

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПАДЕНИЯ КАПЕЛЬ ПРИ ВНЕСЕНИИ РАБОЧИХ РАСТВОРОВ ПЕСТИЦИДОВ ПОЛЕВЫМИ ШТАНГОВЫМИ ОПРЫСКИВАТЕЛЯМИ

И.С. Крук,

проректор по научной работе БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье обоснованы факторы, которые необходимо учитывать при моделировании процесса падения капель пестицидов. Отмечено, что при моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов важными параметрами являются их скорость витания (скорость равномерного движения) и продолжительность (расстояние и время) фазы неустановившегося движения. Предложены уточненные зависимости для определения скорости витания капли пестицида, учитывающие траектории их движения.

Ключевые слова: опрыскиватель, распылитель, факел распыла, капля пестицида, диаметр, скорость витания, коэффициент сопротивления среды.

The factors to be taken into account when modeling the process of pesticide droplets falling process are substantiated in the article. It is noted that in modeling pesticide working solutions droplets falling important parameters are their hovering velocity (velocity of uniform motion) and duration (distance and time) of the unsteady motion phase. Refined dependences for determining the velocity of pesticide droplet hovering, taking into account their trajectories, are proposed.

Key words: sprayer, atomizer, spray torch, pesticide droplet, diameter, vortex velocity, medium resistance coefficient.

Введение

В современном мире производится большое количество средств защиты растений с различным содержанием действующих веществ и степенью воздействия, как на объект обработки, так и на окружающую среду. Эффективность использования рабочих растворов пестицидов в растениеводстве определяется качественным их внесением в наиболее чувствительный период развития вредоносных объектов с наименьшими потерями препаратов. Технологически необоснованное и необдуманное, а также нерациональное с точки зрения снижения качества, увеличения объемов и потерь, вызванных воздействием метеорологических условий, их внесение может привести к серьезным последствиям, которые скажутся на качестве и объемах урожая не только возделываемой культуры, но и на культурах соседних полей и последующих севооборотов.

Качество опрыскивания во многом определяется согласованной и оптимальной работой систем опрыскивателя, а также соблюдением требуемых эксплуатационных и технологических режимов его работы. Одним из основных показателей качества и биологической эффективности пестицидов при опрыскивании является дисперсность распыла, которая существенным образом влияет на норму внесения рабочего раствора, степень покрытия обрабатываемой поверхно-

сти и величину потерь, связанных со сносом, испарением и скатыванием капель с обрабатываемых поверхностей растений. Следует отметить, что на каждый процент неравномерности распределения рабочего раствора приходится 0,4 % по объему его неэффективного применения, то есть 8 % рабочей жидкости теряется при ее распределении по ширине захвата опрыскивателя с неравномерностью 20 % [1]. Диаметр и скорость падения капель, степень монодисперсности факелов распыла, метеорологические условия и свойства окружающей среды являются основными показателями процесса распыления, влияющими на равномерность распределения препаратов по ширине захвата опрыскивателя и по поверхностям объектов обработки. В результате различных исследований установлены поражения сельскохозяйственных культур гербицидами на больших расстояниях от обрабатываемых полей вследствие сноса капель рабочих растворов ветром, восходящими воздушными потоками, а также воздействия температурной и воздушной инверсий [2-6]. Опрыскивание культур с оптимальной дисперсностью факела распыла позволяет снизить норму внесения рабочего раствора на 10 %, а в некоторых случаях – на 25 %. Повышение качества опрыскивания обеспечивает также снижение расхода воды на 25...50 % [7]. Поэтому исследованиям дисперсности факела распыла, закономерностям осаждения капель рабочих растворов пестицидов с учетом

состояния окружающей среды в настоящее время уделяется большое внимание.

Теоретические и экспериментальные исследования падения и осаждения капель на обрабатываемые поверхности, а также некоторые аспекты процесса их выноса за пределы обрабатываемых участков приведены в работах Броунштейна Б.И., Ванга Ш., Вульфа Т., Гордеенко О.В., Дмитрачкова В.П., Келбалиева Г.И., Клочкова А.В., Кот Т.П., Маркевича А.Е., Нагорского И.С., Никитина Н.В., Ньютенса Д., Ольшевского В.П., Рогова В.П., Ронкина В.С., Спиридонова Ю.Я., Степука Л.Я., Тостенсона А., Фишбеина Г.А., Четхана С., Шестакова В.Г. и других ученых и практиков. Однако единого подхода к моделированию процесса падения капель без существенных допущений, упрощений и ограничений в настоящее время не получено. Это отражается на величине погрешностей между теоретическими и экспериментальными исследованиями [8].

Целью данной работы является исследование процесса осаждения капель рабочих растворов пестицидов в факелах распыла полевого штангового опрыскивателя и обоснование факторов, которые необходимо учитывать при моделировании их движения.

Основная часть

Моделирование процесса падения капель рабочих растворов пестицидов заключается в составлении алгоритма, позволяющего определить параметры воздушно-капельных потоков, удовлетворяющих заданным агротехническим и экологическим требованиям с учетом состояния окружающей среды, а также проанализировать работу систем опрыскивателя. Его задачи направлены на определение кинематических параметров движения капель в факелах распыла, необходимых для описания процессов их осаждения и взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями, проникновения вглубь растительных слоев, объемной обработки культур с высокой степенью облиственности. Получаемые при этом результаты являются основой для обоснования конструктивных и технологических характеристик распылителей, параметров их установки, а также устройств, обеспечивающих равномерное распределение препаратов по обрабатываемому объекту и снижающих их потери при обработках в ветреную погоду.

В большинстве случаев моделирование процесса падения капель сводится к применению законов механики к исследованиям характера движения единичной капли, принимаемой за твердую сферическую частицу [5; 9,10] при неизменных параметрах состояния окружающей среды, эксплуатационных режимах опрыскивателей и метеорологических условиях. Процесс опрыскивания растений пестицидами является нестационарным, так как осуществляется в постоянно меняющихся условиях, учесть которые при проведении теоретических и лабораторных исследований зачастую не представляется возможным. Метеорологические условия и состояние окружающей среды могут существенно изменяться при работе опрыскивателей даже в пределах одного обрабатываемого

поля [4, 5]. Кроме того, при дроблении жидкости распылителями образуется большое количество капель различного дисперсного состава, которые, двигаясь по своим траекториям с разными начальными скоростями, образуют воздушно-капельный факел распыла. Полет отдельной капли не отражает реальную динамику процесса, так как движение в факеле распыла представляет собой более сложное взаимодействие большого числа капель. Созданное групповое движение капель увлекает за собой окружающий воздушный поток, скорость которого становится постоянной на некотором расстоянии от распылителя. Поэтому моделирование движения капель распыленной жидкости в факеле распыла является сложной задачей, решение которой требует комплексного подхода. Он основан на применении моделей, представляющих собой совокупность уравнений, описывающих зависимости между главными параметрами факелов распыла и состоянием окружающей среды. При этом должны учитываться закономерности формирования и гидродинамическая структура воздушно-капельного потока, воздействие различных сил, взаимодействие капель между собой и окружающей средой, физико-химические свойства рабочего раствора и окружающей среды, движение восходящих потоков, возникающие инверсии и другие факторы [11, 12].

Основными технологическими параметрами при эксплуатации полевых штанговых опрыскивателей являются: рабочая скорость агрегата $v_{\text{агр}}$, давление в напорной гидравлической магистрали $p_{\text{ж}}$, высота установки штанги (распылителя) H_p над обрабатываемой поверхностью (рис. 1), которая определяется типом и характеристиками распылителей (форма и размер выходного сопла, угол при вершине факела распыла γ_p). Согласно проведенным исследованиям, установлено, что при изменении высоты установки штанги всего на 10 см (колесо опрыскивателя скопировало неровность поверхности поля) расход жидкости в зоне перекрытия увеличивается на 40 %, а в остальной – снижается на 30 % [13, 14]. В условиях хорошо выровненной поверхности поля, при скорости движения трактора 8 км/ч амплитуда колебаний крайних точек штанги длиной 12 м может достигать ± 20 см [13, 14]. При увеличении высоты установки штанги на 10 см потери препарата из-за сноса капель возрастают в два раза, которые дополнительно увеличиваются при сильном ветре [13, 14]. Замена распылителей с углом при вершине факела распыла 80–90° на распылители с углом 110–120° позволяет уменьшить высоту установки штанги на 0,25 м [13, 14].

Оптимальная высота установки штанги выбирается из условия, при котором пересечение факелов распыла соседних распылителей происходит на середине расстояния между штангой и обрабатываемой поверхностью [13]. При этом формируются следующие области движения (рис. 1): осаждение капель в одиночном факеле распыла 2, снос мелких капель в межфакельное 3 и боковое 4 пространства, факел сносимых ветром крупных капель 5, движение капель в зоне пересечения соседних факелов распыла 6 (рис. 1).

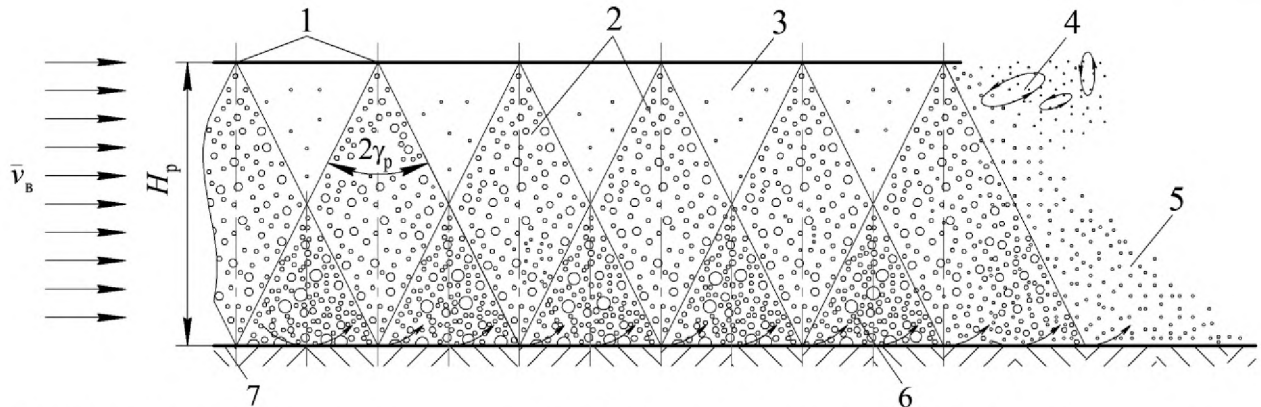


Рисунок 1. Схема к обоснованию закономерностей движения капель в факелах распыла гидравлических распылителей полевого штангового опрыскивателя: 1 – распылитель; 2 – факел распыла; 3 – межфакельное пространство; 4 – зона воздушного выноса капель; 5 – зона сноса капель ветром; 6 – зона перекрытия соседних факелов; 7 – обрабатываемый объект

Наибольший интерес с точки зрения моделирования процесса падения капель и определения количественных и качественных показателей выполнения технологической операции представляют зоны 2 и 6, а с точки зрения экологии и потерь – 4 и 5 (рис. 1). При моделировании можно рассматривать следующие варианты падения капель:

- движение капель по определенным не пересекающимся траекториям в факеле распыла под воздействием внешних факторов до полного осаждения на обрабатываемую поверхность;
- движение капель в факеле распыла до линии пересечения двух соседних факелов распыла;
- движение и взаимодействие капель в зоне перекрытия двух соседних факелов распыла.

На закономерности падения капель в пересекающихся факелах распыла существенное влияние оказывают их начальные условия на границах областей. Следует отметить, что в зоне 6 возможны пересечения траекторий

движения капель соседних факелов распыла, в результате чего возможны как их слияние, так и деление.

Рассмотрим стадии движения капель в факелах распыла, начиная с момента вылета из выходного сопла, до момента оседания на поверхности обрабатываемого объекта. Из сопел гидравлических распылителей вылетают струи жидкости, сформированные в виде пленок (рис. 2а), геометрические размеры которых определяются конструктивными параметрами распылителей и рабочим давлением в напорной жидкостной магистрали. На небольшом расстоянии от распылителя h_ϕ (фаза распада) пленки распадаются, и образуется воздушно-капельный поток с каплями различных диаметров. Капли, имея запас энергии, определяемый их начальными диаметрами d_{k0i} и скоростями вылета из области распада струи v_{k0i} , движутся по своим траекториям с различными скоростями в направлении обрабатываемого объекта, находящегося на расстоянии h_k под действием силы тяжести

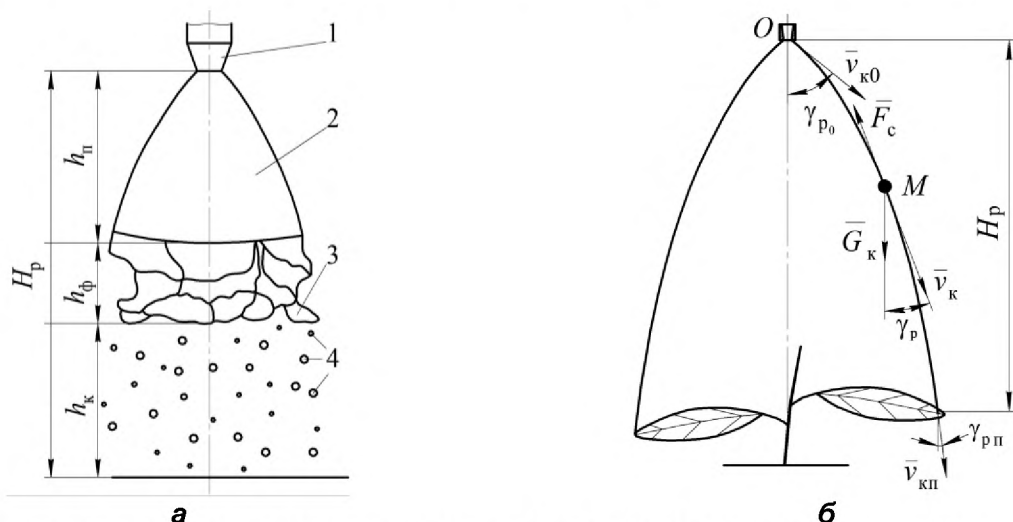


Рисунок 2. Процесс образования и падение капель [3, монография]: 1 – распылитель; 2 – пленка жидкости; 3 – распадающаяся пленка; 4 – капли факела распыла; H_p – высота установки распылителя над обрабатываемой поверхностью; h_n – высота пленки струи жидкости; h_ϕ – высота фазы распада пленки; h_k – высота падения капель

$\overline{G_k}$ и сил сопротивления воздушной среды $\overline{F_c}$ (рис. 2б). Через некоторый период времени данные силы взаимно уравновешиваются и капли продолжают падение с постоянной скоростью (скорость витания) [15, 16].

На начальном этапе моделирования важными условиями являются: правильное определение расстояния, на котором происходит распад струи, размеров образующихся капель и величин их начальных скоростей [17, 18], а также степени влияния на закономерности их движения, состояния и параметров окружающей среды. Скорости вылета капель из области распада струи имеют различные величины и находятся в пределах 10...25 м/с [17]. При этом капли более 70 мкм на расстоянии 0,04 м от сопла (область распада струи) имеют скорость 16...18 м/с, а капли менее 70 мкм – 10...12 м/с [17, 19]. Увеличение давления в нагнетательной жидкостной магистрали опрыскивателя для большинства конструкций гидравлических распылителей приводит к более мелкому распылу и увеличению начальных скоростей мелких капель, покидающих зону распада пленки [20, 21]. Однако в сравнении с большими, капли меньшего диаметра замедляются быстрее вследствие воздействия сопротивления воздуха. Так, капля диаметром 100 мкм при начальной скорости 20 м/с, пролетая за 0,1 с 0,2 м, переходит во взвешенное состояние и подвергается воздействию внешних климатических условий. Капля диаметром 200 мкм достигает своей конечной скорости падения через 0,2 с, за которое пролетает 0,625 м [21]. Следует отметить, что при моделировании необходимо учитывать различные значения скорости воздуха в факеле распыла под распылителем, которые для щелевых распылителей находятся в пределах 1,75–10 м/с [18], 0,7–1,2 м/с – для инжекторных распылителей. Скорость воздушного потока, увлекаемого водяными каплями диаметром 1 мм, становится постоянной на расстоянии 1,8 м от распылителя. При работе на повышенных скоростях капли рабочего раствора пестицида подвергаются дополнительному воздействию набегающего потока воздуха, создаваемого движущимся агрегатом. Так, при рабочей скорости опрыскивателя 8 км/ч на капли дополнительно действует воздушный поток со скоростью 2 м/с, а при вероятной скорости 30 км/ч – уже 8 м/с [1; 5; 14]. При проведении опрыскивания в ветреную погоду (агротехника возделывания допускает скорость ветра до 4 м/с) капли дополнительно воспринимают воздействие создаваемого им воздушного потока F_b .

Анализ результатов исследований движения капель в различных средах показывает, что полученные зависимости для определения кинематических параметров имеют различную степень точности и согласованности с результатами экспериментов, проведенных в лабораторных и полевых условиях. Это характеризуется использованием различных допущений и ограничений, связанных с определением значений начальных скоростей падения капель, пренебрежением или исключением из расчетов различных факторов состояния окружающей среды, а также применением

разных подходов к учету сил сопротивления и определения величины коэффициента сопротивления окружающей воздушной среды. Так, применение допущения о сферической форме капель и постоянстве коэффициента аэродинамического сопротивления среды при расчете скорости свободного падения капель диаметром более 2 мм завышение теоретических результатов над экспериментальными составляет 30 % [16].

Определяющим теоретическим параметром при опрыскивании принимается скорость витания капли в неподвижной среде $v_{кв}$, а не ее конечная скорость падения (осаждения) $v_{кп}$ на обрабатываемую поверхность. При этом многими исследователями не делаются различия между значениями этих скоростей, то есть принимается равенство: $v_{кп} = v_{кв}$ [22]. Определению величин скоростей витания и осаждения капель на обрабатываемые поверхности посвящено большое количество работ. Однако в их результатах наблюдаются существенные различия. При этом многие из них применимы для описания процесса падения капель, диаметр которых более 1 мм, что не может использоваться при моделировании процесса опрыскивания рабочими растворами пестицидов. При свободном падении капель больших размеров их формы деформируются в лобовой части, что приводит к образованию вогнутости [15], из-за чего в дальнейшем происходит их деление на более мелкие. Данное явление следует учитывать при моделировании движения капель диаметром более 2,4 мм, которыми опрыскивание пестицидами производиться не должно. Падение капель диаметром менее 1 мм можно рассматривать как падение твердых сфер, пренебрегая их деформацией и применяя законы Н.Е. Жуковского и Стокса к движению недеформированных тел. Однако условия их обтекания воздушной средой отличны вследствие наличия внутреннего вихря Хилла [16], что влияет на величину коэффициента сопротивления, который при некоторых условиях достигает минимума, а затем увеличивается до величины постоянного максимума при равновесной форме движения и постоянной скорости витания.

Скорость витания капли может быть определена двумя методами: экспериментальным или теоретическим из условия равновесия силы тяжести и аэродинамического сопротивления $\overline{G_k} = \overline{F_c}$ (рис. 2б). Сила тяжести капли определяется по формуле

$$G_k = m_k g,$$

где m_k – масса капли, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила аэродинамического сопротивления воздуха состоит из двух составляющих [23]: силы лобового сопротивления F_{c1} и силы вязкого трения F_{c2} , то есть

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}.$$

Сила лобового сопротивления капли определяется по формуле

$$F_{c1} = \frac{\xi \cdot S_k \cdot \rho_b}{2} \cdot v_k^2, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления движению капли в окружающей среде. Он зависит от ее геометрии и скорости падения, а также параметров окружающей среды. Для капель сферической формы, движущихся в диапазоне малых скоростей, он принимается равным 0,43...0,5 [5; 9; 16; 22; 25];

S_k – площадь миделева сечения капли, м²;

ρ_b – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³; $\rho_b = 1,29$ кг/м³.

v_k – скорость движения капли, м/с.

Силы вязкого трения оказывают влияние на движение капель, диаметр которых не превышает 500 мкм [23], и определяются по формуле

$$F_{C2} = 3 \cdot \pi \cdot \eta_b \cdot d_k \cdot v_k, \quad (2)$$

где η_b – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м²; $\eta_b = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м²;

d_k – диаметр капли, м.

Учитывая, что каждая капля движется по своей траектории, и обозначив через γ_p угол наклона к вертикали касательной, проведенной к ней в определенной точке, общее уравнение равновесия капли примет следующий вид:

$$m_k g \cos \gamma_p = \frac{\xi \cdot S_k \cdot \rho_b \cdot v_k^2}{2} + 3 \cdot \pi \cdot \eta_b \cdot d_k \cdot v_k. \quad (3)$$

В большинстве исследований рассматривается частный случай движения капель – вертикальное падение ($\gamma_p = 0$) без учета воздействия силы вязкого трения F_{C2} . То есть уравнение равновесия принимает вид: $\bar{G}_k = \bar{F}_{C1}$, для которого получены различные формулы для определения скорости витания капель [7; 19; 22; 24, 25]

$$v_{kb} = \sqrt{\frac{4d_k g \rho_b}{3\xi \rho_b}}. \quad [7; 24, 25]. \quad (4)$$

Данная формула во многих работах имеет разный вид вследствие использования различных значений коэффициента сопротивления $\xi = 0,43 \dots 0,5$.

Для отдельной изолированной круглой капли диаметром менее 50 мкм, движущейся в неограниченной воздушной среде, скорость ее витания может быть определена по формуле Стокса для ламинарного режима движения [19; 24]:

$$v_{kb} = \frac{gd_k^2(\rho_k - \rho_b)}{18\nu_b \rho_b}, \quad (5)$$

где ρ_k – плотность капли, кг/м³; $\rho_k = 1000$ кг/м³; ν_b – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; $\nu_b = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Для капель диаметром менее 100 мкм приближенно скорость падения может быть определена по формуле [19]

$$v_{kb} = kd_k^2, \quad (6)$$

где k – корректирующий коэффициент, (м·с)⁻¹; $k = 3 \cdot 10^7$.

С учетом плотности окружающей среды формула (4) принимает следующий вид [22; 24]:

$$v_{kb} = \sqrt{\frac{4gd_k(\rho_k - \rho_b)}{3\xi \rho_b}}. \quad (7)$$

С учетом равенства (3) зависимость для определения скорости витания вертикально падающей капли имеет вид:

$$v_{kb} = \sqrt{\frac{144\eta_b^2}{\xi^2 \rho_b^2 d_k^2} + \frac{4g\rho_k d_k}{3\xi \rho_b} - \frac{12\eta_b}{\xi d_k \rho_b}}, \quad (8)$$

С учетом различных траекторий движения капель зависимости (4) и (8) примут следующие виды:

$$v_{kb} = \sqrt{\frac{4d_k g \rho_b \cos \gamma_p}{3\xi \rho_b}}. \quad (9)$$

$$v_{kb} = \sqrt{\frac{144\eta_b^2}{\xi^2 \rho_b^2 d_k^2} + \frac{4g\rho_k d_k \cos \gamma_p}{3\xi \rho_b} - \frac{12\eta_b}{\xi d_k \rho_b}}. \quad (10)$$

Как видно из представленных зависимостей, для определения величины скоростей падения капель необходимо знать показатели внешней среды: плотность, кинематическую и динамическую вязкость окружающего воздуха, коэффициент сопротивления среды, зависящие от температуры. Кроме того, температура окружающего воздуха определяет интенсивность изменения массы и размеров капель [18; 26]. Коэффициент сопротивления является важной характеристикой и определяет суммарное воздействие сил трения и динамического давления и зависит от размеров и формы капель, состояния среды и условий их обтекания. Правильное определение его величины является важным условием моделирования (рис. 3). На нестационарном участке траектории движения капель коэффициент сопротивления является переменной величиной, изменяющейся по сложному закону [16]. При наличии подвижной воздушной среды возникает турбулентность, поэтому коэффициент сопротивления на протяжении всей траектории падения капли может иметь различные значения.

Величина коэффициента сопротивления характеризуется значением числа Рейнольдса (Re), определяемого по формуле [16; 22; 27]

$$Re = \frac{v_k d_k}{\nu_b}. \quad (11)$$

Капли жидкости принимаются за твердые сферы при выполнении условия [16]:

$$Re \leq 4,55 \left(\frac{\sigma_k^3}{g(\rho_k - \rho_b) \nu_b^2 \rho_b^2} \right)^{0,21},$$

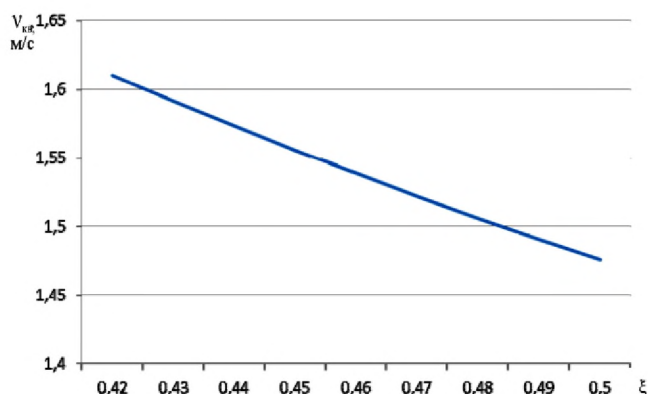


Рисунок 3. График зависимости скорости витания от величины коэффициента сопротивления среды ξ

где $\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения капли, Н/м.

Подставив в данное неравенство числовые значения величин, получим, что при температуре рабочей жидкости и воздуха, равной 20 °С, капли можно считать сферическими при соблюдении условия: $Re \leq 502$. Данное условие соблюдается для всего спектра дисперсности капель, допустимых агротехникой при опрыскивании рабочими растворами пестицидов. Графическая зависимость ξ от Re для шарообразной частицы, осаждаемой в неподвижной среде, на основе опытных данных построена Рэлеем [22]. Исходя из нее, имеются разные подходы и зависимости для расчета коэффициента сопротивления в пределах определенных значений чисел Рейнольдса, отличающиеся различной точностью. Наиболее используемыми являются следующие формулы для определения коэффициента потерь:

$$\xi = \frac{24}{Re}, \quad [16; 22] \text{ при } Re \leq 2; \text{ (ламинарный ре-}$$

$$\text{жим движения)} \quad v_{кв} = \frac{d_k^2 (\rho_{ж} - \rho_{в}) g}{18 \nu_{в} \rho_{в}};$$

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}, \quad [16; 22] \text{ при } 2 < Re \leq 500; \text{ (переходной режим)}$$

$$v_{кв} = \frac{0,78 d_k^{1,14} (\rho_{ж} - \rho_{в})^{0,715}}{\nu_{в}^{0,43} \rho_{в}^{0,715}}.$$

$\xi = 0,43 \dots 0,5$, [16; 22] при $500 < Re \leq 200000$ (турбулентный режим). При $\xi = 0,44$ формула для определения скорости витания принимает следующий вид:

$$v_{кв} = 5,46 \sqrt{\frac{d_k (\rho_{ж} - \rho_{в})}{\rho_{в}}}.$$

Анализ формул показывает, что при первом условии сила сопротивления воздушной среды пропорциональна скорости падения капли в первой степени ($F_c \sim v_k$), при втором – $F_c \sim v_k^{1,4}$, при третьем – $F_c \sim v_k^2$.

Применение данных зависимостей требует знания режима движения капель. Для его определения используется метод Лященко, основанный на определении критерия Архимеда (Ar) по формуле [22; 27]:

$$Ar = \frac{d_k^3 g (\rho_{ж} - \rho_{в})}{\nu_{в}^2 \rho_{в}}. \quad (12)$$

Режим движения капель определяется по следующим условиям: $Ar \leq 36$ (ламинарный); $36 < Ar \leq 83000$ (переходной); $Ar > 83000$ (турбулентный).

Графические зависимости изменения скоростей витания от параметров капель и факторов состояния окружающей среды, рассчитанные по различным формулам, представлены на рисунке 4. Графические

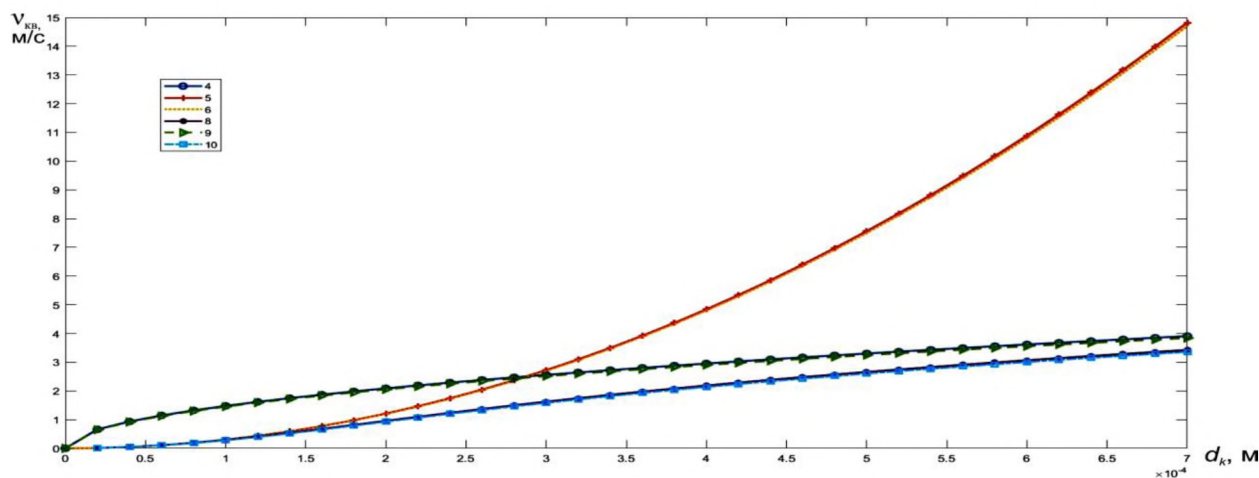


Рисунок 4. Графические зависимости скоростей витания капель от диаметра, построенные по зависимостям (4) – (10)

зависимости экспериментальных исследований скорости движения капель на расстоянии 0,5 м от распылителя (высота установки штанги) представлены на рисунках 5, 6 [19].

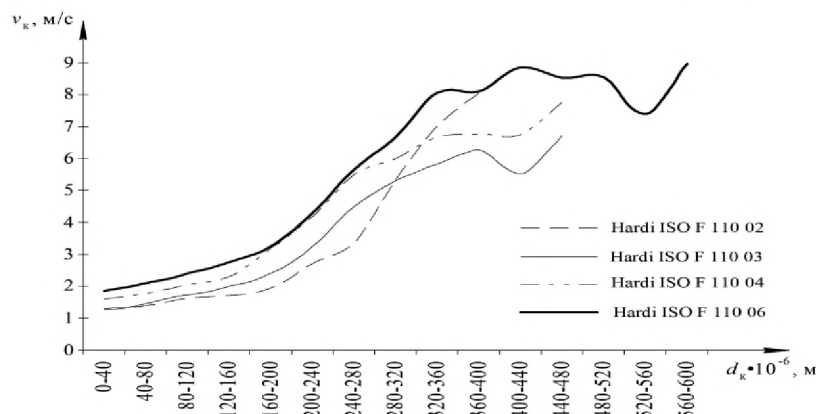


Рисунок 5. Графики зависимости средних скоростей капель в зависимости от типа распылителей и диаметра капель на расстоянии 0,5 м от выходного сопла при давлении 0,3 МПа в жидкостной магистрали [17, 19]

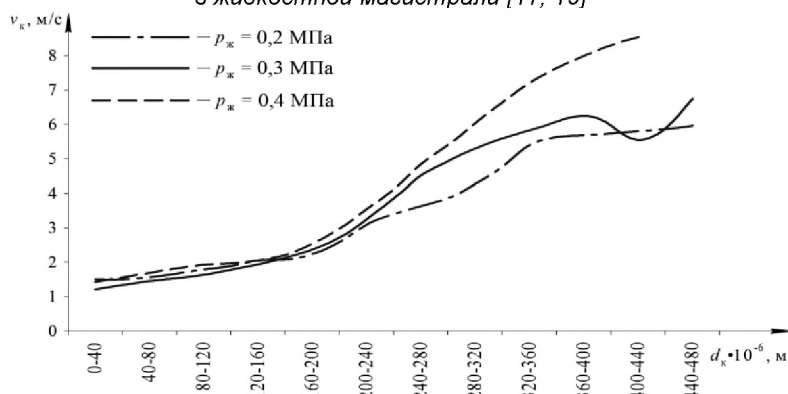


Рисунок 6. Графики зависимости средней скорости движения капель от давления в гидравлической магистрали на расстоянии 0,5 м от выходного сопла распылителя Hardy ISO F 110 03 [17]

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований (рис. 4-6) можно сделать следующие предположения:

- 1) не все факторы, воздействующие на каплю в процессе ее полета от сопла до обрабатываемой поверхности, учтены при определении скорости витания;
- 2) капли диаметром более 100 мкм (при наименьшей скорости вылета из сопла – 16 м/с) при осаждении на обрабатываемую поверхность не достигли величин скоростей витания, имеющих меньшие значения, чем скорость осаждения.

Очевидно, что наилучшим является условие, при котором время начала равномерного движения

капли превышает время ее движения между распылителем и обрабатываемой поверхностью. Важно, чтобы до истечения данного времени капля осела на поверхности целевого объекта. То есть теоретическое

расстояние, которое пролетит капля до наступления момента витания, должно быть большим, чем высота установки распылителя над обрабатываемой поверхностью. При этом на величину расстояния, которое капля должна пролететь до обрабатываемой поверхности, существенное влияние оказывают такие факторы, как скорость и направление ветра. При прямом воздействии ветра на факел распыла мелкие капли будут выноситься в межфакельное пространство, а затем и в сторону из зоны обработки [5]. Там их концентрация будет определяться скоростью ветра, размерами капель и скоростями их осаждения. Расстояние $L_{зд}$, которое пролетит капля в неподвижном воздухе при равнозамедленном движении до наступления стадии равномерного падения, можно определить по следующей формуле [19]:

$$L_{уд} = \frac{v_{к0} d_{к0}^2 \rho_{ж}}{18 \cdot \nu_{в} \rho_{в}}. \quad (13)$$

Построенная по данной формуле графическая зависимость (рис. 7) показывает, что капли диаметром менее 100 мкм в пределах начальных скоростей вылета из сопла распылителя достигают скорости витания до момента осаждения на обрабатываемую поверхность, в то время как большие достигнут ее значения на расстоянии,

превышающем высоту установки распылителей (рис. 5). Поэтому важными параметрами, учитываемыми при

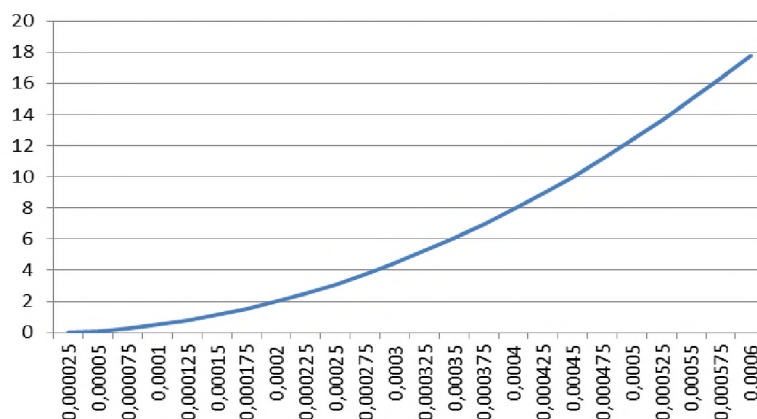


Рисунок 7. График зависимости расстояния, пролетаемого каплей до наступления стадии витания, от ее диаметра при наименьших скоростях вылета из сопла распылителя

моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов, являются: расстояние, на котором капля достигнет скорости витания, и время, за которое она его преодолеет.

Величина скорости осаждения определяет характер взаимодействия капель с обрабатываемой поверхностью [5], при котором возможны следующие варианты: прилипание капель к обрабатываемой поверхности, скатывание и отскакивание от нее. При этом наиболее рациональным является первый вариант. Скорость капель существенным образом определяет величину потерь вследствие сноса (чем больше скорость капель при осаждении, тем меньше расстояние, на которое они сносятся).

Из изложенного выше следует, что при моделировании процесса падения капель рабочих растворов пестицидов необходимо учитывать следующие значимые факторы:

- начальные условия вылета капель из сопла распылителя (форма, размеры, начальные скорости падения образующихся капель, расстояние, на котором происходит распад жидкостной пленки, их изменение при колебаниях штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях);
- свойства и параметры состояния окружающей среды, а также метеорологические условия;
- величину скорости витания капель и расстояние перехода капель в равномерное движение;
- взаимодействие капель в зонах пересечения соседних факелов распыла;
- параметры осаждения капель (скорость осаждения, угол падения) и их взаимодействие с поверхностями обрабатываемого объекта.

Заключение

Приведен анализ закономерностей движения капель в факелах распыла при внесении рабочих растворов пестицидов штанговыми опрыскивателями. Обоснованы факторы, влияющие на закономерности движения капель рабочих растворов пестицидов от распылителя до обрабатываемой поверхности. Отмечено, что при моделировании процесса опрыскивания рабочими растворами пестицидов в растениеводстве можно применять законы динамики, описывающие движение капель, как твердые тела шарообразной формы.

Выполнен анализ формул для определения скоростей витания, на основе которого получены уточненные зависимости для их определения.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что капли диаметром более 100 мкм при высоте установки штанги над обрабатываемой поверхностью при осаждении не достигают величины скорости витания.

Сделан вывод, что при моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов, кроме определения скорости осаждения, важными параметрами являются расстояние и время перехода стадии неустановившегося движения капель в установившееся (равномерное).

Обоснованы факторы, которые необходимо учитывать при моделировании процесса падения капель пестицидов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T24MH-005.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башкирев, А.П. Анализ работы полевых опрыскивателей / А.П. Башкирев, А.А. Шварц, А.Ю. Шкабенко // Наука в Центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С. 51-58.
2. The Misplay of our Generation / Tom Wolf // Sprayers 101. – URL: <https://sprayers101-com.translate.goog/misplay>. – 2017 (date of access: 16.08.2024).
3. Fundamentals of Spray Drift / Tom Wolf // Sprayers 101. – URL: <https://sprayers101-com.translate.goog/fundamentals-of-spray-drift>. – 2021 (date of access: 16.08.2024).
4. Защита растений в устойчивых системах земледелия: в 4 кн. / Под общей ред. Д. Шпаара. – Торжок: ООО «Вариант», 2004. – Кн. 4. – 345 с.
5. Крук, И.С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей: монография / И.С. Крук, Т.П. Кот, О.В. Гордеенко. – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.
6. Schönenberger, Urs T. Are spray drift losses to agricultural roads more important for surface water contamination than direct drift to surface waters? / Urs T. Schönenberger, Janine Simon, Christian Stamm // Science of the Total Environment. – 2022. – № 809. – P. 1-12.
7. Ключков, А.В. Механизация химической защиты растений: монография / А.В. Ключков, А.Е. Маркевич. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2008. – 228 с.
8. Comparison of the mechanistic AGDISP ground boom spray model with experimental data / R.J. Connell, W.C. Schou, D. Nuytens, T.M. Wolf, J-P.Praat // New Zealand Plant Protection. – 2012. – № 65. – P. 93-99.
9. Гордеенко, О.В. Повышение эффективности ухода за посевами овощных культур на гребнях совершенствованием оборудования для ленточного внесения гербицидов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Гордеенко Олег Васильевич; Белорус. гос. с.-х. академия. – Горки, 2004. – 169 с.
10. Ольшевский, В.П. К моделированию падения испаряющейся капли диспергированного огнетушащего вещества / В.П. Ольшевский, С.В. Ольшевский // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – № 1. – С. 41-45.
11. Келбалиев, Г.И. Основы теории осаждения и всплывания твердых частиц, капель и пузырей в изотропном турбулентном потоке / Г.И. Келбалиев // Азербайджанский химический журнал. – 2015. – № 2. – С. 6-27.

12. Келбалиев, Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы / Г.И. Келбалиев // Основы теории химической технологии. – 2011. – № 3. – С. 248-266.
13. Роттенберг, Ю.Ю. Высота штанги полевого опрыскивателя / Ю.Ю. Роттенберг, И.А. Редкозубов // Защита и карантин растений. – 2011. – № 5. – С. 42-43.
14. Теория и практика опрыскивания / И.А. Редкозубов [и др.]. – DuPont; Lechler, 2010. – 19 с.
15. Рогов, В.П. К расчету скорости витания капля воды / В.П. Рогов, О.В. Повалихина // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз. – 2007. – № 19. – С. 91-95.
16. Рогов, В.П. Коэффициент сопротивления частиц и капель / В.П. Рогов // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз. – 2007. – № 19. – С. 95-105.
17. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays / D. Nyuttens [et al.] // American Society of Agricultural Engineers. – 52 (5). – P. 1471-1480.
18. The influence of operator controlled variables on spray drift from field crop sprayers. / D. Nyuttens [et al.] // Transactions of the ASABE. – 2007. – № 50 (4). – P. 1129-1140.
19. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods / D. Nyuttens [et al.] // Biosystems Engineering. – 2009. – № 103 (3). – P. 271-280.
20. Agricultural sprays in cross flow and drift. / M. Farooq [et al.] // Agricultural engineering research. – 2001. – № 78 (4). – P. 347-358.
21. Herbicide application methodologies: influence of nozzle selection, droplet size and spray drift on effective spraying – a review. / C.R. Chethan [et al.] // Innovative Farming. – 2019. – № 4 (1). – P. 45-53.
22. Барский, М.Д. Фракционирование порошков / М.Д. Барский. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
23. Коркин, Р. Капля дождя / Р. Коркин // Квант. – 2020. – № 11. – С. 34-37.
24. Иванов, Е.Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1990. – 384 с.
25. Ронкин, В.С. Исследование способов уменьшения потерь пестицидов при опрыскивании полей Белоруссии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ронкин Владимир Самуилович. – Минск, 1977. – 18 с.
26. Крук, И.С. Определение кинематических параметров падения капель рабочего раствора пестицидов при опрыскивании с учетом изменения их геометрических размеров / И.С. Крук, Ю.В. Чигарев, В. Романюк // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2020. – Т. 58, № 3. – С. 352-363.
27. Кравцов, М.В. Характер движения и скорости свободно падающих одиночных шаров в жидкостях / М.В. Кравцов, А.М. Кравцов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 80-87.
28. Крук, И.С. К обоснованию силового воздействия капли пестицида на обрабатываемую поверхность / И.С. Крук // Агропанорама. – 2014. – № 6 (106). – С. 13-16.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.05.2025

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб., ведомственная подписка - 52,71 руб.