

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЕТРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ФАКЕЛОВ РАСПЫЛА РАБОЧИХ РАСТВОРОВ ПЕСТИЦИДОВ К ПОЛЕВЫМ ОПРЫСКИВАТЕЛЯМ

И. С. КРУК, А. А. АНИЩЕНКО

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220023

О. В. ГОРДЕЕНКО, В. И. СОРОКА

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: olegordeenko70@mail.ru

(Поступила в редакцию 04.09.2025)

Несмотря на то, что современные технологии и оборудование для внесения средств защиты растений значительно повысили равномерность распределения капель рабочих растворов по обрабатываемым поверхностям, проблема снижения потерь пестицидов вследствие воздействия переменчивых метеорологических условий все еще остается актуальной. В некоторых случаях влияние факторов окружающей среды и неспособность применяемого оборудования им противостоять приводит к тому, что небольшая часть дозы химического вещества оседает на поверхностях целевого объекта, вследствие чего желаемый биологический эффект не достигается.

Одним из важных факторов оценки эффективности и безопасности применения пестицидов в растениеводстве является величина потерь рабочих растворов из-за сноса при обработках в ветреную погоду. Несмотря на многочисленные исследования, проблема сноса и осадения пестицидов за пределами обрабатываемых участков не решена.

В статье приведен анализ способов и технических решений снижения потерь пестицидов из-за сноса и обосновано использование ветрозащитных устройств с различными конструктивными исполнениями рабочих элементов. На основе всестороннего анализа результатов исследований разработаны общие требования к конструкциям ветрозащитных устройств. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании, модернизации и эксплуатации полевых штанговых опрыскивателей.

Целью работы, выполняемой в рамках международного проекта T24MN-005 при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, является исследование направлений и устройств снижения расхода пестицидов и их потерь.

Ключевые слова: пестициды, потери, снос, ветер, ветрозащитное устройство, капля, экран.

Despite the fact that modern technologies and equipment for applying plant protection products have significantly improved the uniformity of working solution droplet distribution across treated surfaces, the problem of reducing pesticide losses due to variable weather conditions remains relevant. In some cases, the influence of environmental factors and the inability of the equipment to withstand them leads to a small portion of the chemical dose settling on the surfaces of the target object, resulting in the desired biological effect not being achieved. One of the important factors in assessing the effectiveness and safety of pesticide application in crop production is the amount of spray solution loss due to drift during windy conditions. Despite numerous studies, the problem of droplet drift and pesticide deposition outside the treated areas remains unresolved.

This article analyzes methods and technical solutions for reducing pesticide losses due to drift and substantiates the use of windbreaks with various working element designs. Based on a comprehensive analysis of research results, general requirements for windbreak design have been developed. The research results can be used in the design, modernization, and operation of field boom sprayers.

The aim of this work, carried out within the framework of the international project T24MN-005 with financial support from the Belarusian Republican Foundation for Basic Research, is to investigate methods and devices for reducing pesticide consumption and losses.

Key words: pesticides, losses, drift, wind, windbreak, droplet, screen.

Введение

Проблема сноса капель рабочего раствора пестицидов и осадения их вне объектов обработки остается серьезной для человека, флоры и фауны, экологии окружающей среды.

Закономерности процесса сноса и факторы, определяющие величину потерь пестицидов, изложены во многих научных трудах ученых и практиков [1–21]. Метеорологические факторы окружающей среды играют важную роль в возникновении и протекании сноса капель распыленных рабочих растворов пестицидов. Наиболее важным технологическим параметром, влияющим на величину потерь при сносе, является размер распыляемых капель. Результатами многочисленных исследований и наблюдений отмечается, что эффективность химической защиты растений определяется степенью монодисперсности факела распыла (размером и количеством образуемых капель) [1–6]. При этом мелкие капли, обеспечивающие высокую степень покрытия обрабатываемых поверхностей, под влиянием

янием факторов окружающей среды, вследствие испарения и сноса, существенно увеличивают потери препаратов, снижая эффективность защиты растений. Установлено, что борьба с вредителями может быть неэффективной при малых объемах внесения с покрытием поверхностей растений каплями диаметром более 200 мкм [2]. Крупные капли менее подвержены воздействию метеорологических факторов, обеспечивают низкую степень покрытия обрабатываемых поверхностей и подвержены скачиванию с них. Во многих работах определен различный предельный размер склонных к сносу капель, который находится в пределах 100...200 мкм. В работе [3] сделан вывод, что сносу наиболее подвержены капли диаметром менее 150 мкм, в [4, 5] – менее 200 мкм, а в [6] отмечено, что при скорости ветра от 0,5 до 4 м/с вероятность сноса становится незначительной для капель диаметром от 150 до 200 мкм. Такой диапазон, на наш взгляд, обоснован неодинаковыми условиями, в которых проводились лабораторные и полевые исследования, а также различием и непостоянством величин воздействующих метеорологических факторов, в частности скорости ветра. При штанговом опрыскивании капли диаметром до 100 мкм сносятся за пределы обрабатываемой полосы, а диаметром до 50 мкм полностью испаряются, не достигнув цели [7–10]. Расстояние, на которое сносится рабочий раствор (при прочих равных условиях), возрастает с увеличением скорости ветра, высоты установки распылителя, и уменьшается с увеличением начальной скорости падения капель диаметром более 100 мкм. Изменение температуры окружающей среды и относительной влажности оказывают гораздо большее влияние на расстояние сноса капель диаметром менее 100 мкм, чем капель диаметром более 200 мкм [11].

В результате проведенных исследований были определены направления, позволяющие исключить или снизить потери пестицидов из-за сноса [9, 10, 12], которые основаны на трех концепциях:

- отсутствие проведения технологических операций химической защиты растений методом опрыскивания в неблагоприятных метеорологических условиях;
- сокращение количества мелких капель в факелах распыла и снижение объема распыляемого вещества, содержащегося в них;
- сохранение траектории движения мелких капель при помощи устройств, обеспечивающих их осаждение на целевой поверхности обработки.

Первое условие может быть не реализовано вследствие возникновения острой необходимости проведения технологических операций в пределах установленных агротехникой возделывания сроков, определяемых степенью поражения культур болезнями, вредителями и сорняками, и требующей безотлагательного применения пестицидов вследствие риска существенных потерь урожая.

Вторая концепция реализуется в двух вариантах: разработка конструкций специальных распылителей (инжекторные, ротационные, комбинированные), обеспечивающих сокращение количества мелких капель в факеле распыла [8, 9, 10, 13, 14], и использование специальных химических препаратов (замедлителей осаждения капель), уменьшающих объем распыляемого вещества, содержащегося в мелких каплях [15–18].

Третья концепция основана на применении различных способов и технологий, обеспечивающих транспортировку капель к обрабатываемому объекту, и ветрозащитных устройств факелов распыла [9, 12, 14, 19]. В основе технологий транспортировки капель заложен принцип сохранения их траекторий движения под действием дополнительных сил, создаваемых электростатическим полем [13, 20] или высокоскоростным направленным потоком (струей) сжатого воздуха [9, 19, 21].

Существуют три основных метода электростатической зарядки капель распыленной жидкости: коронная кондуктивная и индукционная [20]. При первом методе электроды генерируют ионы коронного разряда, которые взаимодействуют с каплями рабочих растворов, придавая им электрический заряд. Зарядка коронным разрядом может быть ненадежной и, как правило, обеспечивает более слабый заряд, чем другие методы зарядки при распылении. Кондуктивная зарядка осуществляется за счет непосредственного контакта электрода с распыляемым рабочим раствором, что не обеспечивает должной степени безопасности вследствие прямого электрического контакта, и может привести к короткому замыканию и увеличению рабочих токов. Индукционная зарядка является самым безопасным и надежным методом и осуществляется за счет создания сильного электрического поля, которое заряжает распыляемые капли при относительно малом токе [20]. Технологии электростатической зарядки растворов, несмотря на свою эффективность, влекут существенное удорожание опрыскивателя и снижение его производительности вследствие уменьшения рабочей ширины захвата [19] и не находят широкого применения в растениеводстве.

На величину потерь по причине сноса существенным образом оказывают влияние расстояние до обрабатываемой поверхности, скорость и направление ветра [9], поэтому необходимо оградить факел распыла от прямого воздействия ветра. Одним из направлений является применение ветрозащитных устройств. По принципу действия их можно разделить на три группы: пассивные, активные, комбинированные [9].

Технологии, основанные на создании струй сжатого воздуха, транспортирующих капли (*air-assist*, *air-plus*, *twin force*), позволяют уменьшить величину потерь препаратов из-за сноса ветром, однако в сухую погоду приводят к снижению эффективности обработки вследствие создания пылевой завесы, поднимаемой с поверхности поля почвенных частиц [8, 9]. Поэтому основное внимание в решении проблемы снижения потерь пестицидов из-за сноса ветром уделяется разработке конструкций ветрозащитных устройств, которые позволяют либо оградить факел распыла от воздействия вызывающих снос факторов (направленного воздушного потока (ветра) и создаваемой им турбулентности), либо увеличить скорость движения капель при сохранении траекторий их падения [9, 14, 19, 21]. Они рассматриваются в качестве альтернативы дорогостоящим опрыскивателям с воздухораспределительными системами и электростатической зарядкой раствора. Преимуществами ветрозащитных устройств являются простота конструкции, низкая стоимость, высокая технологическая и конструктивная надежность в сравнении с используемыми в объемных опрыскивателях осевыми вентиляторами большой мощности [22]. При этом степень снижения скорости ветра в области факела распыла определяется материалом и параметрами установки экранов [23].

Основная часть

Для оценки степени сноса рабочей жидкости используются следующие показатели: дальность сноса капель, степень сноса (объем снесенной или осевшей на целевом объекте обработки жидкости, либо объем осевшей жидкости за пределами целевого объекта обработки на различных расстояниях). Одним из них является расстояние между осевой линией факела распыла и центром масс собранной жидкости, определяемое по следующей формуле [12]:

$$D_c = \frac{\sum_{i=1}^n V_i l_i}{\sum_{i=1}^n V_i},$$

где V_i – объем жидкости в i -той мерной емкости, л;

l_i – расстояние от оси распылителя до центра i -той емкости, где измеряется объем жидкости, м.

Меньшее значение D_c указывает на меньший снос и большее осаждение жидкости вблизи сопла. Однако данный параметр не дает полной информации о количестве снесенной жидкости. Его можно оценить через коэффициент целевого использования жидкости (КЦИЖ), измеряемый в долях или процентах [9, 34], и определяемый по формулам:

$$K_{\text{ЦИЖ}} = \frac{m_3}{m_{\text{общ}}} = \frac{V_3}{V_{\text{общ}}},$$

или

$$K_{\text{ЦИЖ}} = \frac{m_3}{m_{\text{общ}}} \cdot 100\% = \frac{V_3}{V_{\text{общ}}} \cdot 100\%,$$

где m_3 , $m_{\text{общ}}$ – соответственно масса рабочей жидкости, осевшая на целевом объекте обработки, и масса рабочей жидкости, прошедшая через распылитель за определенный период времени, кг; V_3 , $V_{\text{общ}}$ – соответственно объем рабочей жидкости, осевшей на целевом объекте обработки, и объем рабочей жидкости, прошедший через распылитель за определенный период времени, м³.

Сравнительные исследования эффективности применения пассивного и активного (пневматического) ветрозащитных устройств показали, что установка экрана (щитка) может снизить снос капель до 70 % [24]. При различном соотношении скорости опрыскивателя к скорости ветра один и тот же экран уменьшает снос с подветренной стороны на 65 %, но в сравнении с базовым вариантом (без экрана) происходит увеличение отложений с подветренной стороны на 81 % [24]. Уменьшение медианно-объемного диаметра распыляемых капель с 320 мкм до 100 мкм при использовании плоскофа-

кельных распылителей приводит к увеличению сносимой жидкости в три раза [25]. При этом установка ветрозащитного экрана на штанге опрыскивателя позволяет снизить снос в 1,8–2,75 раз [25]. При скоростях ветра 4,18–8,33 м/с и расходе рабочей жидкости 0,75 л/мин установка защитных экранов при использовании щелевых распылителей с углами при вершине факела распыла 80 и 110° позволяет снизить снос капель примерно в два раза [26]. В зависимости от конструкции применяемых экранов потери капель рабочего раствора и-за сноса при использовании плоскоструйных распылителей уменьшаются на 85–95 % [27]. При этом их использование не оказывает существенного влияния на равномерность распределения жидкости по обрабатываемой поверхности.

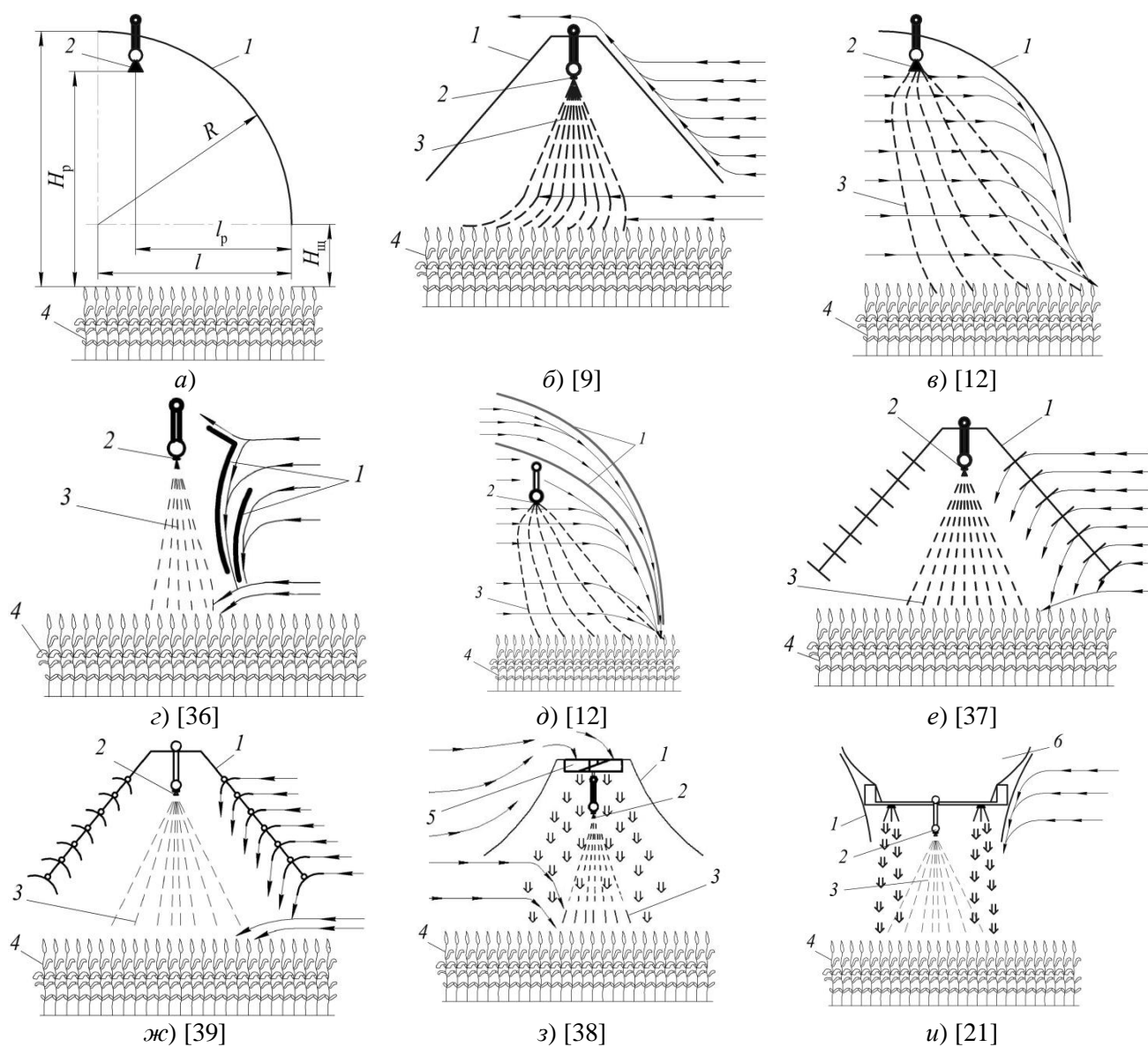
Использование защитных экранов совместно с электростатической зарядкой рабочей жидкости при обработках посевов ячменя позволяет увеличить количество осевших на растениях капель, но при этом возникает проблема их осаждения также и на рабочей поверхности щитка [28]. На посевах пшеницы в сравнении с перфорированным пластиковым экраном, установленным с двух сторон штанги с открытым доступом к распылителям сверху и небольшими щитками конусообразного типа, закрепленными на каждом распылителе, наиболее эффективна установка сплошного пластикового экрана, закрывающего пространство от штанги до верхнего уровня растений [29]. Однако при этом возникают следующие недостатки: отсутствие визуального контроля за работой распылителей, ограниченный доступ к ним, а также осаждение капель рабочей жидкости на рабочих поверхностях щитков. Применение инжекторных распылителей в сравнении со щелевыми плоскоструйными позволяет снизить снос распыленной жидкости на 81–94 %, а совместное их использование с ветрозащитными экранами – на 95–99 % [30]. Различное конструктивное исполнение и параметры установки ветрозащитных устройств относительно распылителей на штанге опрыскивателя существенно влияют на эффективность защиты факелов распыла от воздействия ветра [12, 30].

Основными технологическими параметрами, определяющими эффективность ветрозащитного устройства, являются количество, конструкция, общая площадь рабочих поверхностей и параметры установки друг относительно друга, распылителя и обрабатываемой поверхности щитков, воспринимающих воздействие ветра (рис. 1).

Наименьшая высота установки экрана над обрабатываемой поверхностью определяется возможной амплитудой колебаний концов крайних секций штанги опрыскивателя, то есть эффективностью работы системы ее стабилизации в вертикальной плоскости. В условиях хорошо выровненной поверхности поля при скорости движения трактора 8 км/ч амплитуда колебаний краев штанги длиной 12 м может достигать $\pm 0,20$ м [31,32,33]. Поэтому наименьшее расстояние между нижним краем экрана и верхней точкой обрабатываемой поверхности $H_{\text{нц}}$ должна быть не менее данной величины (рис. 1, а). При меньшем расстоянии установки рабочие поверхности экранов при возникновении вертикальных колебаний штанги будут входить в массив растений, вызывая их повреждение. Увеличение данного параметра, при неизменной высоте установки распылителя $H_{\text{р}}$ влечет увеличение пространства, в которое проникает ветер, что приведет к повышенному воздействию на факел распыла, увеличению объема сносимой жидкости и увеличению значения параметра $D_{\text{с}}$ [12].

В процессе работы опрыскивателя должно обеспечиваться условие равномерности распределения дозы пестицида по обрабатываемой поверхности, а также исключение осаждения капель рабочих растворов не на целевом объекте обработки. Данные требования могут быть нарушены при осаждении капель раствора на элементах и рабочих поверхностях ветрозащитных экранов с последующим неконтролируемым стеканием с них (рис. 1, в). Поэтому рациональная установка ветрозащитных экранов относительно распылителя, определяемая наименьшим расстоянием $l_{\text{р}}$ (рис. 1, а), при котором исключается осаждение капель на их рабочие поверхности, также является важным технологическим параметром, влияющим на качество и энергоемкость проведения технологической операции [9, 34].

Конструктивное исполнение рабочих поверхностей экранов, их форма и параметры установки позволяют эффективно использовать энергию ветра (рис. 1, б–и). Это, в первую очередь, связано с его перенаправлением к обрабатываемому объекту, что позволяет осуществить транспортировку капель рабочих растворов, увеличив их скорость падения при практически не измененных траекториях движения, осуществлять их эффективное проникновение в растительные слои, обеспечивая объемную обработку растений с высокой степенью облиственности (рис. 1, з, д, е, ж). Кроме того, перенаправленный воздушный поток позволяет без существенного изменения величины сносимой жидкости увеличить высоту установки ветрозащитных щитков над обрабатываемой поверхностью.



← — направление ветра <= — создаваемый воздушный поток

Рис. 1. Технологические схемы защиты факела распыла ветрозащитными устройствами различных конструкций:
 а — схема к обоснованию параметров установки ветрозащитного щитка относительно распылителя и обрабатываемого объекта; б в, г, д, е, ж, з, и — схемы рабочих процессов различных ветрозащитных устройств: 1 — ветрозащитный экран (щиток); 2 — распылитель; 3 — факел распыла; 4 — обрабатываемый объект; 5 — вентилятор; 6 — воздухораспределительный рукав

Форма и размеры ветрозащитного устройства увеличивают силу лобового аэродинамического сопротивления агрегата, так как его рабочие поверхности воспринимают воздействие направленного воздушного потока. Кроме того, на энергоёмкость выполнения операции оказывает влияние и возрастающая при установке дополнительных элементов масса опрыскивателя. Сила аэродинамического сопротивления зависит от формы и размеров экранов, ориентации их относительно направления ветра, его скорости, а также от свойств и состояния окружающей среды, в которой осуществляется обработка, и определяется по формуле [40]:

$$F_{C_0} = \xi_{\Sigma} \cdot \frac{\rho_{\text{в}} \cdot v_{\text{в}}^2}{2} \cdot S_{\Sigma},$$

где ξ_{Σ} — коэффициент аэродинамического сопротивления движению в окружающей среде, зависящий от геометрии экранов и скорости движения опрыскивателя, а также скорости ветра и параметров окружающей среды; S_{Σ} — площадь миделева сечения экрана в вертикальной плоскости, м^2 ; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ; $\rho_{\text{в}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $v_{\text{в}}$ — скорость ветра, м/с .

Нерациональные параметры экранов могут привести к существенному возрастанию энергоемкости процесса, возникновению колебаний штанги в горизонтальной плоскости, приводящих к резкому возрастанию неравномерности распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности [8, 31].

Один из вариантов уменьшения площади рабочей поверхности экранов является совместное их использование с устройствами, создающими дополнительные воздушные потоки для транспортировки капель (рис. 1, ж) или воздушные экраны для защиты факела распыла от воздействия ветра (рис. 1, з). Однако использование дополнительных элементов, создающих направленный воздушный поток, увеличивает массу опрыскивателя и его стоимость.

Заключение

При проектировании ветрозащитных устройств следует подобрать такие рациональные форму, геометрические размеры и параметры установки экранов, при которых выполняются следующие требования:

- качественное внесение пестицидов при наименьших потерях из-за сноса и аэродинамическом сопротивлении;
- незначительное увеличение массы опрыскивателя;
- отсутствие механических повреждений обрабатываемых растений и поломок экранов;
- исключение осаждения капель вносимого рабочего раствора на рабочих поверхностях;
- эффективное использование перенаправленного воздушного потока, создаваемого ветром, для защиты факела распыла, транспортировки капель и проникновения средств защиты в растительные массивы.

Поэтому особое внимание при проектировании полевых опрыскивателей следует уделять моделированию и исследованию процесса движения капель рабочих растворов под воздействием метеорологических условий и факторов окружающей среды, а также влиянию материалов, формы и параметров установки ветрозащитных экранов на аэродинамические характеристики агрегата [35].

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith D. B., Harris F. D., Goering C. E. Variables affecting drift from ground sprayers. Transactions of the ASAE 1982, 25(6), 1499–1503.
2. Bode L. E., Butler B. J. Spray characteristics of rotary atomizers. Pesticide Formulations and Application Systems: Second Conference, ASTM Publication STP 7954. Ed., K.G. Seymour, American Society for Testing and Materials Philadelphia. PA. 1983. 89–104.
3. Yates W. E., Cowden R. E., Akesson N. B. Drop size spectra from nozzles in high-speed airstream. Transactions of the ASAE 1985, 28(2), 405–410.
4. Womac A. R., Goodwin J. C., Hart W. E. Tip selection for precision application of herbicides. University of Tennessee Agricultural Experiment Station. Bulletins. https://trace.tennessee.edu/utk_agbulletin/430, 1997. – 48 p.
5. What's the relationship between vapour drift and inversions? / Tom Wolf // *sprayers101* [Электронный ресурс] <https://sprayers101-com.translate.googleusercontent.com/vapour-drift-and-inversions/?> – 2020 (доступ 18.08.2024).
6. Bode L. E. Downwind drift deposits by ground applications. Proceedings of the Pesticide Drift Management Symposium, South Dakota State University, Brookings, SD. 1984. – 50 p.
7. Nuyttens D. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means: Dissertation submitted for the degree of doctor of philosophy: bioengineering / D. Nuyttens. – Leuven, 2007. – 267 p.
8. Защита растений в устойчивых системах землепользования (в 4-х книгах) / Под общей ред. Д. Шпаара. – Торжок: ООО «Вариант», 2004. – кн. 4. – 345 с.
9. 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.
10. Ключков, А. В. Механизация химической защиты растений: монография / А. В. Ключков, А. Е. Маркевич. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2008. – 228 с.
11. Zhu H., Reichard I. L., Fox R. D., Brazee R. D., Ozkan H. E. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. Transaction of the ASAE 1994, 37(5). 1401–1407.
12. Shields to reduce spray drift / H. E. Ozkan [and oth.] // Journal of Agricultural Engineering Research. – 67. – p. 311–322.
13. Никитин, Н. В. Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве / Н. В. Никитин, Ю. Я. Спиридонов, В. Г. Шестаков / под общ. ред. Ю. Я. Спиридонова, В. Г. Шестакова. – М.: Печатный город, 2010. – 200 с.
14. Ключков, А. В. Снижение потерь пестицидов при опрыскивании: монография / А. В. Ключков, П. М. Новицкий, А. Е. Маркевич. – Горки: БГСХА, 2017. – 230 с.
15. Richardson R. D. Control of spray drift with thickening agents. Journal of Agricultural Engineering Research 1974. 19(31), 227–231.
16. Bode L. E., Butler B. J., Goering C. E. Spray drift and recovery as affected by spray thickener, nozzle type and nozzle pressure. Transactions of the ASAE 1976, 18(1), 213–218.
17. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additives on hydrophilic, hydrophobic, and crabapple leaf surfaces / Y. Yu, H. Zhu, H. E. Ozkan, R. C. Derksen, C. R. Krause // Transactions of the ASABE. – № 52(1). – 2009, p. 39–49.
18. Timothy A Ebert. Understanding pesticide spray application // Outlooks on Pest Management. 2007. – p. 234 – 236.

19. We need better drift control technologies / Tom Wolf // <https://sprayers101-com.translate.google/we-need-better-drift-control-technologies> – 2020 (доступ 16.08.2024).
20. Optimization and evaluation of electrostatic spraying systems and their effects on pesticide deposition and coverage inside dense canopy plants / M. Herkins, L. Zhao, H. Zhu, H. Jeon, J. Castilho-Theodoro // *Agronomy*, 2025, 15, p. 1401–1421.
21. Вожик Ю. Г. Використання повітряної зависі для протидії зустрічному вітру під час обприскування польових культур / Ю. Г. Вожик, П. І. Вітрух, Ю. В. Косовець, В. І. Панасюк / *Механізація та електрифікація сільського господарства*. – 2020. – Випуск 11(110). – С. 72–81.
22. Furness G. O. A comparison of simple bluff plate and axial fans for air-assisted, high-speed, low-volume spray application to wheat and sunflower plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1991, 48, 57–75.
23. Cenkowski S., Forbes A. M., Townsend J. Effectiveness of windscreens on modifying airflow around a sprayer boom. *Transactions of the ASAE* 1994, 10(4), 471–477.
24. Smith D. B., Harris F. D., Butler B. J. Shielded sprayer boom to reduce drift. *Transactions of the ASAE* 1982, 25(5), 1136–1140, 1147.
25. Fehringer R. J., Cavaletto R. A. Spray drift reduction with shrouded boom sprayers. ASAE Paper No. 90–1008, St. Joseph, Mich.: ASAE, 1990.
26. Maybank J., Shewchuk S. R., Wallace K. The use of shielded nozzles to reduce off-target herbicide spray drift. *Canadian Agricultural Engineering* 1990, 32, 235–241.
27. Ford R. J. Comparative evaluation of three drift control devices. *Canadian Agricultural Engineering*. 1984, 26(2). 97–99.
28. Lake J. R., Green R., Tofts M., Dix A. J. The effect of an aerofoil on the penetration of charged spray into barley. *Proceedings of the British Crop Protection Conference-Weeds*. BCPC Publications, 1982, 1009–1016.
29. Wolf T. M., Grover R., Wallace K., Shewchuk S. R., Maybank J. Effect of protective shields on drift and deposition characteristics of field sprayers. *Canadian Journal of Plant Science* 1993, 73, 1261–1273.
30. Drift reducing potential of low drift nozzles with the use of spray-hoods / R. L. Roten, J. C. Ferguson, A. J. Hewitt // *New Zealand Plant Protection* 67: 274–277 (2014). – p. 274–277.
31. Крук, И. С. Научно-технические основы проектирования рабочих органов штанговых опрыскивателей / И. С. Крук. – Минск: БГАТУ, 2018. – 272 с.
32. Ротенберг, Ю. Ю. Высота штанги полевого опрыскивателя / Ю. Ю. Ротенберг, Т. В. Раскатова, И. А. Редкозубов // *Защита и карантин растений*. – 2011. – № 5. – С. 42–43.
33. Петровская, Е. В. Повышение равномерности распределения рабочей жидкости штангового опрыскивателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Е. В. Петровская. – Челябинск, 2006. – 195 с.
34. 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 / О. В. Гордеенко. – Горки, 2004. – 169 с.
35. Крук, И. С. Особенности моделирования процесса падения капель при внесении рабочих растворов пестицидов полевыми штанговыми опрыскивателями / И. С. Крук // *Агропанорама*. – 2025. – № 3(169). – С. 2–10.
36. Штанга опрыскивателя с ветрозащитными устройствами: пат. 3928 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, А. Е. Маркевич, О. В. Гордеенко, А. И. Гайдуковский, М. И. Назарова, Е. В. Послед; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20070215; заявл. 26.03.2007; опубл. 30.10.2007 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2007. – № 5 (58). – С. 163.
37. Штанга опрыскивателя с ветрозащитными устройствами: пат. 6648 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, О. В. Гордеенко, Е. В. Послед, А. И. Гайдуковский, Г. Ф. Назарова, А. А. Новиков, П. Э. Гринкевич; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20100267; заявл. 18.03.2010; опубл. 30.10.2010 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2010. – № 5 (76). – С. 161.
38. Штанга опрыскивателя с ветрозащитными устройствами: пат. 16589 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, Е. В. Послед, О. В. Гордеенко, С. В. Якубовский, П. Э. Гринкевич, Г. Ф. Назарова; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20100608; заявл. 08.06.2010; опубл. 30.12.2012 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2012. – № 6 (89). – С. 62.
39. Штанга опрыскивателя с ветрозащитными устройствами: пат. 9714 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, В. А. Агейчик, Д. Р. Мальцев, О. В. Гордеенко; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20130442; заявл. 28.05.2013; опубл. 30.12.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2013. – № 6 (95). – С. 171.
40. Евграфов, А. Н. Аэродинамика автомобиля: учебное пособие / А. Н. Евграфов. – М.: МГИУ, 2010. – 356 с.