

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЫСКИВАНИЯ САДОВ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ВНЕСЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ

И. И. ГАВРИЛОВ, В. И. КЛИМЕНКО, С. В. КУРЗЕНКОВ

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

(Поступила в редакцию 08.01.2026)

Статья представляет системное исследование технологий опрыскивания в садоводстве с акцентом на повышение качества покрытия, снижение расхода препаратов, минимизацию сноса и повышение экологической безопасности. Актуальность работы обусловлена необходимостью одновременного решения задач по повышению биологической эффективности обработок, снижению экономических затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Проведен сравнительный анализ традиционных и инновационных методов распыления, рассмотрены физические основы образования аэрозоля, роль турбулентных потоков в проникновении распыла в крону. Особое внимание уделено анализу средств механизации и распылителей. Рассмотрены конструктивные особенности и принципы работы основных типов распылителей: щелевых, инжекторных и наиболее перспективных дисковых (дисково-вентиляторных). Подчеркивается, что качество обработки в конечном итоге определяется дисперсностью капель и плотностью их покрытия, которая должна составлять 30–80 капель/см² для фунгицидов.

В статье детально исследуются физические основы процесса распыления, включая влияние сил поверхностного натяжения, инерции и аэродинамики на формирование, движение и осаждение капель. Анализируются такие ключевые параметры, как скорость оседания по Стоксу, расстояние сноса и число Вебера. Отмечена важная роль структуры и энергии турбулентного воздушного потока, создаваемого вентиляторной системой, для транспорта капель вглубь кроны.

На основе проведенного анализа сформулированы основные направления оптимизации технологии: 1) дальнейший переход к малообъемному и ультрамалообъемному опрыскиванию; 2) совершенствование рабочих органов (разработка дисково-вентиляторных распылителей с многоступенчатым дроблением); 3) цифровизация и автоматизация контроля параметров в реальном времени; 4) интеграция метеорологических данных в системы управления. В качестве примера инновационного решения описан запатентованный дисковый узел. Перспектива развития видится в создании интеллектуальных опрыскивающих комплексов, сочетающих высокоэффективные распылители, прецизионное дозирование и технологии точного земледелия.

Ключевые слова: защита садов, опрыскивание, малообъемная технология, дисково-вентиляторный распылитель, дисперсность капель, турбулентный поток, оптимизация, экологизация.

This article presents a systematic study of spraying technologies in horticulture, focusing on improving coverage quality, reducing pesticide consumption, minimizing drift, and enhancing environmental safety. The relevance of this work stems from the need to simultaneously improve the biological effectiveness of treatments, reduce economic costs, and minimize negative environmental impacts.

A comparative analysis of traditional and innovative spraying methods is provided, examining the physical principles of aerosol formation and the role of turbulent flows in spray penetration into the canopy. Particular attention is paid to the analysis of mechanization equipment and sprayers. The design features and operating principles of the main types of sprayers are examined: slot, injector, and the most promising disk (disk-fan) sprayers. It is emphasized that the quality of spraying is ultimately determined by the droplet dispersion and coating density, which should be 30–80 drops/cm² for fungicides.

The article examines in detail the physical principles of the spraying process, including the influence of surface tension, inertia, and aerodynamics on droplet formation, movement, and deposition. Key parameters such as Stokes settling velocity, drift distance, and Weber number are analyzed. The important role of the structure and energy of the turbulent air flow created by the fan system in transporting droplets deep into the canopy is noted.

Based on the analysis, the following key areas for technology optimization are formulated: 1) further transition to low-volume and ultra-low-volume spraying; 2) improvement of working elements (development of disk-fan sprayers with multi-stage fragmentation); 3) digitalization and automation of real-time parameter control; 4) integration of meteorological data into control systems. A patented disk unit is described as an example of an innovative solution. The development potential lies in the creation of intelligent spraying systems combining highly efficient atomizers, precision dosing, and precision farming technologies.

Key words: orchard protection, spraying, low-volume technology, disk-fan atomizer, droplet dispersion, turbulent flow, optimization, greening.

Введение

Интенсивное садоводство предъявляет высокие требования к эффективности защиты растений, поскольку патогенез плодовых культур отличается высокой динамичностью, а пространственная структура кроны усложняет задачу обеспечения равномерного покрытия. В современных условиях важной становится не только эффективность фунгицидов и инсектицидов, но и точность их доставки к биологическим объектам.

Ключевым фактором успешности химической защиты является технология опрыскивания как комплексный процесс, включающий образование капель, их транспорт воздушным потоком, проникновение в крону, осаждение, удержание и перераспределение на поверхности листьев. Каждое из этих звеньев имеет существенное влияние на биологическую результативность обработки и экологические риски.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает устойчивый интерес научного сообщества к проблемам оптимизации технологий опрыскивания в садоводстве. В работах таких авторов, как Лазутко С. Н., Шершабов И. В., Фирсенков А. И., основное внимание уделяется методам оценки ключевых параметров процесса – дисперсности капель и полноты покрытия листовой поверхности, которые напрямую влияют на биологическую эффективность обработок [1, 2]. Исследования в этой области позволили установить количественные критерии качества, например, необходимую плотность покрытия для фунгицидов и инсектицидов, что стало основой для нормирования технологических режимов.

Второе значимое направление, отраженное в трудах Ластовцева А. М., Куликова И. М., Макарова А. С., связано с конструированием и совершенствованием рабочих органов опрыскивателей, в частности дисковых и инжекторных распылителей [4, 6, 9]. Особый интерес представляют разработки, направленные на управление турбулентными потоками для улучшения проникновения аэрозоля в крону и снижения сноса. Современные исследования также активно используют методы компьютерного моделирования CFD, Lagrangian Particle Tracking для прогнозирования распределения капель и оптимизации конструкции распылителей, что открывает новые возможности для создания высокоточных и экологичных систем опрыскивания.

Целью данной работы является комплексный анализ существующих методов и технических средств опрыскивания садов, выявление основных факторов, влияющих на качество покрытия и потери рабочей жидкости, а также обоснование перспективных конструктивно-технологических решений, направленных на повышение эффективности и экологической безопасности процесса.

Основная часть

Современная система защиты садов базируется на интегрированном подходе, сочетающем агротехнические, биологические, физико-механические и химические методы. Химический метод, основанный на применении пестицидов, обеспечивает быстрое подавление очагов поражения, но требует строгого соблюдения агротехнических и экологических требований.

К основным агротехническим требованиям при опрыскивании относятся:

- фенофазная привязка (зеленый конус, цветение, после цветения);
- метеорологические условия (скорость ветра <math>< 3 - 4 \text{ м/с}</math>, относительная влажность > 55 %, соблюдение оптимального температурного режима +12...+25 °С);
- равномерность покрытия листовой поверхности, включая нижнюю сторону листьев;
- размер капель, определяющий удержание их на листьях и скорость испарения;
- скорость воздушного потока, обеспечивающая проникновение капель в центральную часть кроны;
- соблюдение сроков ожидания и чередование препаратов для предотвращения резистентности.

Несоблюдение требований приводит к снижению эффективности препаратов и росту экологической нагрузки.

В практике садоводства применяются три основных вида опрыскивания, различающихся нормой расхода рабочей жидкости и дисперсностью капель (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика технологий опрыскивания

Вид опрыскивания	Норма расхода, л/га	Диапазон размеров капель, мкм	Основные характеристики
Полнообъемное (ПО)	700–1000	150–600	Широкий дисперсный состав, высокие потери от стекания, низкая равномерность покрытия (20–70 %)
Малообъемное (МО)	75–300 (100–500*)	50–250	Более однородный распыл, лучшее проникновение в крону, снижение потерь и экологической нагрузки
Ультрамалообъемное (УМО)	1–20 (5–40*)	60–150	Использование готовых препаративных форм, высокая экономическая и экологическая эффективность при локальном внесении

* – для вентиляторных опрыскивателей в садах.

Данные показывают, что малообъемное и ультрамалообъемное опрыскивание являются наиболее перспективными с точки зрения ресурсосбережения [7].

Качество нанесения при опрыскивании определяется в первую очередь типом распылителя и характеристиками воздушного потока.

Парк садовых опрыскивателей представлен навесными, прицепными и самоходными машинами различной производительности и конструктивного исполнения. Сравнение белорусских и зарубежных моделей показывает, что последние часто обладают более точными системами дозирования, автоматизации и интеграции с системами навигации [6, 8].

Ключевым элементом, определяющим качество обработки, является распылитель. В зависимости от принципа действия выделяют гидравлические, пневматические, дисковые (дисково-вентиляторные), электрические и ультразвуковые распылители. Наибольший интерес для ресурсосберегающих технологий представляют дисковые (дисково-вентиляторные) и инжекторные распылители, способные создавать однородный мелкодисперсный аэрозоль [9].

Таблица 2. Характеристики основных типов распылителей

Тип распылителя	Принцип действия	Достоинства	Недостатки
Щелевые (LU, ST)	Формирование плоского факела	Простота, низкое рабочее давление	Высокая чувствительность к ветру
Инжекторные (ID, IDK)	Смешивание жидкости с воздухом	Устойчивость к сносу, хорошее покрытие	Требуют повышенного давления
Дисковые (дисково-вентиляторные)	Диспергирование центробежными силами	Высокая однородность капель, низкий расход	Склонность мелких капель к сносу

Процесс распыления жидкости является сложным физическим явлением, на которое влияют конструктивные параметры распылителя, свойства жидкости вязкость, поверхностное натяжение и режимные параметры давление, скорость. Эффективность обработки количественно оценивается через степень покрытия поверхности каплями, которая зависит от их размера и плотности распыла [1, 3].

Образование и движение капель определяется рядом параметров:

- степень покрытия P , %: для фунгицидов – 30–80 капель/см², для инсектицидов – до 120 капель/см²;

- скорость осаждения капли по Стоксу V_s : крупные капли быстро осаждаются, мелкие – склонны к сносу и испарению;

- расстояние сноса капли L ;

- число Вебера We , характеризующее соотношение кинетической энергии и энергии поверхностного натяжения при ударе капли о поверхность.

Анализ физических процессов, определяющих формирование капель и их дальнейшее движение в воздушном потоке, показал, что эффективность опрыскивания садов напрямую связана с комплексным взаимодействием факторов: конструктивных параметров распылителя, свойств рабочей жидкости и аэродинамических характеристик воздушной струи [4]. Процесс диспергирования определяется балансом сил поверхностного натяжения и инерционных нагрузок, что количественно описывается числом Вебера; именно это соотношение определяет устойчивость и возможность вторичного дробления капель. Размер капель оказывает ключевое влияние на их траекторию, скорость осаждения и вероятность сноса: слишком крупные капли склонны к ускоренному стеканию с листовой поверхности, тогда как слишком мелкие – к сносу и испарению.

Движение капель в воздушном потоке во многом зависит от структуры и энергии турбулентной струи, создаваемой вентиляторной системой опрыскивателя. Недостаточно развитый поток приводит к неполному проникновению аэрозоля вглубь кроны, тогда как чрезмерная турбулентность вызывает рост потерь за счет сноса. Оптимальный режим воздушного потока обеспечивает транспорт частиц через листовый барьер и их равномерное осаждение на целевых поверхностях с достижением необходимой плотности покрытия [3, 8].

Таким образом, физические закономерности формирования и поведения капель определяют критические требования к конструкциям распылителей и режимам опрыскивания. Управление дисперсностью, скоростью воздушного потока и параметрами аэрозоля является основой повышения точности нанесения препаратов, снижения потерь рабочей жидкости и повышения экологической эффективности процесса. Эти выводы служат фундаментом для разработки инновационных дисково-вентиляторных систем, адаптивных режимов опрыскивания и цифровых технологий, обеспечивающих устойчивое и ресурсосберегающее функционирование современных опрыскивателей [5, 9].

Современные исследования моделирования процессов опрыскивания показывают важность:

- численного моделирования процессов движения жидкостей и газов, основанное на решении уравнений гидродинамики и тепломассопереноса с использованием компьютерных методов CFD-моделирования воздушных потоков [4];
- моделей движения капель Lagrangian Particle Tracking;
- оптимизации формы сопел и дисков для получения устойчивого факела;
- расчета сноса капель в зависимости от ветра, высоты кроны, угла атаки факела.

Моделирование позволяет уже на этапе проектирования определить зоны недопокрытия и перерасхода за счет оптимизации: конструкции распылителей и вентиляторных систем, формы струи, ее скорости и турбулентности, зоны охвата и проникновения в крону дерева, траектории капель разного диаметра, их сноса при ветре, их осаждения или распределение по поверхности листьев, зон неравномерного покрытия [4, 8].

На основе анализа литературных данных можно выделить следующие тенденции и направления оптимизации технологии опрыскивания:

1. Интенсификация и экологизация: Переход к малообъемному и ультрамалообъемному опрыскиванию для снижения норм расхода и химической нагрузки [7].

2. Совершенствование рабочих органов: Активная разработка и внедрение дисково-вентиляторных распылителей, создающих турбулентные потоки для улучшения проникновения в крону и снижения сноса капель. Примером является запатентованный дисковый узел с многоступенчатым дроблением жидкости [5, 9].

3. Цифровизация и автоматизация: Внедрение систем контроля параметров в реальном времени, использование автономной техники и карт применения [8].

4. Комплексный учет факторов: интеграция метеорологических данных ветер, влажность, температура в систему управления процессом опрыскивания [8].

Заключение

Проведенный анализ современных подходов и технических средств защиты садов методом опрыскивания позволяет сформулировать ряд ключевых выводов. Установлено, что эффективность химической защиты в значительной степени определяется технологией внесения препаратов, где критически важными параметрами являются дисперсность капель, равномерность покрытия и точность нанесения рабочей жидкости на целевые поверхности [1, 2].

Несмотря на широкое распространение, традиционные методы полнообъемного опрыскивания демонстрируют низкую эффективность, характеризуясь высоким расходом препаратов, значительными потерями от стекания и сноса, а также неоднородным покрытием растительного покрова, что не превышает 20–70 %. Это обуславливает неоправданные экономические затраты и повышает экологическую нагрузку на агроценозы.

Переход к ресурсосберегающим технологиям малообъемного и ультрамалообъемного опрыскивания, основанным на использовании мелкодисперсных аэрозолей с размером капель 50–250 мкм и 60–150 мкм соответственно, представляет собой научно обоснованное направление повышения эффективности и экологической безопасности обработок [7]. Данные технологии позволяют сократить нормы расхода рабочей жидкости в 10–100 раз, минимизировать потери препаратов и улучшить проникновение в густую крону деревьев.

Важнейшим элементом совершенствования технологии является оптимизация конструкции рабочих органов опрыскивателей. Наиболее перспективными признаны дисковые и инжекторные распылители, особенно в комбинации с вентиляторными системами, создающими управляемые турбулентные потоки [9]. Такие решения, подобные представленному дисковому узлу с многоступенчатым дроблением, позволяют повысить однородность распыла, увеличить плотность покрытия до требуемых 30–80 капель/см² и существенно снизить риск сноса капель за пределы обрабатываемой зоны [5].

Дальнейшее развитие технологий опрыскивания видится в синергии нескольких направлений: интенсификация процессов диспергирования, широкое внедрение цифровых систем мониторинга и автоматического управления параметрами работы в реальном времени, а также интеграция метеорологических данных для адаптивного планирования обработок [8]. Создание интеллектуальных опрыскивающих комплексов, сочетающих высокоэффективные распылители, прецизионное дозирование и элементы точного земледелия, станет ключевым фактором обеспечения конкурентоспособности и экологической устойчивости современного садоводства [6, 8].

Таким образом, оптимизация технологии опрыскивания садов находится на пути создания интеллектуальных технических средств, сочетающих высокоэффективные распылители, системы точного

контроля и автоматизации, что позволит достичь максимальной агротехнической и экономической эффективности при строгом соблюдении экологических норм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазутько, С. Н. Методы оценки дисперсности и покрытия при опрыскивании растений / С. Н. Лазутько, И. В. Шершабов // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 7. – С. 34–37.
2. Фирсенков, А. И. Оценка качества обработки растений по полноте покрытия / А. И. Фирсенков, А. С. Воловик // Вестник сельскохозяйственной науки. – 2012. – № 5. – С. 45–49.
3. Шершабов, И. В. Оптимизация параметров распыла для малообъемных технологий / И. В. Шершабов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 3. – С. 22–25.
4. Ластовцев, А. М. Моделирование распределения капель в факеле дискового распылителя / А. М. Ластовцев, Н. И. Дерябин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2006. – № 4. – С. 12–15.
5. Пат. 13550 Республика Беларусь, МПК А01М 7/00. Дисковый узел для распыления жидкого вещества / Клименко В. И. и др.; заявитель и патентообладатель УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». – № u20240057; заявл. 13.03.2013; опубл. 05.09.2014. – 4 с.
6. Куликов, И. М. Современные технологии защиты садовых культур / И. М. Куликов, В. Д. Гончаров // Современные технологии защиты садовых культур. – М.: Колос, 2015. – 320 с.
7. Петров, А. Н. Малообъемное и ультрамалообъемное опрыскивание в садоводстве / А. Н. Петров, О. В. Сидоров // Вестник сельскохозяйственной науки. – 2018. – № 4. – С. 45–52.
8. Таранович, Н. К. Технологии точного опрыскивания в интенсивном садоводстве / Н. К. Таранович, В. И. Метревели. – Минск: Белорусская наука, 2020. – 256 с.
9. Макаров, А. С. Дисковые распылители нового поколения для ресурсосберегающих технологий / А. С. Макаров, А. Д. Волков // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – № 3. – С. 28–34.