ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3:532.5
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

Верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла двухфазной пневматической форсункой с тангенциальной закруткой воздуха

В.В. Красовский[1]✉, ***Ю.Б. Гербер***[2]

[1, 2] Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Российская Федерация

[1] Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма; г. Симферополь, Российская Федерация

[1] vitaliy-krasovskiy@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-5556-9531

[2] gerber_1961@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

Аннотация. Дифференцированное внесение средств защиты растений требует создания распылителей, способных сохранять мелкодисперсность факела при снижении расхода жидкости. Двухфазная пневматическая форсунка с тангенциальной закруткой воздуха является перспективным решением, однако для такого устройства полуэмпирическая модель дисперсности не верифицирована. С целью верификации полуэмпирической модели аналитически рассчитан прогнозируемый среднесаутровский диаметр капель (SMD) и сопоставлен со значением, полученным CFD-моделированием. Аналитическая модель определения SMD построена на основе корреляции Нукиямы-Танасавы. CFD-моделирование выполнено в программе ANSYS Fluent (модель Mixture + DPM, турбулентность – k-ω SST) для девяти режимов, представленных комбинацией скорости воды 4, 6, 8 м/с и скорости воздуха 100, 150, 200 м/с. Определено влияние параметра GMR (отношение массового расхода газа к массовому расходу жидкости) на сходимость аналитических и CFD-расчетов SMD. Установлено, что с ростом параметра GMR обе модели демонстрируют монотонное уменьшение значения SMD в диапазоне 0,0307…0,1227. Количественные расхождения наблюдаются для режимов с максимальным (18,4%) и минимальным (–14,3%) GMR. Наилучшая сходимость результатов достигнута при GMR = 0,04…0,06. Расхождение результатов обусловливают тангенциальная закрутка воздуха, особенности моделирования вторичного дробления и эмпирические коэффициенты корреляции. Установили, что корреляция Нукиямы-Танасавы для закрученных течений должна учитывать поправочный коэффициент. При условии GMR < 0,035 предлагаем поправочный коэффициент 0,85…0,90, при GMR > 0,080 рекомендуем коэффициент 1,10…1,20, для диапазона GMR = 0,035…0,080 поправка не требуется. Предложенные поправочные коэффициенты позволят повысить точность инженерных расчетов SMD при проектировании двухфазных форсунок, обеспечивающих дифференцированное внесение средств защиты растений.

Ключевые слова: двухфазная пневматическая форсунка; тангенциальная закрутка воздуха; среднесаутровский диаметр; корреляция Нукиямы-Танасавы; CFD-моделирование; ANSYS Fluent; дифференцированное внесение средств защиты растений

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26-26-20042 «Исследование динамики взаимодействия рабочих органов с растениями для создания адаптивных систем защиты садовых насаждений (на примере Крымского региона)».

Для цитирования: Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла двухфазной пневматической форсункой с тангенциальной закруткой воздуха // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 48-56. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

© Красовский В.В., Гербер Ю.Б., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Verification of a semi-empirical model of spray dispersion for a two-phase pneumatic nozzle with tangential air swirl

V.V. Krasovskiy[1]✉, ***Yu.B. Gerber***[2]

[1,2] V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia

[1] Research Institute of Agriculture of Crimea; Simferopol, Russia

[1] vitaliy-krasovskiy@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-5556-9531

[2] gerber_1961@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

Abstract. Variable-rate application (VRA) of plant protection products necessitates the development of atomizers capable of maintaining fine droplet dispersion at reduced liquid flow rates. Two-phase pneumatic nozzles with tangential air swirl offer a promising solution; however, the semi-empirical models governing their dispersion characteristics require rigorous verification. In this study, the Sauter mean diameter (SMD) predicted by an analytical model based on the Nukiyama–Tanasawa correlation was compared against Computational Fluid Dynamics (CFD) benchmarks. CFD simulations were performed in ANSYS Fluent using the Mixture model coupled with the Discrete Phase Model (DPM) and the k-ω SST turbulence closure across nine operating modes (water velocities: 4, 6, and 8 m/s; air velocities: 100, 150, and 200 m/s). The influence of the gas-to-liquid mass ratio (GMR) on the convergence of analytical and CFD calculations of the model was evaluated. Both models demonstrated a monotonic decrease in SMD as GMR increased from 0.0307 to 0.1227. Notable quantitative discrepancies occurred at GMR extremes (+18.4% and –14.3%), while the highest agreement was achieved within GMR = 0.04-0.06. The deviations are attributed to tangential swirl effects and secondary breakup dynamics not captured by conventional correlations. The findings prove that the Nukiyama–Tanasawa correlation for swirling flows requires a correction factor. To improve predictive accuracy, GMR-dependent correction factors have been proposed: 0.85-0.90 for GMR < 0.035, and 1.10-1.20 for GMR > 0.080, with no correction required for the intermediate range (GMR = 0.035-0.080). These refinements enhance the reliability of engineering calculations of SMD when designing two-phase pneumatic nozzles for variable-rate pesticide application.

Keywords: two-phase pneumatic nozzle; tangential air swirl; Sauter mean diameter (SMD); Nukiyama–Tanasawa correlation; CFD simulation; ANSYS Fluent; variable-rate application (VRA) of plant protection products

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 26-26-20042, "Study of the Dynamics of Interaction Between Working Elements and Plants for the Development of Adaptive Protection Systems for Orchard Plantations (Case Study of the Crimean Region)."

For citation: Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B. Verification of a semi-empirical model of spray dispersion for a two-phase pneumatic nozzle with tangential air swirl. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):48-56. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

Введение

Дифференцированное внесение средств защиты растений (СЗР), при котором норма расхода рабочей жидкости адаптируется к пространственной неоднородности состояния посевов, повышает ресурсоэффективность и экологическую безопасность сельскохозяйственного производства [1-3]. Однако широкое внедрение этой технологии сдерживается фундаментальным техническим противоречием. Как отмечают A.H. Lefebvre[1], Д.М. Юмаев, П.Ю. Коренков и др. [4, 5], традиционные гидравлические форсунки не являются способными сохранять требуемое качество распыла при значительном снижении расхода жидкости. В частности, S. Nukiyama, R.D. Reitz и др. [6, 7] уточняют, что при снижении давления резко падает энергия диспергирования, и это приводит к укрупнению капель и «схлопыванию» факела.

В качестве альтернативы В.Г. Гейер и В.Н. Соколов[2] разработали систему двухфазного (пневматического) распыления, где диспергирование осуществляется высокоскоростным потоком воздуха. Преимуществом таких систем, по мнению В.В. Цыбулевского и др. [3], является возможность независимого управления потоками жидкости и газа. Согласно расчетам [2, 4] при снижении расхода жидкости на 25…30% и сохранении постоянного давления воздуха параметр GMR (gas-to-liquid mass ratio – отношение массового расхода воздуха к массовому расхо-

[1] Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and Sprays. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 300 p.

[2] Гейер В.Г., Соколов В.Н. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1977. 128 с.

ду жидкости) возрастает на 22…33%, а угол распыла не сужается, а расширяется.

По мнению A.H. Lefebvre[3], ключевым параметром качества распыления является дисперсный состав факела, в качестве количественной меры которого служит среднесаутровский диаметр капель (Sauter Mean Diameter – SMD). От показателя SMD зависят покрывающая способность, удерживаемость на листьях, глубина проникновения в растительный покров и риск сноса капель [4, 8, 9]. Согласно стандарту[4] ASABE S572.1 и исследованиям R. Murugan, Д.В. Гвоздякова, L. Jiang и др. [8-10] для эффективной обработки большинства культур требуется мелкодисперсный распыл с показателем SMD в диапазоне 50…150 мкм, а для специальных задач необходимым является ультрамелкодисперсный распыл (менее 50 мкм).

Для инженерного прогнозирования SMD в двухфазных форсунках широко используются полуэмпирические корреляции. Наиболее известна корреляция Нукиямы-Танасавы [6], разработанная для коаксиальных форсунок с осевой подачей воздуха. Но для форсунки с тангенциальной закруткой воздуха, по мнению H. Jin, P. Wang и др. [11, 12], механизм диспергирования существенно изменяется. Тангенциальная закрутка воздуха создает дополнительные центробежные силы и турбулентные пульсации, которые могут интенсифицировать распад жидкой пленки.

Численные исследования двухфазных форсунок и сопел [13-15], а также смежные CFD-исследования двухфазных сопел [16] показали, что систематические количественные сравнения аналитических корреляций SMD с результатами CFD-моделирования[4] для двухфазных форсунок с тангенциальной закруткой воздуха практически отсутствуют. Также не определены границы применимости корреляции Нукиямы-Танасавы для закрученных течений в диапазоне режимов, характерном для дифференцированного внесения средств защиты растений [1, 2, 4].

Цель исследований: верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла в двухфазной пневматической форсунке с тангенциальной закруткой воздуха путем сравнения аналитической корреляции Нукиямы-Танасавы и CFD-моделирования.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований послужила двухфазная пневматическая форсунка с тангенциальной закруткой воздуха, предназначенная для распыления рабочей жидкости (воды) высокоскоростным потоком воздуха. В работе исследуется физический процесс взаимодействия закрученного потока воздуха с жидкостью в камере смешения и последующего диспергирования.

Для численного моделирования в ANSYS Fluent построена трехмерная геометрическая модель расчетной области. Детальное описание геометрии, параметров расчетной сетки и граничных условий приведено в работе [2], где исследовалась геометрия факела той же форсунки. Двухфазная пневматическая форсунка представляет собой устройство, включающее в себя центральный канал воды диаметром 2,0 мм, два тангенциальных канала воздуха диаметрами 2,0 мм каждый, расположенных на расстоянии 2,9 мм от оси, камеру смешения диаметром 8,0 мм и длиной 14,5 мм, выходное сопло диаметром 2,0 мм и длиной 0,5 мм и расширенную область за срезом сопла размером 265 мм для развития факела.

Выбранные размеры соответствуют диапазонам, характерным для пневматических распылителей сельскохозяйственного назначения[5] [3-5, 17], и обеспечивают сильную закрутку потока[6] (геометрическая характеристика – A = 1,33…2,77) [3, 11].

Для аналитического прогнозирования среднесаутровского диаметра капель использована полуэмпирическая корреляция Нукиямы-Танасавы в форме, рекомендованной для пневматических форсунок [6, 8]:

$$SMD = 0{,}585 \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \rho_l}{W_g^2 \cdot \rho_g}} + 2{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\mu_l^2 \cdot D_h}{\sigma \cdot \rho_l}\right)^{0{,}45} \cdot \left(\frac{1000 \cdot Q_l}{Q_g}\right)^{1{,}5}, \quad (1)$$

где SMD – среднесаутровский диаметр капли, мкм; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (0,072 Н/м); ρ_l – плотность жидкости (1000 кг/м^3); ρ_g – плотность воздуха (1,2 кг/м^3); W_g – скорость воздуха на выходе из тангенциальных каналов, м/с; μ_l – динамическая вязкость жидкости (0,001 Па·с); D_h – характерный размер (диаметр выходного сопла, 0,002 м); Q_l – объемный расход жидкости, м^3/с; Q_g – объемный расход воздуха, м^3/с.

[3] Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and Sprays. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 300 p.

[4] ASABE S572.1. Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. 8 p.

[4] ANSYS Fluent User's Guide. Release 2023 R2. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.; 2023. Available from: https://ansyshelp.ansys.com/ [дата обращения: 08.04.2026].

[5] Цыбулевский В.В. Опрыскиватели для обработки садов пневматическими щелевыми распылителями: Монография. Краснодар: Новация, 2024. 120 с.

[6] Гейер В.Г., Соколов В.Н. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1977. 128 с.

Первый член корреляции описывает вклад аэродинамического диспергирования (размер капли обратно пропорционален скорости воздуха), второй член учитывает влияние вязкости жидкости и соотношение расходов фаз.

Постоянные физические свойства приняты для системы «Вода-воздух». Объемные расходы Q_l и Q_g рассчитывались на основе заданных скоростей и площадей сечений каналов с использованием коэффициентов расхода $\mu_l = 0{,}3$ и $\mu_g = 0{,}4$, учитывающих гидравлические потери и закрутку потока.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent 2023 R2 [13, 14, 16]. Расчетная *CFD*-модель базируется на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS).

Для описания движения сплошных фаз (вода и воздух) применена эйлерова модель смеси (Mixture), решающая уравнения сохранения массы, импульса и энергии для смеси в целом, а также уравнение переноса объемной доли воды. После достижения сходимости по сплошным фазам активировалась дискретно-фазовая модель (DPM) для отслеживания траекторий капель [10, 14, 15].

Для замыкания уравнений Рейнольдса выбрана двухпараметрическая модель турбулентности *k*-ω SST (Shear Stress Transport) [18], хорошо зарекомендовавшая себя для расчета закрученных течений с высокими градиентами скорости.

Дискретизация уравнений конвекции выполнена по схеме второго порядка точности. Связь давления и скорости описана алгоритмом SIMPLE. Критерии сходимости: невязки < 10^{-4}, стабилизация интегральных расходов (изменение < 0,1% за 100 итераций).

Параметры неструктурированной тетраэдральной сетки (1,2 млн ячеек, призматические слои у стенок) и граничные условия (velocity inlet для воды и воздуха, pressure outlet на выходе) подробно описаны в работе [2], где показано, что сеточная сходимость достигнута (отклонение между базовой и мелкой сетками < 3%).

Для исследования влияния параметров режима на процесс двухфазного распыления реализован полный факторный эксперимент 3×3. Варьируемыми параметрами являются средняя скорость воды на входе в центральный канал W_l и средняя скорость воздуха на входе в тангенциальные каналы W_g.

Диапазоны скоростей выбраны на основе следующих соображений:

– $W_l = 4, 6, 8$ м/с соответствует изменению объемного расхода жидкости от 0,74 до 1,48 л/мин (при площади водяного сопла $3{,}09\times10^{-6}$ м^2), что перекрывает номинальный режим (1,5 л/мин) и режим пониженного расхода (снижение до 25…30%);

– $W_g = 100$, 150, 200 м/с охватывает диапазон от умеренного до высокоскоростного истечения, характерного для пневматических форсунок с давлением воздуха 2,5…3,0 бар [3, 5, 17].

Комбинации значений W_l и W_g образуют 9 расчетных режимов (табл. 1).

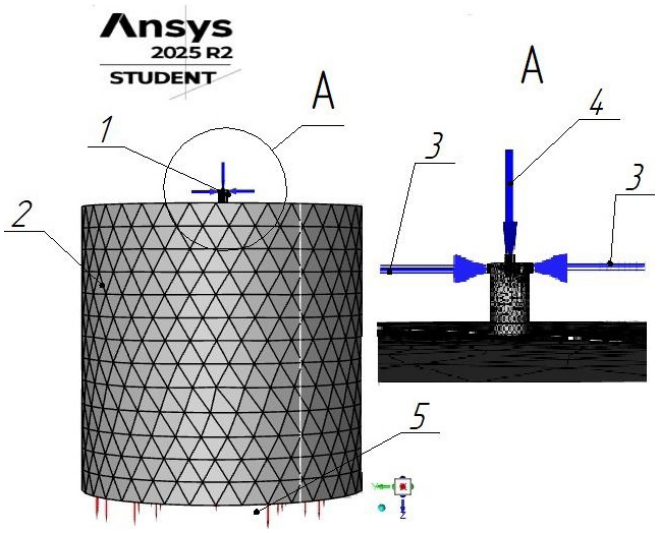


Рис. 1. Трехмерная модель расчетной области двухфазной пневматической форсунки в ANSYS Fluent:
1 – форсунка; 2 – расчетная область за срезом сопла для развития факела распыла; 3 – входы воздуха (inlet_air); 4 – вход воды (inlet_water); 5 – открытая граница на выходе из расчетной области (outlet)

Fig. 1. Three-dimensional computational domain model of the two-phase pneumatic nozzle in ANSYS Fluent:
1 – nozzle; 2 – computational domain downstream of the nozzle outlet for spray development; 3 – air inlets (inlet_air); 4 – water inlet (inlet_water); 5 – open boundary at the outlet of the computational domain (outlet)

Таблица 1

План численных экспериментов

Table 1

Plan of numerical experiments

Обозначение	W_l, м/с	W_g, м/с
W4_A100	4	100
W4_A150	4	150
W4_A200	4	200
W6_A100	6	100
W6_A150	6	150
W6_A200	6	200
W8_A100	8	100
W8_A150	8	150
W8_A200	8	200

Для каждого режима выполнен полный цикл расчета: решение уравнений многофазной гидродинамики до установления стационарного состояния (контроль невязок и интегральных расходов), затем – активация DPM-модели для отслеживания траекторий капель и сбора статистики по дисперсному составу.

Среднесаутровский диаметр капель D в CFD-модели определен на основе статистики траекторий дискретных частиц (DPM) на выходе из расчетной области (поверхность на расстоянии 265 мм от среза сопла). Статистика собиралась после достижения установившегося режима в течение 5000 временных шагов.

Для каждого режима фиксировались распределение капель по диаметрам, среднесаутровский диаметр $SMD = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$ и количество капель в выборке (не менее 10 000 для обеспечения статистической значимости).

Результаты и их обсуждение

Для девяти расчетных режимов определены массовые расходы воды и воздуха, а также рассчитан безразмерный параметр GMR (Gas-to-Mass Ratio), характеризующий отношение массового расхода воздуха к массовому расходу жидкости:

$$GMR = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l}, \qquad (2)$$

где $\dot{m}_g$ – массовый расход воздуха, кг/с; $\dot{m}_l$ – массовый расход жидкости, кг/с.

Параметр показывает, сколько килограммов газа приходится на 1 кг жидкости; с его ростом доля газа увеличивается, что интенсифицирует диспергирование и уменьшает SMD.

В таблице 2 представлены полученные значения.

Анализ таблицы 2 показывает, что GMR изменяется в диапазоне от 0,0307 (режим W8_A100) до 0,1227 (режим W4_A200). Увеличение скорости воздуха при фиксированной скорости воды приводит к линейному росту GMR. Снижение скорости воды (уменьшение расхода жидкости) при фиксированной скорости воздуха также вызывает увеличение GMR.

Для каждого режима рассчитаны значения среднесаутровского диаметра капель SMD двумя способами: аналитически (по корреляции Нукиямы-Танасавы) и численно (по результатам CFD-моделирования с использованием DPM-статистики). Результаты сравнения представлены в таблице 3 и на рисунке 2.

Из данных таблицы 3 и рисунка 2 следует, что обе модели демонстрируют одинаковый качественный

Таблица 2

Массовые расходы и параметр GMR для 9 режимов

Table 2

Mass flow rates and GMR parameter for nine modes

Режим	W_l, м/с	W_g, м/с	$\dot{m}_l$, кг/с	$\dot{m}_g$, кг/с	*GMR*
W4_A100	4	100	0,01234	0,000757	0,0614
W4_A150	4	150	0,01234	0,001136	0,0920
W4_A200	4	200	0,01234	0,001514	0,1227
W6_A100	6	100	0,01851	0,000757	0,0409
W6_A150	6	150	0,01851	0,001136	0,0614
W6_A200	6	200	0,01851	0,001514	0,0818
W8_A100	8	100	0,02468	0,000757	0,0307
W8_A150	8	150	0,02468	0,001136	0,0460
W8_A200	8	200	0,02468	0,001514	0,0614

Таблица 3

Сравнение аналитических и CFD-значений SMD

Table 3

Comparison of analytical and CFD SMD values

Режим	GMR	$SMD_{аналит}$, мкм	SMD_{CFD}, мкм	Отклонение, %
W4_A100	0,0614	65	68	+4,6
W4_A150	0,0920	48	54	+12,5
W4_A200	0,1227	38	45	+18,4
W6_A100	0,0409	85	84	–1,2
W6_A150	0,0614	65	70	+7,7
W6_A200	0,0818	52	60	+15,4
W8_A100	0,0307	105	90	–14,3
W8_A150	0,0460	80	78	–2,5
W8_A200	0,0614	65	68	+4,6

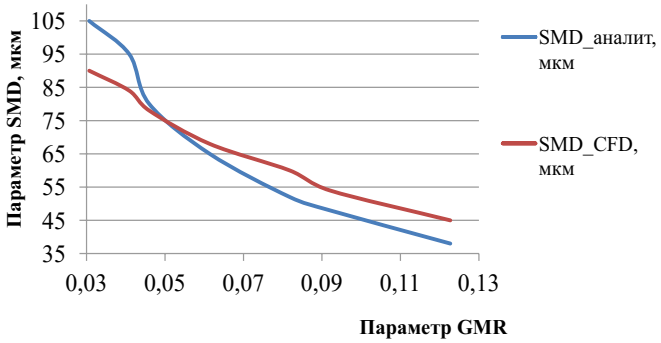


Рис. 2. Сравнение аналитической зависимости SMD от GMR (корреляция Нукиямы-Танасавы) с CFD-значениями

Fig. 2. Comparison of the analytical relationship between SMD and GMR (Nukiyama–Tanasawa correlation) with CFD values

тренд: с ростом параметра GMR (увеличением скорости воздуха или уменьшением расхода воды) SMD монотонно уменьшается. Однако наблюдаются систематические количественные расхождения.

При низких значениях GMR (режим W8_A100, GMR = 0,0307) аналитическая модель дает SMD = = 105 мкм, при CFD-моделировании SMD = 90 мкм, отклонение – 14,3% (аналитика завышает).

При высоких значениях GMR (режим W4_A200, GMR = 0,1227) аналитическая модель дает SMD = 38 мкм, моделирование показывает 45 мкм, отклонение составляет +18,4% (аналитика занижает).

Наилучшая сходимость наблюдается в диапазоне GMR = 0,04…0,06 (режимы W6_A100, W8_A150, W6_A150), где отклонение не превышает 5% по абсолютной величине.

Для визуализации совместного влияния скоростей воды и воздуха на дисперсность распыла построены поверхности отклика SMD по данным аналитической модели и CFD-расчетов (рис. 3).

Анализ поверхностей отклика позволяет сделать следующие выводы:

1. SMD уменьшается с ростом скорости воздуха W_g при всех значениях W_l. Этот эффект обусловлен увеличением аэродинамических сил, диспергирующих жидкость.

2. SMD уменьшается со снижением скорости воды W_l (уменьшением расхода жидкости). При постоянной скорости воздуха снижение W_l приводит к уменьшению соотношения расходов Q_l/Q_g, что уменьшает второй член корреляции.

3. Минимальные значения SMD (45 мкм по CFD, 38 мкм по аналитике) достигаются в режиме W4_A200 (W_l = 4 м/с, W_g = 200 м/с).

4. Максимальные значения SMD (90 мкм по CFD, 105 мкм по аналитике) достигаются в режиме W8_A100 (W_l = 8 м/с, W_g = 100 м/с).

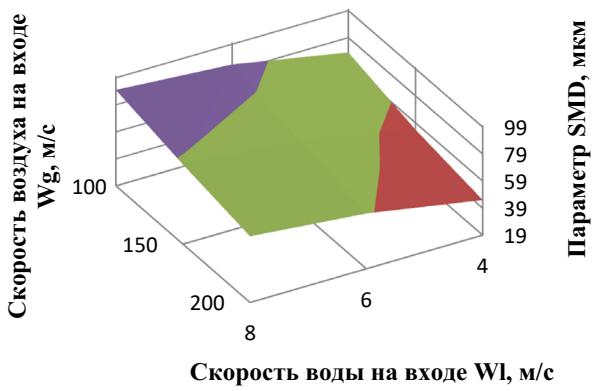


Рис. 3. Поверхность отклика SMD в зависимости от скоростей воды W_l и воздуха W_g

Fig. 3. Response surface of SMD as a function of water velocity W_l and air velocity W_g

Выявленные расхождения имеют систематический характер и могут быть объяснены следующими тремя причинами:

1. Влияние тангенциальной закрутки воздуха. Корреляция Нукиямы-Танасавы разработана для коаксиальных форсунок с осевой подачей воздуха. В представленной работе используется форсунка с тангенциальной закруткой, что создает дополнительные центробежные силы и турбулентные пульсации, интенсифицирующие диспергирование. При высоких GMR (режимы W4_A150, W4_A200, W6_A200) CFD дает меньшие значения SMD по сравнению с аналитикой, что согласуется с данными литературы о влиянии закрутки на уменьшение размера капель [11, 12].

2. Отсутствие моделирования вторичного дробления. В использованной DPM-модели вторичное дробление капель моделировалось упрощенно. При высокой скорости воздуха (200 м/с) этот эффект может быть значимым и приводить к дополнительному уменьшению SMD, что частично объясняет расхождения.

3. Эмпирические коэффициенты корреляции. Коэффициенты 0,585 и $2{,}82\times10^{-3}$ в формуле корреляции были получены Нукиямой и Танасавой для определенного диапазона режимов и свойств жидкостей. Их применение к условиям закрученного течения может потребовать калибровки.

Сопоставим полученные результаты с известными экспериментальными и расчетными данными для аналогичных типов форсунок (табл. 4).

Полученные в работе значения SMD (45…90 мкм в зависимости от режима) хорошо согласуются с данными литературы для аналогичных типов двухфазных форсунок. Результаты CFD для режима W8_A150 (SMD = 78 мкм) близки к данным Murugan et al. для twin-fluid форсунки в аналогичном диапазоне режимов (70…85 мкм).

Параметр GMR является ключевым безразмерным критерием, определяющим энергетику процесса диспергирования. На основе регрессионного анализа данных таблицы 3 установлено, что:

– при GMR < 0,035 аналитическая модель завышает SMD (отклонение –14,3%);

– при GMR = 0,04…0,06 отклонение является минимальным (менее 5%);

– при GMR > 0,08 аналитическая модель занижает SMD (отклонение до +18,4%).

Применительно к форсункам с тангенциальной закруткой воздуха предлагаем поправочные коэффициенты для корреляции Нукиямы-Танасавы (табл. 5).

Поправочный коэффициент вводится следующим образом:

$$SMD_{corr} = SMD_{N-T} \cdot k_{corr}, \quad (3)$$

где SMD_{N-T} – значение, рассчитанное по корреляции Нукиямы-Танасавы.

Для режима W4_A200 (GMR = 0,1227) применение коэффициента $k_{corr} = 1,15$ дает скорректированное значение $SMD_{corr} = 38 \cdot 1,15 = 43,7$ мкм, что отличается от CFD-значения (45 мкм) всего на 2,9%.

Таблица 4

Сравнение полученных значений SMD с данными других исследователей

Table 4

Comparison of the obtained SMD values with literature data

Тип форсунки (источник)	Режим	SMD, мкм
Пневматическая, тангенциальная закрутка воздуха (CFD-моделирование, настоящая работа)	W_l = 8 м/с, W_g = 150 м/с	78
Пневматическая, тангенциальная закрутка (расчет по корреляции Nukiyama-Tanasawa, представленная работа)	при GMR = 0,046	80
Twin-fluid, flow-blurring ([8])	P_g = 3 бар, Q_l = 1,5 л/мин	70…85
Internal-mixing air-assisted ([12])	Q_l/Q_g = 0,03	65…80
Swirl-flow atomizer ([11])	W_g = 140 м/с	60…75
Пневматическая, трехкомпонентные суспензии ([9])	номинальный режим	60…95
Two-phase nozzle ([10])	численно-экспериментальный	55…90

Таблица 5

Рекомендуемые поправочные коэффициенты

Table 5

Recommended correction factors

Диапазон GMR	Характер расхождения	Рекомендуемый коэффициент k_{corr}
< 0,035	Аналитика завышает SMD	0,85…0,90
0,035…0,080	Отклонение < 5%	1,00 (поправка не требуется)
> 0,080	Аналитика занижает SMD	1,10…1,20

Выводы

1. Количественное сравнение аналитической корреляции Нукиямы-Танасавы и CFD-моделирования SMD для двухфазной пневматической форсунки с тангенциальной закруткой воздуха показало, что обе модели демонстрируют одинаковый качественный тренд – монотонное уменьшение SMD с ростом параметра GMR в диапазоне 0,0307…0,1227.

2. Количественные расхождения между моделями достигают 18,4% для режимов с высоким GMR и –14,3% для режимов с низким GMR. Наилучшая сходимость (отклонение менее 5%) наблюдается в диапазоне GMR = 0,04…0,06, что соответствует номинальным режимам работы форсунки.

3. Причинами расхождений являются: во-первых, неучтенная в исходной корреляции тангенциальная закрутка воздуха, которая интенсифицирует диспергирование при высоких GMR; во-вторых, упрощенное моделирование вторичного дробления капель в CFD; в-третьих, эмпирические коэффициенты корреляции, требующие калибровки для закрученных течений.

4. Для корреляции Нукиямы-Танасавы при условии GMR < 0,035 рекомендуем ввести поправочный коэффициент k_{corr} = 0,85…0,90, при GMR > 0,080 k_{corr} = 1,10…1,20; для диапазона GMR = 0,035…0,080 поправка не требуется.

5. Полученные результаты позволяют повысить точность инженерных расчетов SMD при проектировании двухфазных форсунок с тангенциальной закруткой воздуха для систем дифференцированного внесения средств защиты растений. Предложенные поправочные коэффициенты могут быть использованы для прогнозирования дисперсности распыла в режимах пониженного расхода жидкости (при снижении на 25…30%) без дополнительных CFD-расчетов.

Список источников

1. Гербер Ю.Б., Красовский В.В. Технологии интеллектуального анализа и принятия решений в садоводстве // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2024. № 37 (200). С. 186-198. EDN: DOAPNV

2. Красовский В.В., Гербер Ю.Б., Бережная Т.Е. Моделирование дисперсного состава факела в двухфазной пневматической форсунке переменного расхода для систем дифференцированного внесения средств защиты растений // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2026. № 45 (208). С. 152-165. EDN: XZAKOM

3. Загидуллин Р.Р., Цыбулевский В.В., Тарасенко Б.Ф. и др. Обоснование схемы и параметров пневматического щелевого распылителя с проточной камерой // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 271-280. https://doi.org/10.17816/0321-4443-624312

4. Юмаев Д.М., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю. и др. Экспериментальное обоснование параметров форсунки-распылителя для агропромышленного комплекса // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2022. Т. 14, № 4. С. 193-200. EDN: TZCHSB

5. Коренков П.Ю., Космодемьянский Ю.В., Лукин Н.Д. Дисперсные характеристики факела распыления низконапорного пневматического распылителя // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. № 2-3. С. 42-45. EDN: QCAHPT

6. Nukiyama S., Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an airstream. Transactions of the Society of Mechanical Engineers. 1939;5:68-75. https://doi.org/10.1299/kikai1938.5.68

7. Reitz R.D., Bracco F.V. Mechanism of atomization of a liquid jet. The Physics of Fluids. 1982;25(10):1730-1742. https://doi.org/10.1063/1.863650

8. Murugan R., Balusamy S., Kolhe P. Experimental study of liquid spray mode of twin fluid atomizer using optical diagnostic tool. Flow, Turbulence and Combustion. 2021;106(1):261-289. https://doi.org/10.1007/s10494-020-00195-1

9. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И. Диспергирование трехкомпонентных суспензий после распыления пневматической форсункой // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 5. С. 961-971. EDN: CVLAYG

10. Jiang L., Rao W., Deng L. et al. Measuring Liquid Droplet Size in Two-Phase Nozzle Flow Employing Numerical and Experimental Analyses. Micromachines. 2022;13(5):684. https://doi.org/10.3390/mi13050684

11. Jin H., Xu H., Yu C. et al. Atomization and mixing characteristics of swirl-flow atomizers in the refining industry. Chemical Engineering & Technology. 2020;43(9):1823-1831. https://doi.org/10.1002/ceat.202000063

12. Wang P., Shi Y., Zhang L., Li Y. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle. Process Safety and Environmental Protection. 2019;128:316-328. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.014

13. Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Кудинов И.В. Моделирование двухфазных потоков в форсунке камеры ЖРД с помощью ANSYS CFD // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 6-3. С. 667-670. EDN: SHQPNF

14. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu. et al. Application of three-dimensional numerical study in air-blast atomizer designing. Computational Continuum Mechanics. 2013;6(3):346-353. EDN: RCLESR

15. Симаков Н.Н. Численное моделирование двухфазного потока, созданного распыливанием жидкости форсункой

References

1. Gerber Yu.B., Krasovskiy V.V. Technologies of intellectual analysis and decision-making in horticulture. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2024;37:186-198. (In Russ.)

2. Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B., Berezhnaya T.E. Modeling of the dispersed composition of a flare in a two-phase variable flow pneumatic nozzle rate for differentiated application of plant protection products. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2026;45:152-165. (In Russ.)

3. Tsybulevsky V.V., Tarasenko B.F., Troyanovskaya I.P. et al. Justification of the layout and parameters of a pneumatic slot atomizer with a flow chamber. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(3):271-280. https://doi.org/10.17816/0321-4443-624312

4. Yumaev D.M., Rembalovich G.K., Kostenko M.Yu. et al. Experimental substantiation of the paramatars of the spray nozzle for the agro-industrial complex. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2022;14(4): 193-200. (In Russ.)

5. Korenkov P.Yu., Kosmodemyanskiy Yu.V., Lukin N.D. Spray dispersion characteristics of a low-pressure pneumatic atomizer. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*. 2002;2-3:42-45. (In Russ.)

6. Nukiyama S., Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an airstream. *Transactions of the Society of Mechanical Engineers*. 1939;5:68-75. https://doi.org/10.1299/kikai1938.5.68

7. Reitz R.D., Bracco F.V. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The Physics of Fluids*. 1982;25(10):1730-1742. https://doi.org/10.1063/1.863650

8. Murugan R., Balusamy S., Kolhe P. Experimental study of liquid spray mode of twin fluid atomizer using optical diagnostic tool. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2021;106(1):261-289. https://doi.org/10.1007/s10494-020-00195-1

9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I. Dispersion of three-component slurries after spraying with a pneumatic nozzle. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2024;31(5):961-971. (In Russ.)

10. Jiang L., Rao W., Deng L. et al. Measuring liquid droplet size in two-phase nozzle flow employing numerical and experimental analyses. *Micromachines*. 2022;13(5):684. https://doi.org/10.3390/mi13050684

11. Jin H., Xu H., Yu C. et al. Atomization and mixing characteristics of swirl-flow atomizers in the refining industry. *Chemical Engineering & Technology*. 2020;43(9):1823-1831. https://doi.org/10.1002/ceat.202000063

12. Wang P., Shi Y., Zhang L., Li Y. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;128:316-328. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.014

13. Egorychev V.S., Shabliy L.S., Kudinov I.V. Modeling of two-phase flow in the injector of LRE camera with ANSYS CFD. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyskoy akademii nauk*. 2013;15(6-3:667-670. (In Russ.)

14. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu. et al. Application of three-dimensional numerical study in air-blast atomizer designing. *Computational Continuum Mechanics*. 2013;6(3):346-353. (In Russ.)

15. Simakov N.N. Numerical simulation of the two-phase flow produced by spraying a liquid by a nozzle. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Technical Physics*. 2017;62:1006-1012. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1063784217070222

16. Kaddour A., Ouadha A. Numerical study of the flow in a two-phase nozzle for trilateral flash cycle applications. *International Journal of Thermofluids*. 2023;19:100393. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100393

// Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 7. С. 990-996. EDN: ZAPGBR

16. Kaddour A., Ouadha A. Numerical study of the flow in a two-phase nozzle for trilateral flash cycle applications. International Journal of Thermofluids. 2023;19:100393. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100393

17. Фазылбаков Р.Р., Халилов Э.М., Зиннатуллин Р.Ф. Исследование газодинамических процессов в распылителе пневматической форсунки // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2017. № 1-2. С. 281-286. EDN: XIHKYH

18. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994;32(8):1598-1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

17. Fazylbakov R.R., Khalilov E.M., Zinnatullin R.F. Study of gas-dynamic processes in a pneumatic nozzle atomizer. *Novaya nauka*: *opyt, traditsii, innovatsii*. 2017;1-2:281-286. (In Russ.)

18. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598-1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

Информация об авторах

Красовский Виталий Викторович, канд. техн. наук, доцент, vitaliy-krasovskiy@mail.ru
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4;
ФГБУН Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма; 295043, Российская Федерация; г. Симферополь, ул. Киевская, 150
Гербер Юрий Борисович, д-р техн. наук, профессор, gerber_1961@mail.ru
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4

Author Information

Vitaliy V. Krasovskiy, CSc(Eng) Associate Professor; vitaliy-krasovskiy@mail.ru; V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4, Vernadskogo Ave., 295007, Simferopol, Russian Federation; Research Institute of Agriculture of Crimea; 150, Kievskaya str., Simferopol, 295043, Russian Federation
Yuriy B. Gerber, DSc (Eng), Professor, gerber_1961@mail.ru; V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4, Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Статья поступила 23.04.2026, после рецензирования и доработки 08.05.2026, принята к публикации 20.05.2026

Received 23.04.2026; Revised 08.05.2026; Accepted 20.05.2026