообъемное опрыскивание является аэрозольной обработкой.

**Смачиваемость** – непосредственный контакт яда и обрабатываемой поверхности без воздушного пространства на границе их соприкосновения. Поверхностные явления, наблюдающиеся на границе газообразной, твердой и жидких фаз, определяют степень смачиваемости и растекаемости. На обрабатываемой поверхности капли растворов ядохимикатов разбиваются на менее мелкие. Они растекаются по поверхности, смачивая её. Величина степени смачивания зависит от натяжения рабочей жидкости. В данном расчёте не рассматривается.

**Поверхностное натяжение** – сила, с которой поверхностная плёнка оказывает давление на жидкость. Оно измеряется как работа в эрг/см<sup>2</sup> или дин/см. Вода обладает высоким поверхностным натяжением. Наблюдается следующая зависимость между поверхностным натяжением и смачиваемостью: чем выше поверхностное натяжение, тем ниже смачиваемость. При низкой смачиваемости капля жидкости имеет округлую форму с минимальной площадью поверхности для данного объёма. В данном расчёте принимаем  $72,86 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

**Прилипаемость** жидкости – это способность жидкости при высыхании образовывать тонкую плёнку частиц на поверхности листа. Чем тоньше плёнка, тем лучше она удерживается поверхностью. В основе прилипаемости лежит способность адсорбции вещества на поверхности [2].

В качестве базовой конструкции будет взята трубка Вентури, которая будет дополнительно оснащена дозирующей иглой.

Эффект Вентури заключается в падении давления, когда поток жидкости или газа протекает через суженную часть трубы, а дополнение в виде регулировочной иглы позволит более точно контролировать процесс течения, а также регулировать угол факела распыла рабочей среды.

В данном устройстве будет осуществлён принцип инъекции, т. е. передача кинетической энергии от одной среды, движущейся с большей скоростью, к другой. Эжектор, работая по закону Бернулли, создаёт в сужающемся сечении пониженное давление одной среды, что вызывает подсос в поток другой среды, которая затем переносится и удаляется от места всасывания энергией первой среды.

Эффект Вентури является следствием действия закона Бернулли, которому соответствует уравнение Бернулли, определяющее связь между скоростью  $v$  жидкости, давлением  $p$  в ней и высотой  $h$ , на кото-

рой находится рассматриваемый элемент жидкости, над уровнем отсчёта [3]:

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения.

Дефлекторный пульверизатор имеет два сечения (для рабочей среды и распыляемой жидкости), следовательно, уравнение Бернулли для двух сечений будет иметь вид [4]:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho}. \quad (2)$$

Из уравнения видно, что в тех местах потока, где средняя скорость жидкости выше (то есть, в узких сечениях), её динамический напор увеличивается, а гидростатический напор уменьшается (и значит, уменьшается давление). На выходе из сопла пульверизатора давление равно атмосферному, за счёт чего и происходит распыление.

В основе модели вычисления траекторий движения капель при расчёте рассматриваемой модели используется уравнение Эйлера-Лагранжа, где рассматривается функционал [5]:

$$J = \int_a^b F(x, f(x), f'(x)) dx, \quad (3)$$

где  $F(x, f(x), f'(x))$  – функция, обладающая непрерывными первыми частными производными и называемая функцией Лагранжа или лагранжианом, где через  $f'$  обозначена первая производная  $f$  по  $x$ .

Для функции  $f$  должно выполняться обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial F}{\partial f} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial f'} = 0. \quad (4)$$

В многомерной вариации рассматривается путь в  $n$ -мерном пространстве  $q(t)$ , который доставляет экстремум функционалу:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} L(t, q(t), q'(t)) dt. \quad (5)$$

Данное утверждение справедливо только если удовлетворяет условию:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

В физических приложениях, когда  $L$  является лагранжианом (имеется в виду лагранжиан некоторой физической системы, то есть если  $J$  – действие для этой системы), эти уравнения – суть (классические) уравнения движения такой системы. Это утверждение может быть прямо обобщено и на случай бесконечномерного  $q$ .

Для многомерной поверхности  $\Omega$  при рассмотрении функции  $n$  переменных получается такое обобщение:

$$J = \int_{\Omega} L(f, x_1, \dots, x_n, f_{x_1}, \dots, f_{x_n}) d\Omega, \quad (7)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – независимые координаты;

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad f_{x_i} \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

Равенство справедливо, только если  $f$  удовлетворяет уравнению в частных производных:

$$\frac{\partial L}{\partial f} - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial L}{\partial f_{x_i}} = 0. \quad (8)$$

В проводимом расчёте используется модель распределения Вейбулла (Rosin-Rammler) [6], которое относится к семейству двухпараметрических абсолютно непрерывных распределений, согласно которого рассматривается распределение случайной величины  $X$  заданное плотностью  $f_x(x)$ , имеющее вид:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда говорят, что  $X$  имеет распределение Вейбулла, т.е.  $X \sim W(k, \lambda)$ .

Вид функции плотности распределения Вейбулла сильно зависит от значения  $k$ . Для  $0 < k < 1$  плотность стремится к бесконечности при  $x \rightarrow 0+$  и строго убывает. Для  $k = 1$  плотность стремится к  $1/\lambda$  при  $x \rightarrow 0+$  и строго убывает. Для  $k > 1$  плотность стремится к 0 при  $x \rightarrow 0+$ , возрастает до достижения своей моды и убывает после. Плотность имеет бесконечный отрицательный угловой коэффициент в  $x = 0$  при  $0 < k < 1$ , бесконечный положи-

тельный угловой коэффициент в  $x = 0$  при  $1 < k < 2$ , и нулевой угловой коэффициент в  $x = 0$  при  $k > 2$ . При  $k = 2$  плотность имеет конечный положительный угловой коэффициент в  $x = 0$ . При  $k \rightarrow \infty$  распределение Вейбулла сходится к дельта-функции, centered в  $x = \lambda$ . Кроме того, коэффициент асимметрии и коэффициент вариации зависят только от коэффициента капли формы.

В качестве носителя проектируемого пульверизатора будет использоваться концепт беспилотного летального аппарата, модель которого представлена на рисунке 1.

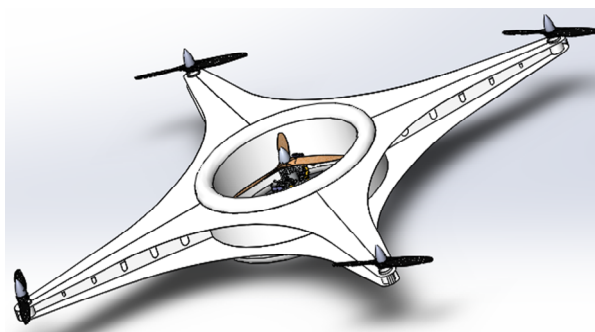


Рис. 1. Модель беспилотного летального аппарата

Фюзеляж рассматриваемого БПЛА имеет цилиндрическую форму, что позволяет разместить на оси симметрии двигатель с генератором. Такая схема позволяет защитить двигатель и винт от физических повреждений и разместить топливо и распыляемое вещество в полостях тороидального корпуса. Четыре электродвигателя и рулевых винта обеспечивают наиболее устойчивую схему полёта и наилучшее управление.

Для оптимизации расчёта будем рассматривать четверть исследуемой системы (рис. 2).

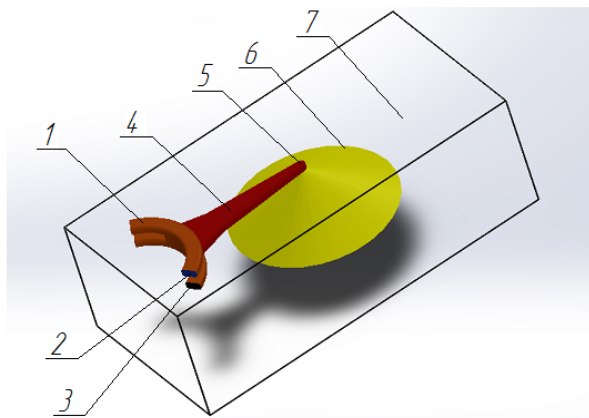


Рис. 2. Модель исследуемой системы:  
1 – сегмент БПЛА, 2 – баллон сжатого воздуха,  
3 – баллон с распыляемым веществом, 4 – балка БПЛА, 5 – пульверизатор, 6 – конус распыла,  
7 – фрагмент исследуемого пространства

Эскиз геометрии pulverизатора представлен на рисунке 3.

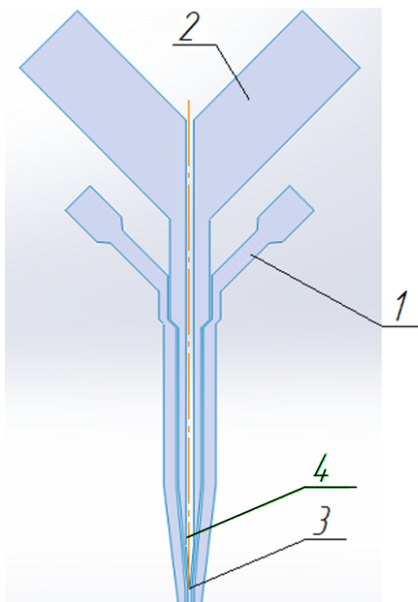


Рис. 3. Эскиз геометрии pulverизатора:  
1 – канал подачи распыляемого вещества,  
2 – канал подачи сжатого воздуха, 3 – сопло,  
4 – регулирующая игла

Для определения наиболее рационального угла факела распыла были проведены расчёты для ряда углов заточки распределительной иглы, а именно 30°, 45°, 60°, 75°.

Расчётная модель основана на принципе инжекции, согласно которого осуществляется передача кинетической энергии от одной среды, движущейся с большей скоростью, к другой, т.е. эжектор создаёт в сужающемся сечении пониженное давление одной среды, что вызывает подсос в поток другой среды, которая затем переносится и удаляется от места всасывания энергией первой среды.

Модель расчёта, применяемая для расчёта инжекции в среде конечных элементов Ansys Fluent базируется на действии эффекта Вентури, уравнении Эйлера-Лагранжа, выражающее траекторию движения капель, а также расчёт траектории движения дисперсных частиц (капель) по закону распределения Вейбулла, параметры которой указаны в таблице 1.

Параметры расчётной модели представлены в таблице 2.

Расчётная модель определена в декартовой системе координат. Распыление происходит по оси Y в отрицательном направлении. Движение самой

системы происходит вдоль оси Z, т.е. набегающий поток осуществляется по плоскости YX. В исходном состоянии расчётная система заполнена воздухом при температуре 20°C, а в качестве жидкой распыляемой среды рассматривается вода.

Таблица 1

Параметры модели инжекции

Параметр	Значение
Модель распределения случайных величин	Rosin-rammler
Минимальный диаметр, мкм	1,2
Максимальный диаметр, мкм	49,5
Средний диаметр, мкм	16,54
Зазор, мкм	1,86

Таблица 2

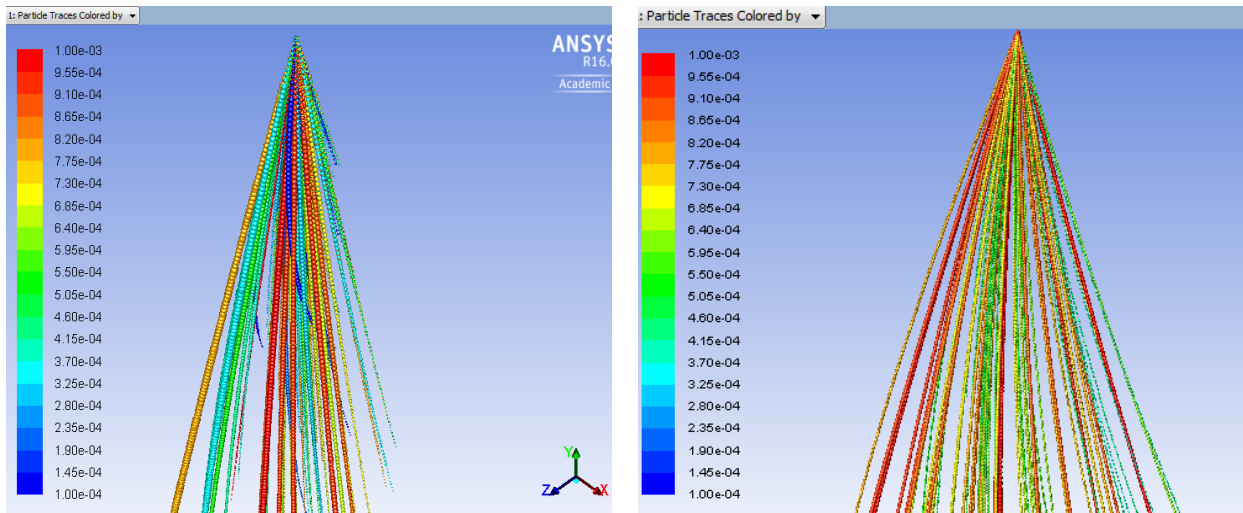
Параметры модели распыления

Параметр	Значение
Тип распыления	Конусный
Угол регулируемой иглы, град.	30, 45, 60, 75
Скорость движения распылителя в расчётной области, м/с	14
Радиус сопла распылителя, мм	0,25
Скорость потока на выходе из сопла, м/с	100

Анализируя визуальное представление моделей на рисунке 4, можно сделать вывод, что кучность траекторий заметно снижается с увеличением угла распыла свыше 60°. Как следствие – уменьшается плотность потока, что приводит к сильному сносу крайних траекторий потока, а это в свою очередь уменьшает стабильную величину конуса распыла.

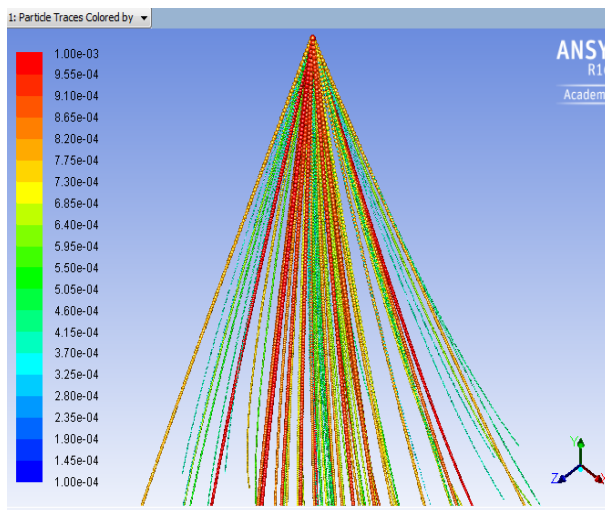
Визуализации модели распыления и распределения траекторий капель, а также распределение жидкости по поверхности для угла факела в 60° представлены на рисунках 5 и 6.

На основании проведённого моделирования процесса точечного распыления жидких веществ посредством дефлекторного pulverизатора установленного на БПЛА в рамках концепции точечного земледелия были подобраны наиболее оптимальные величины углов регулирующей иглы (60°), скорости потока на выходе (100 м/с) и скорости движения самого БПЛА (14 м/с), что позволит обеспечить наиболее рациональное применение распыляемого вещества и наиболее эффективное применение БПЛА в качестве носителя.

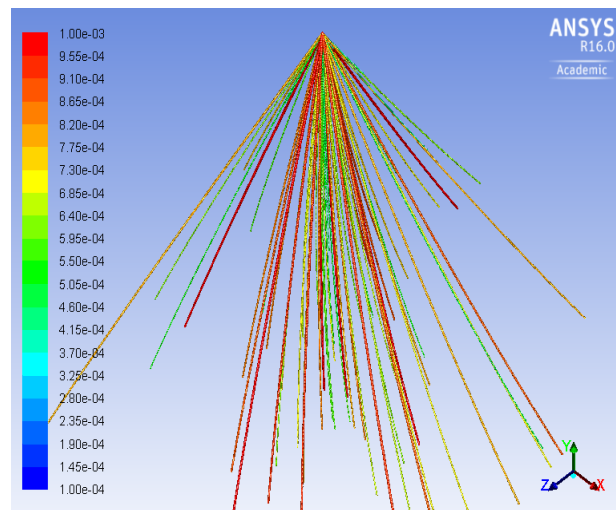


а

б



в



г

Рис. 4. Визуализация распределения траекторий: а  $-30^\circ$ , б  $-45^\circ$ , в  $-60^\circ$ , г  $-75^\circ$

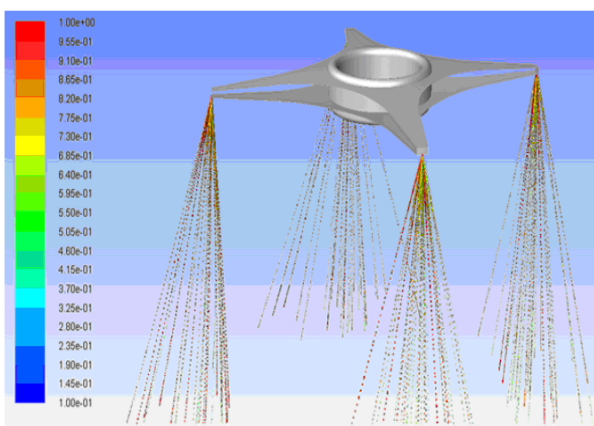


Рис. 5. Визуализация распределения и траекторий полёта капель по диаметрам

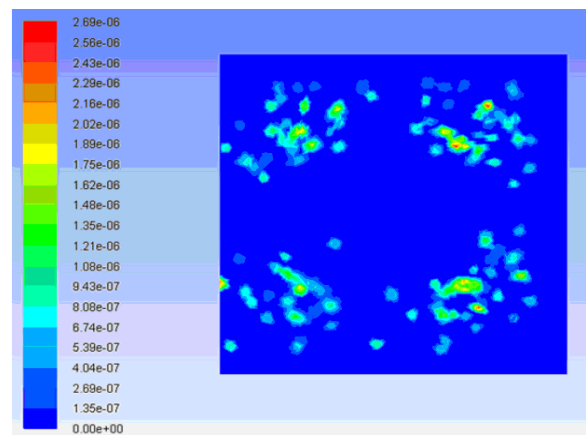


Рис. 6. Визуализация распределения жидкости

на поверхности,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$

## Заклучение

Предложена математическая модель процесса распыления удобряющих химических веществ посредством дефлекторного пульверизатора с плоско-факельным распылением, работа которого основана на эффекте Вентури. Рассмотрена регулировка скорости потока такого распылителя, осуществляемая посредством иглы, а также зависимость угла факела распыления от угла заострения регулировочной иглы. Определены наиболее рациональные параметры течения компонентов распыляемой среды, а также геометрические параметры распылителя с учётом скорости движения летательного аппарата и эффекта экрана от поверхности полива.

## Литература

1. Mcbratney, A. *Future Directions of Precision Agriculture [Text]* / A. Mcbratney, B. Whelan, J. Bouma // *Precision Agriculture*. – 2005. – No. 6(1). – pp. 7-23. DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.
2. Маркевич, А. Е. *Основы эффективного применения пестицидов. Справочник в вопросах и ответах по механизации и контролю качества применения пестицидов в сельском хозяйстве [Текст]* / А. Е. Маркевич, Ю. Н. Немировец. – Горки : Учреждение образования «Могилевский государственный образовательный центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки, консалтинга и аграрной реформы», 2004. – 60 с.
3. Колчунов, В. І. *Теоретична та прикладна гідромеханіка [Текст] : навч. посібник для студ. вищих навч. закл. / В. І. Колчунов ; Національний авіаційний ун-т. – К. : НАУ, 2004. – 336 с. ISBN 966-598-174-9*
4. Гольдштейн, Р. В. *Механика сплошных сред. Часть 1. [Текст]* / Р. В. Гольдштейн, В. А. Гордцов. – М. : Наука, Физматлит, 2000. – 256 с. ISBN 5-02-015555-1.

5. Roubicek, T. *Calculus of variations. Chap.17 in: Mathematical Tools for Physicists [Text]* / T. Roubicek ; Ed. M. Grinfeld. – Weinheim : Wiley-VCH, 2014. – pp. 551-588. ISBN 978-3-527-41188-7.

6. Weibull, W. *A statistical distribution function of wide applicability [Text]* / W. Weibull // *J. Appl. Mech.* – 1951. – Vol. 18 (3). – pp. 293–297.

## References

1. Mcbratney, A., Whelan, B., Bouma, J. *Future Directions of Precision Agriculture. Precision Agriculture*, 2005, no. 6(1), pp. 7-23. DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.
2. Markevich, A. E., Nemirovets, Yu. N. *Osnovy jeffektivnogo primenenija pesticidov. Spravochnik v voprosah i otvetah po mehanizacii i kontrolju kachestva primenenija pesticidov v sel'skom hozjajstve* [Handbook in Questions and Answers on Mechanization and Quality Control of Pesticide Use in Agriculture]. Gorki, Institution of Education "Mogilev State Educational Center for Training, Advanced Training, Retraining, Consulting and Agrarian Reform" Publ., 2004. 60 p.
3. Kolchunov, V. I. *Teoretychna ta prykladna hidromekhanika* [Theoretical and Applied hydromechanics]. Kiev, NAU Publ., 2004. 336 p. ISBN 966-598-174-9.
4. Goldstein, R. V., Gorodtsov, V. A. *Mehanika sploshnyh sred. Chast' 1* [Continuum mechanics. Part 1]. Moscow, Science, Fizmatlit Publ., 2000. 256 p. ISBN 5-02-015555-1.
5. Roubicek, T. *Calculus of variations. Chap.17 in: Mathematical Tools for Physicists.* (Ed. M. Grinfeld). Weinheim, Wiley-VCH, 2014, pp. 551-588. ISBN 978-3-527-41188-7.
6. Weibull, W. *A statistical distribution function of wide applicability. J. Appl. Mech.* 1951, no. 18, pp. 293–297.

Поступила в редакцию 11.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

## ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РОЗПИЛУ УДОБРЮЮЧИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН ДЕФЛЕКТОРНИМ ПУЛЬВЕРИЗАТОРОМ В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

В. В. Воронько, Д. А. Брега, Д. Ю. Сахаров

Запропоновано математичну модель процесу розпилення удобряючих хімічних речовин завдяки дефлекторному пульверизатору з плоско-факельним розпиленням, робота якого основана на ефекті Вентури. Розглянуто кілька режимів роботи пульверизатора із здійсненням регулювання швидкості потоку, а також кута факела розпилення за допомогою зміни геометричних параметрів соплової насадки. Визначено най-

більш раціональні параметри течії компонентів розпилюемого середовища, а також геометричні параметри розпилювача з урахуванням швидкості руху літального апарату і ефекту екрану від поверхні поливу.

**Ключові слова:** дефлекторний пульверизатор, факел розпилю, модель розпилення, геометрія пульверизатора, регулювальна голка, параметри течії, БПЛА.

## INVESTIGATION OF THE ATOMIZER OPERATING REGIMES FOR FERTILIZING WITHIN THE CONCEPTION OF PRECISE FARMING

*V. V. Voronko, D. A. Brega, D. Y. Sakharov*

A mathematical model of the process of sputtering chemical fertilizers by means of a deflector spray with flat-flare spraying, whose work is based on the Venturi effect, is proposed. Several operating modes of the atomizer with the adjustment of the flow velocity and the angle of the spraying nozzle are examined by changing the geometric parameters of the nozzle head. The most rational parameters of the flow of the components of the atomized medium, as well as the geometric parameters of the atomizer, are taken into account, taking into account the speed of the aircraft and the effect of the screen from the watering surface.

**Keywords:** deflector spray, spray, spray pattern, atomizer geometry, adjusting needle, flow parameters, drone.

**Воронько Віталій Володимирович** – д-р техн. наук, проф., професор кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: Vitaliy.voronko@gmail.com.

**Брега Дмитрій Андреевич** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: brega10.04@gmail.com.

**Сахаров Денис Юрьевич** – аспірант кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: Sakharov92@gmail.com.

**Voronko Vitaliy Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of aircraft manufacturing technologies department, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: Vitaliy.voronko@gmail.com.

**Brega Dmitry Andreevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of aircraft manufacturing technologies department, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: brega10.04@gmail.com.

**Sakharov Denys Yrievich** – post-graduate student of the department of aircraft production technologies, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: Sakharov92@gmail.com.