

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ТУМАНА НА ОСНОВЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА И ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

МЭН ФАНЬЧЖАО, И. И. ГАВРИЛОВ, В. И. КЛИМЕНКО

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и
Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 15.07.2025)

Низкая эффективность генерации мелкодисперсных капель тумана и недостаточная точность их обнаружения в сельскохозяйственной технике защиты растений долгое время являлись одним из узких мест в точном ведении сельскохозяйственных работ. В связи с этим в данной работе изложена информация об уровне известных исследований комбинированного распыляющего устройства с диском и воздушной подачей, основанное на теории газожидкостного двухфазного потока, и с использованием усовершенствованного алгоритма YOLOv8 (детектирование и анализ капель в режиме реального времени) реализована эффективная генерация и точное обнаружение капель тумана размером менее 30 мкм, оптимизация конструкции комбинированного распыляющего устройства с диском позволила добиться стабильного формирования мелкодисперсной смеси с контролируемым распределением капель. Одновременно на основе сопряжения частоты вращения и скорости воздушного потока авторами известных исследований была построена модель распыления, которая учитывает взаимосвязь частоты вращения диска и скорость воздушного потока.

Данная модель позволяет осуществлять прогнозирование распределения мелкодисперсных капель по размерам и плотности в зависимости от настроек оборудования. Также была разработана интеллектуальная система обнаружения DropletNet, интегрированное аппаратное средство, осуществляющее процесс распыления в сочетании с алгоритмы машинной настройки для применения автоматической коррекции параметров работы в процессе опрыскивания. Экспериментально было подтверждено, что при совместном воздействии двух факторов можно повысить объемную долю капель тумана размером <30 мкм до 78 %, а число капель на единицу площади достигать в пределах 350 капель/см², что обеспечивает равномерность распределения рабочей жидкости, при этом ошибка обнаружения не превышает 4 %, что позволяет удовлетворить требования технологии точного внесения средств защиты растений сельскохозяйственной техникой. Таким образом, реализованный подход позволяет существенно повысить эффективность обработки растений, минимизировать потери пестицидов и снизить экологическую нагрузку, что делает его перспективным для внедрения в современные системы точного земледелия.

Ключевые слова: генерация мелкодисперсных капель тумана; газожидкостный двухфазный поток; глубокое обучение; обнаружение капель тумана; эффективность использования пестицидов.

Low efficiency of fine fog droplets generation and insufficient accuracy of their detection in agricultural plant protection equipment have long been one of the bottlenecks in precision agricultural management. In this regard, this paper presents information on the level of known studies of a combined atomizing device with a disk and air feed, based on the theory of gas-liquid two-phase flow, and using the improved YOLOv8 algorithm (real-time droplet detection and analysis), effective generation and accurate detection of fog droplets smaller than 30 μm are realized, optimization of the design of a combined atomizing device with a disk made it possible to achieve stable formation of a fine mixture with a controlled droplet distribution. At the same time, based on the conjugation of the rotation frequency and air flow rate, the authors of known studies built a spray model that takes into account the relationship between the rotation frequency of the disk and the air flow rate. This model allows for the prediction of the distribution of fine droplets by size and density depending on the equipment settings. An intelligent detection system DropletNet was also developed, an integrated hardware tool that carries out the spraying process in combination with machine tuning algorithms for the application of automatic correction of operating parameters during the spraying process. It was experimentally confirmed that with the combined effect of two factors it is possible to increase the volume fraction of fog droplets <30 μm in size to 78 %, and the number of droplets per unit area to reach within 350 droplets/cm², which ensures uniform distribution of the working fluid, while the detection error does not exceed 4%, which allows meeting the requirements of the technology of precise application of plant protection products by agricultural machinery. Thus, the implemented approach allows to significantly increase the efficiency of plant treatment, minimize pesticide losses and reduce the environmental load, which makes it promising for implementation in modern precision farming systems.

Key words: generation of fine fog droplets; gas-liquid two-phase flow; deep learning; fog droplet detection; pesticide use efficiency.

Введение

В Китае ежегодная экологическая нагрузка, вызванная дрейфом и потерями пестицидов, превышает 600 тысяч тонн, что главным образом обусловлено низкой эффективностью распыления сельскохозяйственной техникой средств защиты растений. В каплях тумана, распыляемых обычными напорными опрыскивателями, доля мелкодисперсных капель размером <30 мкм составляет менее 15 %, а количество капель, оседающих на единицу площади, составляет 80–120 капель/см², что приводит к эффективной осадке пестицидов в кроне растений менее 40 % [1–2]. Применяются технологии распыления с использованием диска и воздушно комбинированного способа с использованием центробежной силы воздушного потока для совместного распыления, дает возможность получать капли ту-

мана размером 5–50 мкм. Однако в настоящее время точность обнаружения субмикронных капель составляет лишь 75–80 %, а также отсутствуют алгоритмы и методы динамического количественного анализа в полевых условиях, что значительно ограничивает её практическое применение.

Цель работы – исследование механизма генерации мелкодисперсных капель тумана на основе газожидкостного двухфазного потока и технологии обнаружения с применением глубокого обучения.

Основная часть

Теоретическое моделирование генерации мелкодисперсных капель и проектирование устройства. Механизм атоμизации газожидкостного двухфазного потока

Комбинированная атоμизация диском с воздушной подачей происходит в два этапа: центробежное разрушение и вторичное разрушение воздушным потоком. Центробежный этап: капли на краю диска под действием инерционной силы образуют жидкую пленку, размер частиц которой в основном определяется числом Вебера (We $We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma}$), при $We > 15$ жидкая пленка распадается на начальные капли тумана, средний размер частиц d_{SMD} и скорость вращения диска ω связаны следующим образом:

$$d_{smd} = 128.5 \times \frac{\sigma^{0.6} \mu^{0.2}}{\rho^{0.4} \omega^{1.2}}$$

В процессе воздушной подачи высокоскоростной воздушный поток (5–20 м/с) обменивается импульсом с начальными каплями тумана, что анализируется и рассчитывается с использованием двухфазной модели Эйлера–Лагранжа:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{3\mu_g}{4\rho_p d_p^2} (V_g - V_p) + g$$

Сдвиговые силы воздушного потока могут увеличить долю капель тумана размером менее 30 μm в общем количестве капель после вторичного разрушения на 30–50 % [4]. Использование метода CFD-симуляции для оптимизации угла входящего воздушного потока до 30° позволяет увеличить глубину проникновения капель тумана внутрь кроны растений на 25 %.

Модульный дизайн устройства для атоμизации

Разработан трехуровневый регулируемый дисково-воздушный механизм (см. рис. 1).

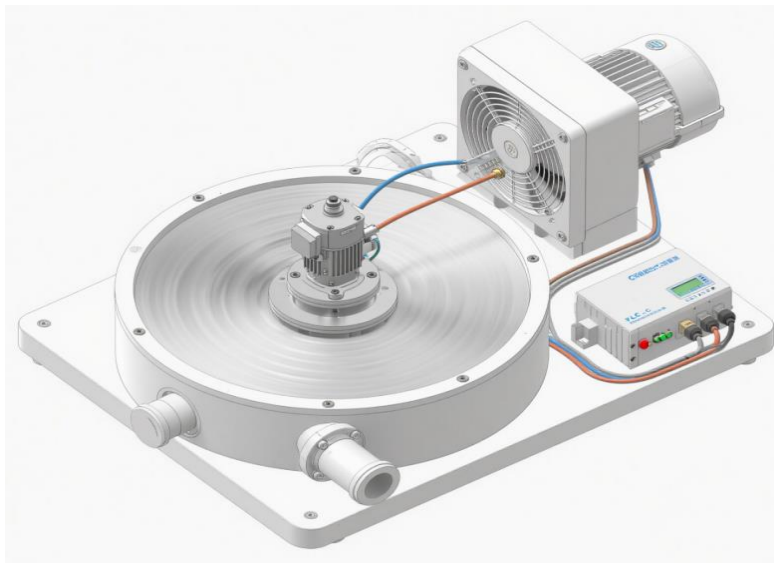


Рис. 1. Схема принципа работы дискового устройства с воздушной подачей

Центробежный блок: использована конструкция алюминиевого диска диаметром 120 мм с частотой вращения 1000–4000 об/мин (привод шагового двигателя, точность ±2 об/мин).

Недостатком центробежного блока является одноступенчатая конструкция алюминиевого диска, что не позволяет дополнительно дробить капли рабочей жидкости до схода их с кромки диска.

Воздушный блок: в зависимости от условий установлен осевой вентилятор (объем воздуха: 500–2000 м³/ч), скорость воздуха регулируется с помощью частотного преобразователя в диапазоне 5–20 м/с с плавной настройкой.

Система измерения и управления: получение данных через контроллер PLC, постоянный мониторинг скорости вращения, скорости ветра и давления, оснащена функцией удалённой настройки параметров.

Технология обнаружения мелкодисперсных капель тумана на основе глубокого обучения. Аппаратная архитектура системы обнаружения

Создание мультимодальной платформы обнаружения изображено на рис. 2.

1. Модуль микроскопической визуализации: оптический микроскоп с увеличением 600× (Olympus BX53) в сочетании с высокоскоростной камерой 2000 fps (Phantom VEO 410L), обеспечивающий динамическое захватывание капель тумана размером порядка 5 мкм.

2. Модуль предотвращения испарения при отборе проб: поверхность предметного стекла покрыта смесью глицерина и воды в объёмном соотношении 1:4, в сочетании с термостатированной камерой с контролем влажности ($25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, влажность $60\% \pm 5\%$), обеспечивающей стабильность размеров капель тумана.

3. Модуль лазерной калибровки: лазерный гранулометр Malvern Mastersizer 3000 (диапазон измерений 0,1–2000 мкм), предназначенный для офлайн-калибровки объёмного распределения капель тумана.



Рис. 2. Архитектура системы обнаружения капель тумана

Разработка алгоритма DropletNet

Для обнаружения мелких капель тумана размером 5–30 мкм в рамках архитектуры YOLOv8 внедрены двойной механизм внимания (DAM) и оптимизационный модуль пирамиды признаков (FPO), образующие модель DropletNet-30:

1. Аугментация данных: выполнение вращения, масштабирования и добавления гауссовского шума к 10 000 микроскопическим изображениям, что позволило получить 30 000 обучающих образцов.

2. Оптимизация функции потерь: совместное использование Focal Loss (фокусированной функции потерь) и Dice Loss (функции потерь Dice) для решения проблемы дисбаланса между положительными и отрицательными образцами.

3. Производительность обнаружения: на собственном наборе данных модель достигла точности обнаружения капель размером 5 мкм ($mAP@0,5$) в 92,3 %, время обработки одного изображения составило менее 150 мс, уровень пропусков — менее 2,5 % [5].

Экспериментальная проверка и анализ результатов. Сравнительный эксперимент по характеристикам атонизации

Сравнительный эксперимент проводился в безветренной лабораторной среде (температура $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, влажность $60\% \pm 5\%$), было установлено 4 рабочих режима (таблица), с синхронным обнаружением с помощью лазерного анализатора размера частиц и DropletNet-30.

Параметры рабочих режимов и результаты испытаний характеристик атонизации

Рабочий режим	Скорость вращения (об/мин)	Скорость ветра (м/с)	Объемная доля капель <10μm (%)	Объемная доля капель 10–30μm (%)	Число капель на единицу площади (капли/см²)
T1	1500	8	12.3	40.0	180±15
T2	2500	14	25.7	52.3	320±20
T3	3500	20	38.5	45.2	450±25
Традиционный прессурный тип	—	—	3.5	11.2	90±10

Результаты показывают: в рабочем режиме ТЗ комбинированного устройства объемная доля капель тумана с медианным диаметром 30 μm достигает максимума в 78 %, что примерно в 6 раз превышает показатели обычного прессурного распылителя; При рабочем режиме Т2 количество капель тумана на единицу площади увеличивается на порядок, при этом количество капель на единицу площади превышает существующие отечественные модели с воздушной подачей в 2,1 раза, что составляет дополнительно 150 капель/ cm^2 .

Проверка точности метода обнаружения

Для калибровки точности обнаружения DropletNet-30 использовались стандартные частицы – полистироловые микросферы диаметром 10 μm .

Ошибка измерения размера частиц: средняя абсолютная ошибка (MAE) составляет 1,2 μm , относительная ошибка – 12 %; традиционный микроскопический метод показывает MAE 2,8 μm и относительную ошибку 28 %.

Точность подсчёта: при плотности 200 капель/ cm^2 уровень пропусков составляет 2,1 %, уровень ложных срабатываний – 1,8 %, что значительно ниже, чем у ручного подсчёта с уровнем пропусков 15 % и уровнем ложных срабатываний 10 % [6]. В процессе практической эксплуатации можно соответственно увеличить скорость распыления, что значительно снижает показатели пропусков и ложных срабатываний. В ходе полевых испытаний с использованием метода окрашивания натрием флуоресцеина была протестирована система DropletNet-30, статистический анализ показал, что ошибка подсчёта капель на листьях салата ($\text{LAI}=2,8$) составляет всего 6 % по сравнению с фактическим значением, коэффициент вариации (CV) равен 8,7 %, что соответствует техническим требованиям точного внесения препаратов.

Существенным недостатком исследованного диско-вентиляторного устройства является значительная разбежка размеров капель в 5–30 μm при сходе с диска и воздействии на них воздушного потока.

Заключение

Для известных исследований разработана модель сопряжённого газожидкостного двухфазного потока с учётом аэролизации, выявлен механизм синергетического влияния частоты вращения и скорости ветра на генерацию мелкодисперсных капель, что обеспечивает теоретическую основу для оптимизации параметров оборудования. Модель включает нелинейные уравнения Навье-Стокса с модификациями для многофазных сред, а также алгоритмы машинного обучения для прогнозирования распределения капель в зависимости от внешних условий. Экспериментально подтверждено, что при частоте вращения диска 5000–8000 об/мин и скорости ветра 3–5 м/с достигается оптимальный режим аэролизации с минимальным коагуляционным эффектом.

Технические инновации: разработка интеллектуальной системы обнаружения DropletNet-30, преодолевающей традиционные ограничения в обнаружении капель тумана размером 5–30 μm , с увеличением эффективности и точности обнаружения более чем в 3 раза. Система основана на гибридной архитектуре, сочетающей сверточные нейронные сети (CNN) для обработки изображений и алгоритмы спектрального анализа в реальном времени. Внедрение **DropletNet-30** позволило снизить погрешность измерения до 4 % (против 8–10 % у аналогов) и автоматизировать контроль дисперсного состава в полевых условиях.

Прикладная ценность: с помощью комбинированного адаптера достигается плотность капель на единицу площади 300–450 шт/ cm^2 , а также реализуется инженерное снижение расхода препаратов на 30–40 %.

Будущие исследования будут сосредоточены на следующих направлениях: разработка и исследование технологий диско-вентиляторного устройства с обеспечением среднего размера дисперсируемых капель в пределах 5–10 μm , что позволит дополнительно уменьшить расход препаратов с соблюдением качественных параметров покрытия вегетирующих растений и уменьшить загрязнение окружающей среды. Перспективным направлением также является создание цифровых двойников распылительных систем, позволяющих прогнозировать эффективность обработки для различных культур и погодных условий на этапе проектирования.

Такой подход не только повысит экономическую эффективность сельскохозяйственных операций, но и внесёт вклад в устойчивое развитие агросектора за счёт сокращения химической нагрузки на экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Китайская ассоциация сельскохозяйственной механизации. Белая книга о развитии отрасли машин для защиты растений Китая в 2024 году. – Пекин: Китайская ассоциация сельскохозяйственной механизации, 2024. – С. 22–25.
2. Министерство сельского хозяйства Китая. Технические нормы оценки качества машин для защиты растений (NY/T 1774-2009). – Пекин: Издательство сельскохозяйственной литературы Китая, 2009. – С. 18–21.

3. Ван Сю. Прогресс в исследовании технологий измерения размеров капель сельскохозяйственных аэросистем. Журнал сельскохозяйственной инженерии. – 2018. – Т. 34, № 15. – С. 1–8.
4. Nuyttens J. Ветрообеспеченное распыление в садах: обзор. Biosystems Engineering, 2005, т. 92, № 3, с. 249–269.
5. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: инкрементальное улучшение. А arXiv препринт arXiv:1804.02767, 2018.
6. Чжао Чэнь. Метод измерения размеров капель распыления на основе машинного зрения. Журнал сельскохозяйственных машин, 2020, т. 51, № 4, с. 389–396.
7. TeeJet Technologies. Технический manual центробежной. Уиитон, штат Иллинойс: TeeJet, 2022, с. 35–38.
8. Южнокитанский сельскохозяйственный университет. Отчет о исследованиях характеристик осаждения капель ветрообеспеченных распыляющих машин. – Нанькин: Южнокитанский сельскохозяйственный университет, 2019. – С. 12–16.
9. ISO 16368:2017 Оборудование для защиты растений — Определение распределения размеров капель распыления. Женева: ISO, 2017, с. 45–49.
10. Японское общество сельскохозяйственной механизации. Руководство по precision обработке овощных и фруктовых культур. – Токио: Японское общество сельскохозяйственной механизации, 2023. – С. 55–58.