

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ РАБОЧЕГО РАСТВОРА ПЕСТИЦИДОВ В ПОДВИЖНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

О.В. Гордеенко, канд. техн. наук, доцент (БГСХА); И.С. Крук, канд. техн. наук, доцент, Т.П. Кот, канд. техн. наук, доцент, Д.Р. Мальцев, студент (БГАТУ); Э. Каминский, докт. техн. наук, профессор, В. Романюк, докт. с.-х. наук, профессор (Институт технологических и естественных наук в Фалентах, Республика Польша)

Аннотация

В статье исследованы закономерности движения капли рабочего раствора пестицида в подвижной сопротивляющейся среде, на основании которых получены зависимости для определения скорости и координат ее положения в заданный момент времени, что позволит установить величину потерь пестицидов из-за сноса при обработках в ветреную погоду.

The article investigates the motion laws of the working solution drop in the mobile pesticide resistant medium to determine the dependences of velocity and coordinates of its position at a given time, which will set the amount of pesticides loss due to the demolition of the treatments in windy conditions.

Введение

Эффективность опрыскивания рабочим раствором пестицидов при проведении операций химической защиты растений, наряду с другими показателями, определяется равномерностью распределения препарата и густотой покрытия обрабатываемой поверхности, которые определяются размерами капель и закономерностями их падения до полного осадения на объекте обработки. Нанесение рабочего раствора пестицидов на объект обработки неизбежно сопровождается потерями. К ним относятся испарение и снос мелких капель жидкости ветром за пределы рабочей зоны опрыскивания, неравномерное распределение и плохая удерживаемость крупных капель на объекте обработки.

Механизм осадения капель рабочего раствора пестицидов на обрабатываемой поверхности сложен и многообразен. Капля, оторвавшись от выброшенной из сопла распылителя струи жидкости, обладая запасом кинетической энергии, замедленно движется под действием движущей силы (силы тяжести) и силы сопротивления среды. Спустя некоторое время, когда эти силы взаимно уравниваются, она достигает конечной скорости, и движется по определенной траектории, параметры которой определяются начальными условиями истечения жидкости из сопла и состоянием окружающей среды [1]. При обработках в ветреную погоду на протяжении всего процесса падения (с момента вылета из сопла и до оседания на обрабатываемой поверхности), капля подвержена воздействию направленного воздушного потока – ветра. Если скорость ветра существенно превосходит скорость падения капли, то она сносится воздушным потоком и не попадает на объект обработки. Это, с одной стороны, приводит к снижению качества выполняемого техно-

логического процесса, а с другой – к загрязнению среды обитания людей, животных и растений.

Определение закономерностей движения капель в направленном воздушном потоке является важной задачей при исследовании процесса сноса препарата ветром из зоны обработки и проектировании ветрозащитных устройств.

Основная часть

Для изучения закономерностей движения капель в подвижной воздушной среде примем следующие допущения: расчетная форма капли в виде шара, она не меняет свою массу и форму на протяжении всей траектории движения, силы сопротивления ее полету пропорциональны квадрату скорости и величина скорости подвижного воздушного потока на протяжении всего движения капли постоянна и не меняет своего направления.

Капля жидкости M массой m_k выброшена из сопла распылителя со скоростью \mathcal{G}_{k0} под углом γ_0 к вертикали в подвижную среду, движущуюся со скоростью $u = \text{const}$, вектор которой образует с вертикалью угол 90° (рис. 1). Капля совершает дальнейшее движение под действием сил тяжести G_k , лобового сопротивления воздуха F_c и воздействия направленного воздушного потока F . Сила лобового сопротивления направлена по касательной к траектории полета в сторону, противоположную направлению движения, и является заданной функцией скорости капли \mathcal{G}_k

$$F_c = -\lambda \cdot \mathcal{G}_k^2,$$

где λ – приведенный коэффициент сопротивления, кг/м.

Сила тяжести, действующая на каплю, определяется по формуле

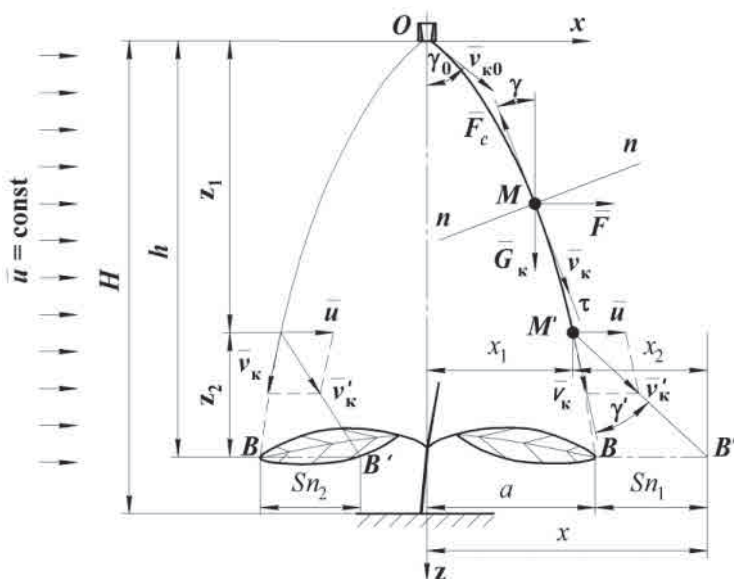


Рисунок 1. Схема к определению кинематических параметров падения капли в подвижной сопротивляющейся среде

$$G_k = m_k g,$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Сила воздействия направленного потока равна

$$F = f \cdot u^2,$$

где f – приведенный коэффициент сопротивления, $кг/м$.

Считая, что вектор силы воздействия ветра направлен горизонтально, уравнения движения капли в подвижных осях координат имеют вид

$$m_k \frac{dv_k}{dt} = m_k g \cos \gamma + fu^2 \sin \gamma - \lambda v_k^2; \quad (1)$$

$$m_k \frac{v_k^2}{\rho} = m_k g \sin \gamma - fu^2 \cos \gamma, \quad (2)$$

где ρ – радиус кривизны траектории точки M в заданный момент времени;

γ – угол, который образует вектор скорости точки M в данный момент времени с осью Oz .

В уравнениях (1) и (2) разделим каждое слагаемое на массу капли m_k . После преобразований получим:

$$\frac{dv_k}{dt} = g \cos \gamma + C_F u^2 \sin \gamma - C_T v_k^2; \quad (3)$$

$$\frac{v_k^2}{\rho} = g \sin \gamma - C_T u^2 \cos \gamma, \quad (4)$$

где $C_F = \frac{f}{m_k}$ и $C_T = \frac{\lambda}{m_k}$ – соответственно приведенные коэффициенты сопротивления, $1/м$.

Если каплю жидкости принять за шар, то $\lambda = f$

и $C_T = C_F$, и с учетом принятых обозначений, уравнения (3) и (4) примут вид

$$\frac{dv_k}{dt} = g \cos \gamma + C_T u^2 \sin \gamma - C_T v_k^2; \quad (5)$$

$$\frac{v_k^2}{\rho} = g \sin \gamma - C_T u^2 \cos \gamma, \quad (6)$$

Анализ уравнений (5) и (6) показывает, что капля жидкости, выброшенная в подвижную сопротивляющуюся среду со скоростью v_{k0} под углом γ_0 к вертикали, будет двигаться так, что на начальном участке траектории OM' ускорение ее будет монотонно уменьшаться, а скорость возрастать, стремясь к предельной величине, определяемой из уравнения (5) при условии, что $\frac{dv}{dt} = 0$

$$v' = \sqrt{\frac{1}{C_T} (g \cos \gamma + C_T u^2 \sin \gamma)}. \quad (7)$$

В момент времени, когда

$$g \cdot \sin \gamma = C_T \cdot u^2 \cdot \cos \gamma, \quad (8)$$

траекторией капли будет прямая линия, образующая с вертикалью угол γ' , тангенс которого определяется из уравнения (6) при условии, что $\rho = \infty$

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{C_T \cdot u^2}{g}. \quad (9)$$

Начиная из точки перехода криволинейного участка траектории OM' в прямолинейный (рис. 1) и до момента соприкосновения с поверхностью объекта обработки, капля будет двигаться равномерно со скоростью v' , которая определяется из совместного решения уравнений (7) и (8)

$$v' = \sqrt{\frac{\sin \gamma'}{C_T \cdot u^2} \cdot (g^2 + C_T^2 u^4)}. \quad (10)$$

Таким образом, траектория полета капли в подвижной сопротивляющейся среде может быть представлена как состоящая из криволинейного OM' и прямолинейного $M'B'$ участков (рис. 1). Положение капли в точке перехода криволинейного участка в прямолинейный (точка M') определяется координатами x_1 и y_1 , и проекциями вектора предельной скорости на неподвижные оси координат

$$v_x' = v' \sin \gamma'; \quad (11)$$

$$v_y' = v' \cos \gamma'. \quad (12)$$

Движение капли жидкости относительно неподвижной системы координат описывается дифференциальными уравнениями (рис. 1)

$$m_k \frac{dv_{kx}}{dt} = F - F_c \sin \gamma; \quad (13)$$

$$m_k \frac{dv_{кз}}{dt} = m_k g - F_c \cos \gamma. \quad (14)$$

Используя зависимости, полученные в источнике [2]

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{d\gamma}{ds} = -\frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = -\frac{1}{g_k} \cdot \frac{d\gamma}{dt} \text{ и источнике [3]}$$

$$\frac{dv_{кз}}{dt} = g, \text{ уравнения примут вид}$$

$$\frac{dv_{кx}}{dt} = \frac{\lambda}{m_k} u^2 - \frac{\lambda}{m_k} v_k^2 \sin \gamma; \quad (15)$$

$$\frac{dv_{кз}}{dt} = g - \frac{\lambda}{m_k} v_k^2 \cos \gamma. \quad (16)$$

или

$$\frac{dv_{кx}}{dt} = C_T u^2 - C_T v_k^2 \sin \gamma; \quad (17)$$

$$\frac{dv_{кз}}{dt} = g - C_T v_k^2 \cos \gamma. \quad (18)$$

Из данных уравнений исключим параметр времени t , переписав их в виде

$$\frac{dv_{кx}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dv_{кx}}{dx} \cdot v_{кx} = C_T u^2 - C_T v_k^2 \sin \gamma; \quad (19)$$

$$\frac{dv_{кз}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dv_{кз}}{dz} \cdot v_{кз} = g - C_T v_k^2 \cos \gamma. \quad (20)$$

Преобразуем последние слагаемые уравнений к виду:

$$C_T v_k^2 \sin \gamma = C_T \frac{(v_k \sin \gamma)^2}{\sin \gamma} = C_T v_{кx}^2 \frac{1}{\sin \gamma} = C_T k_x v_{кx}^2; \quad (21)$$

$$C_T v_k^2 \cos \gamma = C_T \frac{(v_k \cos \gamma)^2}{\cos \gamma} = C_T v_{кз}^2 \frac{1}{\cos \gamma} = C_T k_z v_{кз}^2, \quad (22)$$

где k_x и k_z – коэффициенты пропорциональности, зависящие от положения капли на участке OM' траектории неустановившегося движения

$$k_x = \frac{1}{\sin \gamma}; \quad (23)$$

$$k_z = \frac{1}{\cos \gamma}. \quad (24)$$

Замечая, что коэффициенты k_x и k_z являются непрерывными функциями изменения угла γ в пределах от начального γ_0 до предельного γ' значений, то их среднее значение определим как среднеинтегральное на этом интервале. Приведем уравнение (24) к виду

$$k_z d\gamma = \frac{d\gamma}{\cos \gamma}. \quad (25)$$

Проинтегрируем выражение (25) в заданных пределах

$$k_z (\gamma' - \gamma_0) = \int_{\gamma_0}^{\gamma'} \frac{d\gamma}{\cos \gamma} = \frac{1}{2} \left[\ln \left| \frac{1 + \sin \gamma'}{1 - \sin \gamma'} \right| - \ln \left| \frac{1 + \sin \gamma_0}{1 - \sin \gamma_0} \right| \right]. \quad (26)$$

Из уравнения (26) определим среднее значение коэффициента k_z на участке неравномерного движения капли по траектории

$$k_z = \frac{1}{2(\gamma' - \gamma_0)} \ln \left| \frac{(1 + \sin \gamma') \cdot (1 - \sin \gamma_0)}{(1 - \sin \gamma') \cdot (1 + \sin \gamma_0)} \right|. \quad (27)$$

Для определения коэффициента k_x , уравнения (23) и (24) приведем к виду

$$\sin \gamma = \frac{1}{k_x}, \quad (28)$$

$$\cos \gamma = \frac{1}{k_z}. \quad (29)$$

Полученные уравнения возведем в квадрат и сложим их левые и правые части, получив зависимость

$$\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = \frac{1}{k_x^2} + \frac{1}{k_z^2} = 1,$$

или

$$k_x = \frac{k_z}{\sqrt{k_z^2 - 1}}. \quad (30)$$

С учетом зависимостей (27) и (30) уравнения (19) и (20) примут вид

$$\frac{dv_{кx}}{dx} \cdot v_{кx} = C_T u^2 - C_T k_x v_{кx}^2; \quad (31)$$

$$\frac{dv_{кз}}{dz} \cdot v_{кз} = g - C_T k_z v_{кз}^2. \quad (32)$$

В отличие от исходных уравнений (17) и (18), уравнения (31) и (32) являются приближенными, но с разделяющимися переменными, что позволяет их проинтегрировать в заданных пределах и получить расчетные формулы для определения координат капли на участке траектории с неустановившимся движением.

Решение данных уравнений (17) и (18) сводится к определению скоростей движения капель вдоль координатных осей, в зависимости от времени. Интегрирование этих уравнений сводится к нахождению табличных интегралов вида [4]

$$dt = \int \frac{dv_{кx}}{C_T (u^2 - k_x v_{кx}^2)}; \quad (33)$$

$$dt = \int \frac{dv_{кз}}{g - C_T k_z v_{кз}^2}. \quad (34)$$

Проинтегрировав уравнения (33) и (34) с учетом начальных условий ($t = 0, v_{кx} = v_{кx_0}, v_{кз} = v_{кз_0}$), получим:

$$t = \frac{\sqrt{C_T k_z}}{2C_T k_z \sqrt{g}} \ln \times \left| \frac{(\sqrt{g} + v_{kz} \sqrt{C_T k_z})(\sqrt{g} - v_{kz_0} \sqrt{C_T k_z})}{(\sqrt{g} - v_{kz} \sqrt{C_T k_z})(\sqrt{g} + v_{kz_0} \sqrt{C_T k_z})} \right| \quad (35)$$

$$t = \frac{\sqrt{k_x}}{2C_T u \sqrt{k_x}} \ln \left| \frac{(u + v_{kx} \sqrt{k_x})(u - v_{kx_0} \sqrt{k_x})}{(u - v_{kx} \sqrt{k_x})(u + v_{kx_0} \sqrt{k_x})} \right| \quad (36)$$

Решение же уравнений (31) и (32) сводится к нахождению координат капель на траектории неустановившегося движения в зависимости от проекций скоростей. Решение этих уравнений сводится к нахождению табличных интегралов вида [4]

$$x = \int \frac{v_{kx} dv_{kx}}{C_T (u^2 - k_x v_{kx}^2)}; \quad (37)$$

$$z = \int \frac{v_{kz} dv_{kz}}{g - C_T k_z v_{kz}^2}. \quad (38)$$

Интегрирование полученных уравнений с учетом начальных условий ($t=0, x=x_0=0, z=z_0=0,$

$v_{kx} = v_{kx_0} = v_{k_0} \sin \gamma_0, v_{kz} = v_{kz_0} = v_{k_0} \cos \gamma_0$) приводит к выражениям

$$x = -\frac{1}{2C_T k_x} \ln \left| \frac{u^2 - k_x v_{kx}^2}{u^2 - k_x v_{kx_0}^2} \right|, \quad (39)$$

$$z = -\frac{1}{2C_T k_z} \ln \left| \frac{g - C_T k_z v_{kz}^2}{g - C_T k_z v_{kz_0}^2} \right|. \quad (40)$$

Выразив из полученных уравнений общий коэффициент $2C_T$ и приравняв полученные выражения, после преобразований получим уравнение траектории полета капель в подвижной сопротивляющейся среде

$$x = z \frac{k_z}{k_x} \frac{\ln \left| \frac{u^2 - k_x v_{kx}^2}{u^2 - k_x v_{kx_0}^2} \right|}{\ln \left| \frac{g - C_T k_z v_{kz}^2}{g - C_T k_z v_{kz_0}^2} \right|}. \quad (41)$$

Используем уравнение (41) для определения скорости полета капли вдоль оси Oz на участке неустановившегося движения, получим

$$v_{kz} = \sqrt{\frac{1}{C_T k_z} \left[g - (g - C_T k_z v_{kz_0}^2 e^{-2C_T k_z z}) \right]}. \quad (42)$$

Решая уравнение (36) относительно v_{kx} , получим закон изменения горизонтальной составляющей скорости капель под действием ветра

$$v_{kx} = \frac{u[(u + v_{kx_0} \sqrt{k_x}) \cdot e^{2C_T u \sqrt{k_x}} - (u - v_{kx_0} \sqrt{k_x})]}{\sqrt{k_x} [(u + v_{kx_0} \sqrt{k_x}) \cdot e^{2C_T u \sqrt{k_x}} - (u - v_{kx_0} \sqrt{k_x})]}, \quad (43)$$

где v_{kx_0} и v_{kz_0} – проекции вектора скорости вылета капли жидкости из сопла распылителя на неподвижные оси координат, м/с

$$v_{kx_0} = v_{k_0} \sin \gamma_0, \quad (44)$$

$$v_{kz_0} = v_{k_0} \cos \gamma_0. \quad (45)$$

При этом зависимость для определения скорости движения капли примет окончательный вид

$$v_k = \sqrt{v_{kx}^2 + v_{kz}^2} = \left[\left(\frac{u[(u + v_{kx_0} \sqrt{k_x}) \cdot e^{2C_T u \sqrt{k_x}} - (u - v_{kx_0} \sqrt{k_x})]}{\sqrt{k_x} [(u + v_{kx_0} \sqrt{k_x}) \cdot e^{2C_T u \sqrt{k_x}} - (u - v_{kx_0} \sqrt{k_x})]} \right)^2 + \frac{1}{C_T k_z} \left[g - (g - C_T k_z v_{kz_0}^2 e^{-2C_T k_z z}) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (46)$$

С достаточной для практических расчетов точностью, начальная скорость вылета жидкости из сопла распылителя определяется по упрощенной формуле [5, 6]

$$v_{k_0} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{ж}}},$$

где P – давление в напорной магистрали, Па;

$\rho_{ж}$ – плотность распыливаемой жидкости, кг/м³.

Приведенные выше аналитические зависимости позволяют определить траекторию движения капель любой дисперсности, при условии постоянства массы капли, в подвижной сопротивляющейся среде, а также координаты капли в любой момент времени на этой траектории. Так, для определения координат x_1 и z_1 точки перехода криволинейного участка траектории падения капли в прямолинейный M' (рис. 1) в формулы (39) и (40) следует подставить параметры, определяемые зависимостями (11), (12), (44) и (45). После преобразований получим

$$x_1 = -\frac{1}{2C_T k_x} \ln \left| \frac{u^2 - k_x \cdot v_{kx}^2}{u^2 - k_x \cdot v_{kx_0}^2} \right|, \quad (47)$$

$$z_1 = -\frac{1}{2C_T k_z} \ln \left| \frac{g - C_T k_z v_{kz}^2}{g - C_T k_z \cdot v_{kz_0}^2} \right|. \quad (48)$$

Из уравнения (48) следует, что скорость воздушного потока не оказывает влияния на движение капли в вертикальной плоскости. Если в результате расчетов по данной формуле окажется, что $z_1 \geq h$ (капля

жидкости достигает обрабатываемой поверхности раньше или в момент наступления режима прямолинейного установившегося движения, что характерно для крупных капель), то движение капли от момента вылета из сопла распылителя до момента соприкосновения с обрабатываемой поверхностью будет происходить по траектории неустановившегося движения. В момент падения капли на обрабатываемую поверхность, ее координаты определяются из уравнений (39) – (43), при условии, что $z = h$.

Участок траектории с равномерным движением капли характеризуется координатами x_2 и z_2 . Расстояние z_2 от точки M' траектории до обрабатываемой поверхности определяется из соотношения (рис. 1)

$$z_2 = H - z_1.$$

Координата x соприкосновения капли с обрабатываемой поверхностью определяется по зависимости

$$x = x_1 + x_2 = x_1 + z_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma'$$

Расстояние, на которое будет снесена капля пестицида относительно обрабатываемого объекта, определяется зависимостью

$$Sn = x - a.$$

Заключение

В статье предложена методика инженерного расчета кинематических параметров движения капель рабочего раствора пестицидов в подвижной воздушной среде. В результате теоретических исследований получены зависимости для определения скорости движения капли в заданный момент времени (46) и ее вертикальной и горизонтальной составляющих (42), (43), а также координат ее положения (39), (40) в зоне неустановившегося (47) и (48) – установившегося

движения. Получено уравнение траектории падения капель в зоне неустановившегося движения (41).

Полученные зависимости позволяют не только смоделировать процесс падения капель в подвижной воздушной среде, но и исследовать потери препарата в результате сноса ветром. Данная методика может использоваться на стадиях проектирования сельскохозяйственных опрыскивателей и устройств защиты факела распыла от прямого воздействия ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеенко, О.В. Методика инженерного расчета кинематических параметров движения капель рабочего раствора пестицидов в воздушной среде / О.В. Гордеенко, И.С. Крук, Э. Каминский, А.А. Новиков // Агропанорама, 2011. – № 6. – С 6-10.
2. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление для втузов: учеб. пос. для втузов. – 13-е изд. – М.: Наука, 1985. – 432 с.
3. Гордеенко, О.В. Повышение эффективности ухода за посевами овощных культур на гребнях совершенствованием оборудования для ленточного внесения гербицидов: дис. ...канд. техн. наук / БГСХА. – Горки, 2004. – 218 с.
4. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 610 с.
5. Бородин, В.А. Распыливание жидкости. – М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.
6. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитяткин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

Микропроцессорная система кормления свиней

Предназначена для оперативного изменения доз кормления, контроля процесса кормления, учета расхода сухого и жидкого корма.

Разработанная система позволяет автоматизировать процесс кормления свиней, повысить эффективность и снизить издержки производства свинины.

Основные технические данные

1. Полная совместимость с типовым технологическим оборудованием КПС-54, КПС-108.
2. Нормированное кормление, оперативное изменение норм кормления.
3. Расчет фактических объемов замеса и раздачи жидкого корма без остатков.
4. Сокращение времени кормления в 1,5...2 раза.
5. Значительно дешевле и лучше западных аналогов.

