

## СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ФАКЕЛОВ РАСПЫЛА ПЕСТИЦИДОВ В КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛЕВЫХ ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ

И. С. КРУК, Т. П. КОТ, Е. В. СЕНЧУРОВ

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь, 220012, e-mail: kruk\_igar@mail.ru

О. В. ГОРДЕЕНКО, В. И. СОРОКО

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

Г. ГАНТУЛГА

Монгольская академия аграрных наук,  
г. Улан-Батор, Монголия, 14200

Л. ЛХАГВАСУРЭН

Монгольский государственный аграрный университет,  
г. Улан-Батор, Монголия, 17024

(Поступила в редакцию 10.02.2026)

*В современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур особое внимание уделяется эффективности проведения технологических операций, связанных с внесением химических средств защиты растений от вредителей, болезней и сорняков. Некачественное, нерациональное и необоснованное использование пестицидов оказывает существенное отрицательное воздействие на экологию окружающей среды, влечет увеличение себестоимости конечной продукции и вероятность накопления в ней остаточных количеств ядохимикатов. Качество внесения рабочих растворов пестицидов штанговыми опрыскивателями определяется множеством факторов: технического (состояние и уровень совершенствования агрегата, способность выполнять требования агротехники возделывания) и технологического (фазы развития сорных и культурных растений, пораженность и состояние объекта обработки, соблюдение технологических режимов работы) характера, а также состоянием окружающей среды. Поэтому важным направлением является совершенствование технологий и средств механизации, позволяющих снизить дозу вносимых препаратов и их потери.*

*В статье рассмотрено одно из направлений повышения эффективности химической защиты растений – использование опрыскивателей с системами воздушного сопровождения факелов распыла. Приведен анализ способов взаимного расположения гидравлических и воздухораспределительных систем в конструкциях опрыскивателей, обоснованы технологические и конструктивные требования к ним.*

*Таким образом, разработка технологий и технических средств, позволяющих качественно с наименьшими потерями внести средства защиты растений при воздействии метеорологических факторов окружающей среды, является важной задачей агропромышленного комплекса и сельскохозяйственного машиностроения.*

**Ключевые слова:** система, воздушный поток, факел распыла, объемная обработка, качество, опрыскиватель, распылитель.

*Modern agricultural cultivation technologies place particular emphasis on the efficiency of operations involving the application of chemicals to protect plants from pests, diseases, and weeds. Poor, irrational, and unjustified use of pesticides has a significant negative impact on the environment, leading to increased costs of the final product and the potential for the accumulation of pesticide residues. The quality of pesticide application using boom sprayers is determined by many factors: technical (the condition and level of sophistication of the unit, its ability to meet cultivation requirements) and technological (the developmental stages of weeds and crops, the severity and condition of the treated area, and adherence to operating procedures), as well as environmental conditions. Therefore, improving technologies and mechanization tools that reduce the application rate and losses is an important area.*

*This article examines one approach to improving the effectiveness of chemical plant protection: the use of sprayers with air-assisted spray systems. An analysis of the relative positions of hydraulic and air distribution systems in sprayer designs is provided, and the technological and design requirements for them are substantiated.*

*Therefore, developing technologies and technical tools that enable high-quality application of plant protection products with minimal losses under the influence of meteorological factors is an important task for the agro-industrial complex and agricultural engineering.*

**Key words:** system, air flow, spray torch, volumetric processing, quality, sprayer, atomizer.

### Введение

Постоянное расширение перечня разрешенных к использованию средств защиты растений предъявляет соответствующие требования к совершенствованию технологий их внесения и конструкциям средств механизации для обеспечения высокой эффективности и безопасности применения для об-

служивающего персонала и окружающей среды [1–3]. Научой и практикой доказано, что эффективность препаратов при опрыскивании определяется соблюдением сроков обработки (30 %), состоянием агрегата и качеством опрыскивания (30 %), обоснованным ассортиментом препаратов целевого назначения (30 %), прочими причинами (10 %) [4,5].

Вследствие воздействия внешних неуправляемых факторов зачастую внести пестициды в оптимальные сроки с требуемым качеством и с соблюдением необходимой дозы препарата не всегда представляется возможным по причине возникновения существенных потерь. Это в первую очередь связано с воздействием на процесс осаждения жидкостных полидисперсных систем ветра, турбулентных восходящих потоков и инверсий, параметров окружающего воздуха [1, 3]. При дроблении рабочей жидкости гидравлическими распылителями образуется полидисперсный распыл, при котором большое количество капель различных размеров движутся по своим траекториям с различными скоростями в направлении обрабатываемого объекта, образуя воздушно-капельный факел распыла. Значения начальных скоростей вылета капель при распаде струи находятся в пределах 10...30 м/с [7–12]. 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 [7, 9]. Двигаясь в факеле распыла, капли подвергаются постоянному воздействию факторов окружающей среды, которые могут существенно изменяться при работе опрыскивателей даже в пределах одного обрабатываемого поля [3,6]. Вследствие воздействия сопротивления окружающей среды скорость движения капли уменьшается по мере удаления от распылителя до тех пор, пока ее сила тяжести не станет равной силам сопротивления воздуха. После чего, при условии отсутствия воздействия на нее ветра и восходящих воздушных потоков, она движется равномерно с постоянной скоростью (скоростью витания).

Экспериментальными исследованиями установлено, что через 1–2 секунды после вылета из сопла распылителя скорость капли становится равной  $v_k = 1/k$  ( $k$  – коэффициент, характеризующий сопротивление среды, ее плотность и другие характеристики, с/м) [8]. При этом для капель различных размеров, имеющих неодинаковые начальные скорости вылета из сопла распылителя, фаза витания наступает в разный период времени и на различном расстоянии от распылителя. Так, капля диаметром 100 мкм при начальной скорости 20 м/с, пролетает за 0,1 секунду 0,2 м, а капля диаметром 200 мкм достигает скорости витания через 0,2 с, за которое преодолет 0,625 м (табл. 1). Наилучшим является условие, при котором время начала стадии витания капли превышает время ее движения между распылителем и обрабатываемой поверхностью, то есть теоретическое расстояние, которое пролетит капля до наступления момента витания должно быть большим, чем высота установки распылителя над обрабатываемой поверхностью [11].

Таблица 1. Величины сноса капель жидкости с высоты падения 0,5 м в зависимости от их диаметра и скорости ветра [3,6,13,15–17]

Диаметр капель, мкм	Скорость оседания капель, м/с	Скорость ветра, м/с		
		2	3	4
10	0,003	333,0	500,0	833,3
20	0,012	83,3	225,0	208,0
40	0,046	21,7	32,6	54,2
60	0,100	10,0	15,0	25,0
80	0,170	5,9	8,8	14,7
100	0,250	4,0	6,0	10,0
120	0,340	2,9	4,4	7,4
140	0,430	2,3	3,5	5,8
200	0,720	1,4	2,1	3,5
250	0,900	1,1	1,7	2,8
300	1,150	0,9	1,3	2,2
400	1,600	0,6	0,9	1,6
500	2,200	0,5	0,7	1,1

На величину расстояния, которое капля пролетит, прежде чем осесть на обрабатываемую поверхность, существенное влияние оказывают такие факторы, как высота установки штанги, угол наклона распылителей, скорость и направление ветра. Достигая растений, воздушно-капельный факел обтекает их, содержащиеся в нем капли осаждаются на листьях, стеблях и почве под действием инерционных и гравитационных сил. Внутри растительного покрова и над ним воздействует ветер и восходящие от земли потоки воздуха, скорость которых значительно превышает скорость осаждения мелких капель. Поэтому они движутся над растительным покровом по измененным траекториям, постоянно испаряясь и уменьшаясь в размерах, что увеличивает потери из-за сноса за пределы обрабатываемого

участка и вынос химических средств защиты растений в верхние слои атмосферы. Вследствие этого при опрыскивании всегда отмечаются непроизводительные потери пестицидов из-за сноса мелких капель (20–80 мкм) и стекания крупных (360–1000 мкм) с обрабатываемых поверхностей на почву. Поэтому капли оптимальных диаметров находятся в пределах 80–360 мкм [14], максимальный диаметр которых определяется назначением операций защиты растений: для внесения инсектицидов, фунгицидов и контактных гербицидов – 200 мкм, почвенных гербицидов – 300 мкм [3, 12, 16, 18]. Крупные капли, попадая на обрабатываемую поверхность (например, листья), могут отскакивать и скатываться, что приводит к загрязнению почвы. Так, капли размером 400 мкм содержат действующего вещества в 1000 раз больше, чем капли размером 40 мкм, а капли размером 300 мкм — в 3500 раз больше, чем капли размером 20 мкм [17]. Кроме того, при осаждении капель на верхней поверхности листа, зачастую нижняя остается необработанной. При обычном опрыскивании пшеницы на верхнюю часть растений попадает 6–16 мг/кг, а на нижнюю – только 2–4 мг/кг [18].

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 [2, 3]. При движении тракторного агрегата в безветренную погоду по полю со скоростью 10 км/ч за ним создается турбулентный след возмущенных воздушных масс, движущихся в поперечном направлении со скоростью до 0,4 м/с [3, 12]. Поэтому пестициды рекомендуется вносить с максимальными рабочими скоростями опрыскивателя 6–8 км/ч при использовании щелевых гидравлических опрыскивателей и до 10 км/ч – при использовании инжекторных [2, 3].

Многими исследованиями установлено, что потери гербицидов при сносе достигают 20...90 %. До 70 % объема распыленной жидкости и до 80 % объема вносимых пестицидов не достигают объекта обработки [1,3]. Сносимое облако распыленной жидкости может переноситься на большие расстояния. Повреждения сельскохозяйственных культур иногда обнаруживаются на расстоянии 20 км [1, 3, 15, 16]. Вследствие этого могут быть повреждены другие посевы, чувствительные к гербицидам и не требующие ими обработки, а отложениями пестицидов – загрязнены водоемы, окружающая среда обитания животных и жизнедеятельности человека. Неравномерное распределение по обрабатываемой поверхности приводит к вероятности загрязнения конечной продукции остаточными количествами средств химизации, или снижению эффективности химической защиты растений вследствие малых доз препаратов на недостаточно обработанных участках.

Целью работы, выполняемой в рамках международного проекта T24MH-005 при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, является исследование направлений и устройств повышения качества внесения рабочих растворов пестицидов и снижение их потерь вследствие воздействия метеорологических факторов окружающей среды.

### **Основная часть**

Вопросы эффективного использования средств механизации для внесения рабочих растворов пестицидов и обоснования путей снижения потерь при их применении отражены в работах В. А. Бумажкина, И. Н. Велецкого, И. А. Виковича, Ю. Г. Вожика, В. П. Дмитрачкова, А. В. Клочкова, Н. Н. Краховецкого, С. Н. Ладутько, З. В. Ловкиса, А. Е. Маркевича, И. С. Нагорского, Н. В. Никитина, В. И. Панасюка, В. Р. Петровца, С. Ф. Прокопенко, Ю. Ю. Роттенберга, Е. Л. Ревякина, И. А. Редкозубова, Л. Я. Степука, В. В. Ченцова, В. Г. Шестакова, P. G. Andersen, P. Balsari, C. R. Chethan, R. J. Connell, B. K. Cooke, S. Cooper, E. C. Hislop, D. Nuyttens, H. E. Ozkan, G. M. Richardson, M. M. Sidahmed, Yu Seung-Hwa, W. A. Taylor, T. Wolf, J. C. Van de Zande, B. W. Young и других.

В большинстве из них отмечено, что повысить качество химических обработок посевов с соответствующим снижением энергетических и материальных затрат позволяет опрыскивание с воздушным сопровождением факела распыла. Известно, что мелкие капли, летящие в факеле распыла, быстро теряют импульс, придаваемый гидравлической системой, и стремятся принять скорость и воздействие окружающего воздушного потока. Создание струи воздуха, направленной от распылителя к целевому объекту, позволяет увеличить кинетическую энергию капель, что позволит сократить время их пребывания в воздухе, уменьшить объем сносимого рабочего раствора, и увеличить его количество на обрабатываемых поверхностях. Поэтому основными задачами систем сопровождения факелов распыла являются обеспечение транспортировки капель к обрабатываемому объекту при незна-

чительном изменении траекторий падения, защита их от воздействия ветра и наилучшее покрытие всех поверхностей обрабатываемых растений (объемная обработка).

Значимых достижений в разработке опрыскивателей с пневматическими системами добились производители сельскохозяйственной техники *Hardi* (система *Twin Force*), *RAU* (*Air Plus*), *Jacto*, *Dammann*, *Tecnoma* и другие. Используемые в их конструкциях системы воздушного сопровождения в зависимости от способа введения факела распыла в воздушный поток можно разделить на три группы (рис. 1) [3, 18–22]. К первой группе относятся системы, в которых выходные отверстия воздухораспределительной системы направлены либо вертикально вниз, либо под небольшим углом к вертикали и располагаются выше, чем гидравлические распылители (рис. 1,а). Вертикально направленный воздушный поток наклоняет стебли, доходит до поверхности почвы и частично отражается, в это время происходит подача капель препарата, часть которых оседает на верхней части листьев. Распыленные капли, не достигнув поверхности почвы, поднимаются отраженным потоком вверх и оседают на нижней стороне листьев, на стеблях и нижней части растений. В системах второй группы распылители установлены вертикально вниз, а воздушный поток направлен под углом к нему (рис. 1,б).

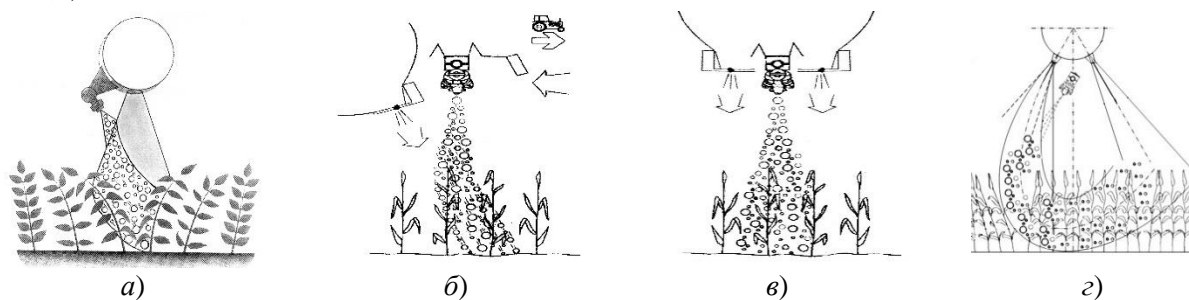


Рис. 1. Схемы относительного расположения выходных элементов гидравлических и воздушных систем в современных опрыскивателях: *RAU AirPlus* (а) [3, 18, 19], *Hardi Twin Stream* (б) [3, 18, 19], *Dammann DT 2400H S5 Highlander* (в) [20, 21], двухструйный воздушный поток (г) [22]

К третьей – относятся системы, в которых распылители установлены внутри направленных воздушных потоков (рис. 1,в, г). Воздушный поток сжатого воздуха, выходящий из щелей распределительного пневматического рукава, расположенных симметрично в направлении движения относительно факела распыла, создает «воздушные экраны», движущиеся вниз со скоростью, превышающей скорость бокового потока ветра в приземном слое, что позволяет снизить или исключить воздействие ветра на факел распыла. При этом воздушный поток, выходящий из щелей за распылителями, перенаправляет восходящие от поверхности почвы воздушные потоки и транспортирует витающие в воздухе капли в направлении обрабатываемого объекта. В некоторых случаях конструктивные параметры установки распылителей и воздушного потока можно регулировать в зависимости от направления ветра и движения агрегата (рис. 2).

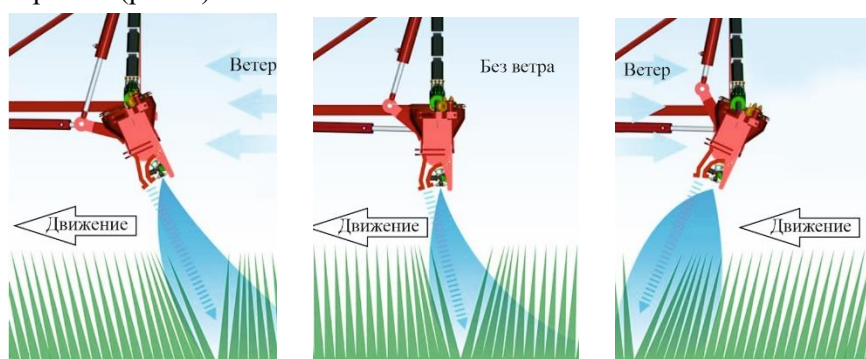


Рис. 2. Опрыскиватель *Agrifac* с системой *AirFlowPlus* [23]

Воздушно-капельный факел распыла, выбрасываемый из распылителя, смешивается с воздушным потоком пневматической системы на некотором расстоянии от штанги, скорость которого определяет диаметр сформированных капель (рис. 3).

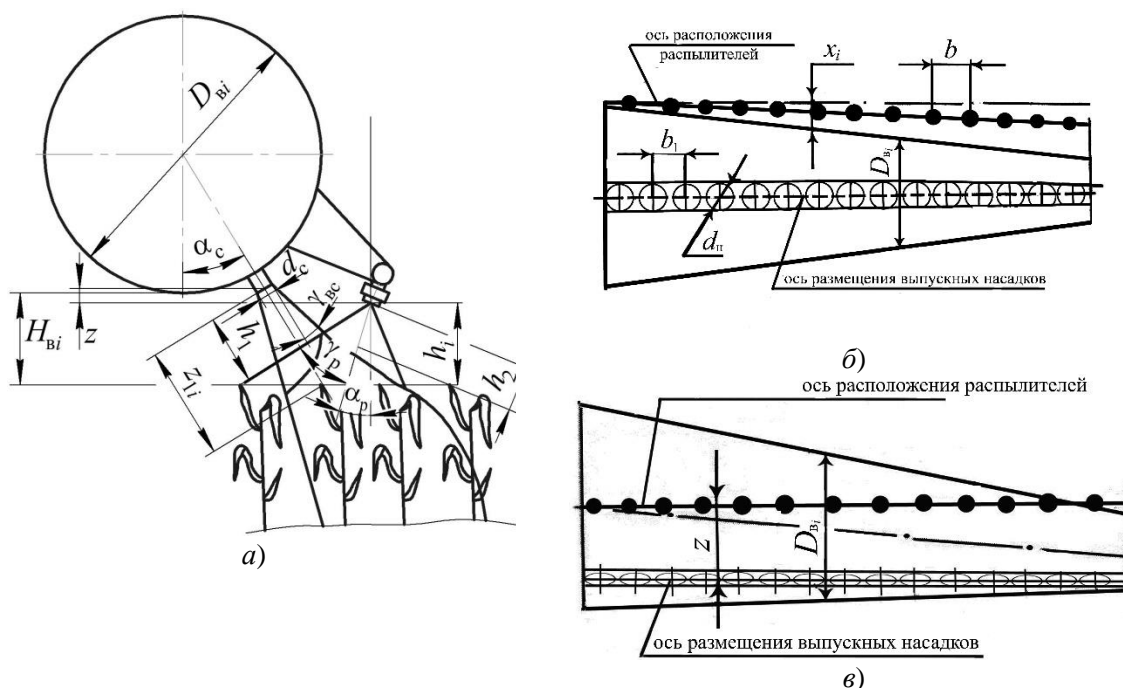


Рис. 3. Схема взаимного расположения воздухораспределительной и гидравлической систем: в продольно-вертикальной (а), горизонтальной (б) и поперечно-вертикальной (в) плоскостях

Технологические и кинематические параметры будут определять процессы транспортировки капель к обрабатываемому объекту, осаждения и взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями (дробление или отскакивание), проникновения внутрь растительных массивов, деления в процессе падения, образования восходящих воздушных потоков и пылевых завес, выноса капель [3, 10]. Получить равномерный поток можно только при условии, если два независимых потока, воздушный от воздухораспределительной системы и воздушно-капельный от гидравлической системы, к моменту их слияния будут сплошными и равномерными [3, 18, 24]. Кроме того, качество объемной обработки вегетирующих культур и энергоемкость процесса зависят от угла вхождения воздушного потока в растительный слой. При ориентации воздушного потока вертикально вниз происходит прижимание листьев к стеблям растений и капли оседают только на верхней стороне листьев. Следовательно, воздушный поток должен быть направлен под углом и обеспечивать поворот и активное шевеление листьев обрабатываемых растений, но не вызывая упругий удар капель об их поверхность, что является причиной их отскакивания и осаждения на почве.

Наклон воздушной струи вперед с форсунками с плоским факелом на системе *Hardi Twin* может уменьшить снос по стерне на 60 %. Дрейф капель в воздух и осаждение их на землю при обработках посевов озимой пшеницы системой *Hardi Twin* снижаются при направлении высокоскоростных воздушных струй под углом  $20^\circ$  в сторону опрыскивателя [10]. Обработка посадок картофеля при использовании направленного воздушного потока позволяет снизить снос от 45 до 90 % в зависимости от типа форсунки [10, 25] (табл. 2). При этом осаждение капель на всех нижних сторонах листьев картофельных кустов обеспечивается при расходе воздуха  $0,94 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ , начальной скорости воздушной струи 31 м/с и угле ее наклона  $22^\circ$  [10].

Таблица 2. Процент снижения сноса при использовании подачи воздуха для различных типов форсунок при давлении 0,3 МПа [10, 25]

Распылитель	ISO размер распылителя	Снижение сноса, %*	Распылитель	ISO размер распылителя	Снижение сноса, %*
<i>TeeJet XR</i>	02	78	<i>Lechler ID</i>	02	67
<i>TeeJet XR</i>	04	71	<i>Agrotop XLTD</i>	04	47
<i>TeeJet DG</i>	02	62	<i>Agrotop XLTD</i>	02	67
<i>TeeJet DG</i>	04	53	<i>TeeJet TT</i>	04	90
<i>Lechler ID</i>	02	45	<i>TeeJet TT</i>	02	74

\*Снижение сноса по сравнению с распылением без подачи воздуха с использованием распылителя того же типа: XR – расширенный диапазон; DG – защита от сноса; ID – инжкорный; XLTD – увеличенные капли; TT – Turbo TeeJet.

При увеличении рабочей скорости опрыскивателя количество снесенной жидкости не изменяется, в то время как при стандартной штанге оно растет. Направленный воздушный поток уменьшает снос распыленной жидкости при скорости ветра 4 м/с, но увеличивает небольшой снос при скорости ветра 1 и 2 м/с при наклоне струй сжатого воздуха под углом  $45^\circ$  вперед или назад к направлению движения [26]. При этом снос значительно возрастает при внесении рабочих растворов почвенных герби-

цидов системами с воздушным сопровождением, особенно при высоких скоростях истечения струй сжатого воздуха [10]. В некоторых случаях при внесении рабочего раствора на голую землю или с небольшой растительностью, когда покров не может поглотить энергию воздушной струи, и ее скорость не регулируется, воздух отскакивается. Отраженный от поверхности поля воздушный поток выносит вверх не осевшие на обрабатываемых поверхностях растений мелкие капли, которые затем витают в воздухе и сносятся, то есть снижается эффективность воздушного сопровождения. Кроме того, в результате проведенных полевых экспериментов было установлено, что при использовании в сухую погоду опрыскивателей объемного действия, направленный воздушный поток подхватывает с поверхности почвы пыль, создавая пылевую завесу, с которой смешиваются капли рабочего раствора [2]. При этом создаются комочки грязи, которые оседают на растениях или почве, а поднимающаяся пыль покрывает тонким слоем обрабатываемые поверхности растений, что снижает эффективность проникновения препаратов. Для снижения потерь от выноса мелких капель при достаточной влажности окружающего воздуха может использоваться дополнительный направленный поток, который перенаправляет отраженный поток в направлении растений (рис. 1,з) [22], что позволяет сократить вынос препарата и повысить качество внесения средств химизации.

Следовательно, для эффективной работы систем воздушного сопровождения первой группы (рис. 1,а) необходимо соблюдение следующих условий [3, 18]:

- к моменту встречи воздушного и воздушно-капельного потоков скорость последнего должна быть меньше скорости воздушного потока;

- для формирования единого равномерного скоростного поля, воздействующего на объекты обработки, воздушный и воздушно-капельный потоки должны вступать во взаимодействие только после того, как воздушный поток преодолеет расстояние  $h_1$  (соответствующее зоне двойного перекрытия факелов распределения воздуха), а воздушно-капельный – расстояние  $h_2$  (соответствующее зоне слияния факелов распыла рядом расположенных распылителей) (рис. 3,а), определяемые по формулам:

$$h_1 = \frac{b_1 - 0,5 \cdot b_n}{\operatorname{tg} \gamma_c}; \quad h_2 = \frac{0,5b}{\operatorname{tg} \gamma_p},$$

где  $b$ ,  $b_1$  – соответственно межосевые расстояния между распылителями и выпускными отверстиями (насадками) воздухораспределительных рукавов, м (рис. 3,б);  $b_n$  – ширина выпускного отверстия (насадка), м;  $\gamma_c$  – угол бокового расширения воздушной струи, град;  $2\gamma_p$  – угол при вершине факела распыла, град.

При ориентации воздушного потока под углом  $25...30^\circ$  обеспечивается наилучшее проникновение воздушного потока в растительный слой. Это минимальный угол, при котором происходит отклонение стеблей и шевеление лиственной части при наименьшем расстоянии от выпускных насадков до растений. При увеличении этого угла значительно увеличивается расстояние до объектов обработки, что влечет за собой увеличение расхода воздуха и, следовательно, энергозатрат. С учетом этого возможны две схемы взаимного расположения распылителей и выпускных насадков воздухораспределительных рукавов: щелевые распылители ввиду малого угла при вершине факела распыла в поперечной плоскости должны быть ориентированы вертикально вниз; вихревые распылители должны быть повернуты под углом навстречу к воздушному потоку, создаваемому воздухораспределительной системой.

Согласно существующим рекомендациям, угол наклона гидравлических распылителей к вертикальной плоскости  $\alpha_p$  не должен превышать  $40...45^\circ$  во избежание сноса распыляемой жидкости [27]. Рационально выбирать угол  $\alpha_p$  в пределах  $10...20^\circ$ , так как увеличение угла ведет к удалению гидравлической штанги с распылителями от воздухораспределительной системы, что может представлять определенные трудности конструктивного плана. В горизонтальной плоскости (рис. 3,б) каждый из распылителей на штанге должен располагаться от близлежащей боковой стенки воздухораспределительного рукава на расстоянии, определяемом по выражению:

$$x_i = (0,5D_{B_i} + l_n) \sin \alpha_c + \frac{h_2}{\cos \gamma_p} \sin(\alpha_p + \gamma_p) + \frac{0,5d_n + h_1 \operatorname{tg} \gamma_c}{\cos \alpha_c} + \\ + \sin \alpha_c (h_1 - \operatorname{tg} \alpha_c \cdot (h_1 \operatorname{tg} \gamma_c + 0,5d_n)) - 0,5D_{B_i},$$

где  $D_{B_i}$  – диаметр воздухораспределительного рукава на  $i$ -ом участке, м;  $l_n$  – длина насадка, м;  $\alpha_p$ ,  $\alpha_c$  – соответственно углы, наклона воздушного распылителя и воздушного насадка (сопла) к вертикали, град.,  $\gamma_c$  – угол бокового расширения воздушной струи, град.

В поперечно-вертикальной плоскости (рисунок 3,в) ось расположения распылителей параллельна оси размещения выпускных сопел воздухораспределительного рукава и удалена на расстояние, определяемое по выражению:

$$z = \cos \alpha_c (h_1 - \operatorname{tg} \alpha_c (h_1 \operatorname{tg} \gamma_c + 0,5d_n)) - \cos(\alpha_p + \gamma_p) \frac{h_2}{\cos \gamma_p}.$$

Для щелевого распылителя при расчетах координат  $x_i$ ,  $z$  необходимо принимать боковой угол факела распыла (в поперечной плоскости)  $\alpha_p^*$ , который составляет  $10...20^\circ$  [28].

Для определения высоты установки воздухораспределительной системы над растительным слоем необходимо определить расстояние  $z_{1i}$ , которое определяется из условия полного взаимодействия воздушно-капельного и воздушного потоков. Факел распыла воздушно-капельного потока до входа в растительный слой должен полностью смешаться с направленным воздушным потоком. Расстояние  $z_{1i}$  определяется по формуле:

$$z_{1i} = \frac{x_i + 0,5D_{Bi} - \sin \alpha_c (0,5D_{Bi} + l_n)}{\sin \alpha_c}.$$

Высоты установки воздухораспределительного рукава  $H_{Bi}$  и гидравлических распылителей  $H_{Pi}$  над растительным слоем определяются по формуле:

$$H_{Bi} = \cos \alpha_c (z_{1i} + l_n + 0,5D_{Bi}) - 0,5D_{Bi};$$

$$H_{Pi} = \cos \alpha_c z_{1i} - z.$$

Полученные зависимости позволяют обосновать технологические параметры опрыскивателей с воздушной поддержкой, основной целью которых является объемная обработка растений с высокой степенью облиственности без учета воздействия ветра [3,18].

Исследуем механизм взаимодействия направленного воздушного потока с воздушно-капельным потоком, образующимся при распыливании рабочей жидкости гидравлическими распылителями, при их внешнем смешении с учетом воздействия факторов окружающей среды. Для этого следует обосновать необходимые скорости потоков, при которых обеспечивается эффективный процесс доставки капель рабочей жидкости к растениям с учетом воздействия ветра при исключении образования дополнительных турбулентных восходящих потоков. Капли факела распыла взаимодействуют в определенных точках, пересекающихся с направленной воздушной струей, например точках  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 4).

Основными кинематическими параметрами, определяющими данное взаимодействие являются: скорость  $v_{вп}$  и определяемое углами  $\alpha_c$  и  $\gamma_{вп}$  направление движения воздушного потока; скорость  $v_k$  и определяемое углами  $\alpha_p$  и  $\gamma_p$  направление движения капли; скорость  $v_v$  и (слева-направо или правоналево) направление ветра.

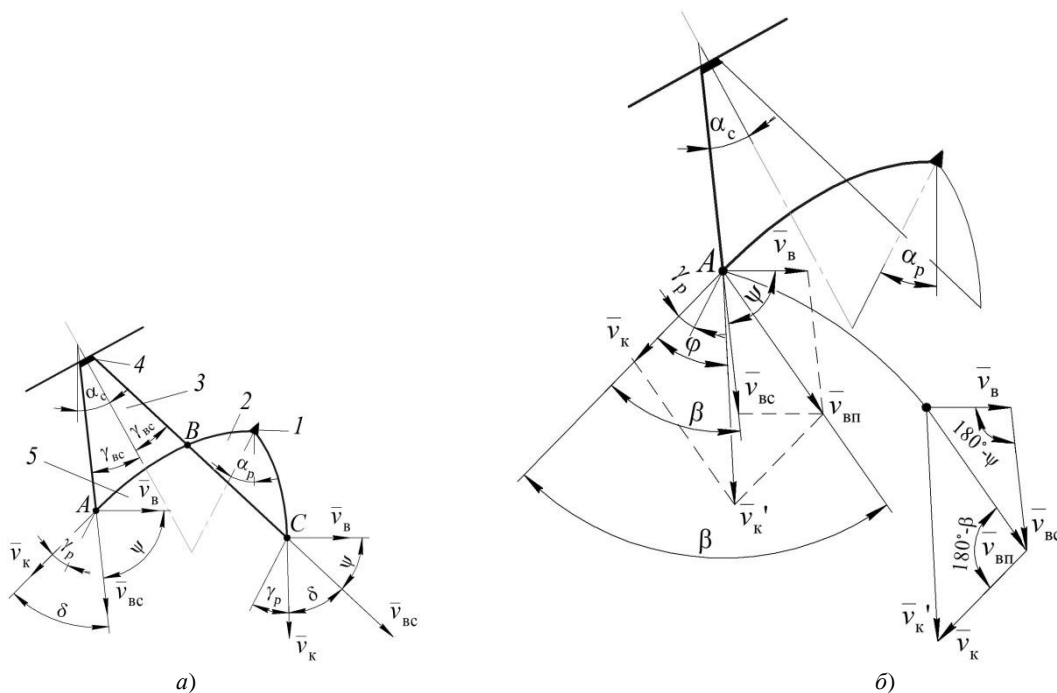


Рис. 4. Схема взаимодействия воздушного и воздушно-капельного потоков:

1 – распылитель; 2 – факел распыла рабочего раствора пестицидов; 3 – направленный воздушный поток (воздушная струя); 4 – воздушное сопло (насадок) пневматического распределительного рукава; 5 – смешанный воздушно-капельный поток

Исходя из плана скоростей (рис. 4,б) очевидно, что основными параметрами являются начальная и конечная скорости воздушного потока и скорость ветра. Осевую скорость воздушной струи на расстоянии от выходного сопла можно определить по формуле [3, 18, 21, 30]:

$$v_{bc} = \frac{0,48v_{bc_0}}{\left(\frac{ah}{d_c} + 0,145\right)}, \quad \text{или} \quad v_{bc_0} = \frac{\left(\frac{ah}{d_c} + 0,145\right)v_{bc}}{0,48},$$

где  $v_{bc_0}$  – начальная скорость вылета воздушной струи, м/с;  $a$  – коэффициент турбулентности [30–32];  $h$  – расстояние от сопла до рассматриваемой точки, м;  $d_c$  – диаметр сопла, м.

Исходя из условия какая скорость направленного воздушного потока должна быть при вхождении в растительный слой или при взаимодействии с поверхностью поля выбирается начальная скорость истечения воздушной струи из сопла пневматического распределительного рукава. Эффективность процессов транспортировки капель, проникновения в растительные слои, удерживаемости на обрабатываемых поверхностях, выдувания в атмосферу и объемной обработки определяются скоростью и направлением воздушного потока на выходе из воздушных сопел и при соприкосновении с обрабатываемой поверхностью, объемом сжатого воздуха.

В современных системах скорость потока у выхода из рукава составляет 20–35 м/с. К моменту достижения верхушек растений она падает до 4–9 м/с. Основной воздушный поток направлен вертикально вниз под углом 0–35° от вертикали. В опрыскивателях *Hardi Twin Force* скорость воздуха на выходе из пневматического рукава составляет около 25 м/с, а в припочвенном слое – около 5 м/с при подаче воздуха 2000 м³/ч на 1 метр ширины захвата; *Rau Air Plus* – соответственно 30 м/с, 4–9 м/с, 1600 – 2500 м³/ч на 1 метр ширины захвата; «Мекасан» ОПО-18 – соответственно 25 м/с, 5–6 м/с, 2222 м³/ч на 1 метр ширины захвата. Хозяйственные испытания опрыскивателя фирмы RAU показали, что при обработке растений водным раствором нигрозина было обнаружено, что карточки на верхней стороне листьев растений были обработаны каплями размером 200...400 мкм с густотой покрытия 30...150 шт./см², на нижней стороне листьев 40 % карточек оказались необработанными, остальные имели густоту покрытия менее 30 шт./см² каплями размером менее 50 мкм [18].

Комплексное изменение высоты установки штанги и использование системы воздушного сопровождения позволяет существенно влиять на величину сноса капель рабочего раствора пестицидов. Современные исследования подтверждают, что правильно спроектированная воздушная завеса может снизить снос капель на 50–67 % при сильном боковом ветре (6–8 м/с) (табл. 3).

Таблица 3. Влияние высоты установки штанги и применения системы воздушного сопровождения на изменение величины сноса рабочего раствора [29]

Высота установки штанги, м	Снижение/увеличения осаждения рабочего раствора на расстоянии от штанги, %		Снижение (увеличение) воздушного дрейфа, %
	2 – 3 м	1 – 4 м	
Обыкновенная штанга			
0,3	-56,0	-58,0	-24,0
0,5*	0	0	0
0,7	+116,0	+62,0	+82,0
Штанга с воздушным сопровождением			
0,3	-95,0	-86,0	-91,0
0,5	-90,0	-75,0	-87,0
0,7	-57,0	-45,0	-84,0

\*базовый вариант штанги: распылители TeeJet XR 110 04, норма вылива 300 л/га; \*\* «->» – снижение; «+» – увеличение.

Большая степень снижения сноса достигается при совместном использовании инжекторных распылителей с воздушными сопровождающими системами. Это позволяет повысить степень объемной обработки растений, снизить снос на 80–90 % и обеспечить возможность работы при скорости ветра более 7 м/с. Совместное использование ветрозащитных устройств активного действия и инжекторных распылителей позволяет на 13 % повысить качество покрытия обработанной поверхности [19].

При двусторонней защите факела распыла оптимальными считаются системы с диаметром сопла 0,02 м при начальной скорости вылета из них струи 30 м/с симметрично под углом 20° к вертикали [21]. При этом рекомендуется в верхней части воздушного потока устанавливать ветрозащитные экраны высотой 0,25 м, что позволит обеспечить скорость вхождения в растительные слои 17,5 м/с и качественную обработку при скоростях ветра до 7 м/с.

### **Заключение**

Одним из направлений снижения потерь рабочих растворов пестицидов и повышения эффективности применения средств химической защиты растений является использование опрыскивателей с воздушными системами сопровождения факелов распыла. Обоснованием рациональной схемы, ее основных конструктивных, технологических и кинематических параметров можно получить равномерный поток, снизить объем вносимого рабочего раствора, и обеспечить качественную объемную обработку растений даже при высоких (до 7 м/с) скоростях ветра.

Однако, несмотря на различные способы взаимного расположения гидравлических и пневматических систем вопросы взаимодействия направленного воздушного потока с факелом распыла, а также сплошного воздушно-капельного потока с обрабатываемыми поверхностями остаются малоизученными.

В статье обобщен анализ способов взаимного расположения элементов гидравлических и пневматических систем опрыскивателей и приведены зависимости для расчета их технологических, кинематических и конструктивных параметров. Полученные результаты могут использоваться в сельскохозяйственном машиностроении при проектировании штанговых опрыскивателей и в сельскохозяйственных организациях при их эксплуатации.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Никитин, Н. В. Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве / Н. В. Никитин, Ю. Я. Спиридонов, Ю. Я., В. Г. Шестаков // Под общей редакцией Ю. Я. Спиридонова и В. Г. Шестакова. – М.: Печатный Город, 2010. – 200 с.
2. Lechler. Теория и практика опрыскивания / И. А. Редкозубов [и др.]. – Lechler, 2010. – 19 с.
3. Крук, И. С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей / И. С. Крук, Т. П. Кот, О. В. Гордеенко. – Минск: БГАТУ, 2015.
4. Киселев, В. Н. Руководство по сборке и настройке полевых опрыскивателей для защиты растений / В. Н. Киселев. – Краснодар: Агрорус, 2002. – 36 с.
5. Никитин, Н. В. Технология внесения гербицидов / Н. В. Никитин, В. А. Абубикеров // Научно обоснованные технологии химического метода борьбы с сорняками в растениеводстве в различных регионах Российской Федерации / Под ред. Ю. Я. Спиридонова, В. Г. Шестакова. – Голицыно: РАСХН – ВНИИФ, 2001. – С. 29–52.
6. Защита растений в устойчивых системах земледелия (в 4-х книгах) / Под общей ред. Д. Шпаара. – Торжок: ООО «Вариант», 2004. – кн. 4. – 345 с.
7. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей / И. С. Крук [и др.]. – Агропанорама. – 2022. – № 5 (153). – С. 2–10.
8. Иванов, Е. Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты / Е. Н. Иванов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Химия, 1990. – 384 с.
9. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays / D. Nyttens [and oth.] // American Society of Agricultural Engineers. – 52 (5). – p. 1471–1480.
10. Nyttens, D. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means / Doctor of Bioengineering Sciences Dissertation / Catholic University of Leuven. – Leuven, 2007. – 267 p.
11. Крук, И. С. Особенности моделирования процесса падения капель при внесении рабочих растворов пестицидов полевыми штанговыми опрыскивателями / И. С. Крук // Агропанорама. – № 3 (169). – 2025. – С. 2–10.
12. 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.
13. Herbicide application methodologies: influence of nozzle selection, droplet size and spray drift on effective spraying – a review. / C. R. Chethan [and oth.] // Innovative Farming. – № 4(1). – 2019. – p. 45–53.
14. Ревакин, Е. Л. Машины для химической защиты растений в инновационных технологиях: науч. аналит. Обзор / Е. Л. Ревакин, Н. Н. Краховецкий. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 124 с.
15. Шамаев, Г. П. Механизация работ по защите сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней / Г. П. Шамаев, С. Д. Шеруда. – М., Колос, 1964.
16. Клочков, А. В. Механизация химической защиты растений: монография / А. В. Клочков, А. Е. Маркевич. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2008. – 228 с.

17. РГАУ-МСХА. Зооинженерный факультет МСХА. Обработка растений в период вегетации [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <http://www.activestudy.info/obrabotka-rastenij-fungicidami-v-period-vegetacii> (дата обращения 16.12.2025).
18. Кот, Т. П. Повышение эффективности обработки вегетирующих культур обоснованием параметров воздухораспределительной и гидравлической систем штанговых опрыскивателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Т.П. Кот. – Минск, 2006. – 152 с.
19. Способы и устройства защиты факела распыла при внесении пестицидов в ветреную погоду / И. С. Крук [и др.] // Механизация и электрификация: Межведомственный тематический сб. / НИЦ НАН Беларуси по механиз. сел. хоз-ва / ред. колл. В. Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2007. – С. 106–113.
20. Эдвисенс. Сельскохозяйственная техника в Беларуси / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://advisance.by/udobrenija-selbstfahrer-highlander/> / Дата доступа: 01.11.2024.
21. Використання повітряної зависі для протидії зустрічному вітру під час обприскування польових культур / Ю. Г. Вожик [и др.] / Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2020. – Випуск 11(110). – С. 72–81.
22. Клочков, А. В. Снижение потерь пестицидов при опрыскивании: монография / А. В. Клочков, П. М. Новицкий, А. Е. Маркевич. – Горки: БГСХА, 2017. – 230 с.
23. Air-assisted spraying with AirFlowPlus / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agrifac.com/ca/optional-spray-technology/airflowplus/> / Дата доступа: 01.11.2024.
24. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance. / В. К. Cooke [and oth.] // Crop Protection. – 1990. – № 9 – P. 303–311.
25. Environmental risk control. / J. C. Van de Zande [and oth.] // Aspects of Applied Biology. – 2002. – № 66. – P. 165–176.
26. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions. / E.C. Hislop [and oth.] // Crop Protection. – 1993. – 12(3). – P. 193–200.
27. Велецкий, И. Н. Технология применения гербицидов / И. Н. Велецкий. – Л.: Агропромиздат; Ленингр. отд., 1989. – 176 с.
28. Пажи, Д. Г. Распылители жидкостей / Д. Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
29. Effect of sprayer boom height on spray drift. / A. De Jong [and oth.] // Mededelingen Universiteit Gent. – № 65(2b). 2000. – P. 919–930.
30. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
31. Кострюков, В. А. Основы гидравлики и аэродинамики / В. А. Кострюков. – М.: Высшая школа, 1975. – 220 с.
32. Бутаков, С. Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции / С. Е. Бутаков. – М.: Профиздат, 1949. – 242 с.