

Научная статья
УДК 631.3.001.2
DOI 10.66783/2782-3172.2026.87.13.010

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОТВЕРСТИЙ ФОРСУНОК НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧЕГО РАСТВОРА

Олег Олегович Сидоров (ORCID: 0009-0003-9829-4368), Губейдулла Сибятуллович Юнусов (ORCID: 0000-0003-2127-6439)
Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия
Автор, ответственный за переписку: Олег Олегович Сидоров, oleg.sidorov23@yandex.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования влияния конструктивных параметров форсунок на равномерность распределения жидких удобрений. Проведен анализ существующих конструкций, предложены новые технические решения по оптимизации формы и размеров отверстий распылителей.

Ключевые слова: форсунки, распылители, жидкие удобрения, равномерность распределения, каплеобразование, конструкция, оптимизация

Финансирование: исследование, на основе результатов которого написана данная статья, финансировалось за счет средств авторов

Для цитирования: Сидоров О. О., Юнусов Г. С. Исследование влияния формы и размера отверстий на равномерность распределения рабочего раствора // Вестник Вятского ГАТУ. 2026. № 3. С. 95–105. DOI: 10.66783/2782-3172.2026.87.13.010.

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF THE SHAPE AND SIZE OF NOZZLE HOLES ON THE WORKING SOLUTION DISTRIBUTION UNIFORMITY

Oleg O. Sidorov (ORCID: 0009-0003-9829-4368), Gubeidulla S. Yunusov (ORCID: 0000-0003-2127-6439)
Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia
Corresponding author: Oleg O. Sidorov, oleg.sidorov23@yandex.ru

Abstract

The article presents the results of studying the influence of the design parameters of nozzles on the uniformity of liquid fertilizer distribution. The analysis of existing designs was carried out, and new technical solutions for optimizing the shape and dimensions of sprayer holes were proposed.

Keywords: nozzles, sprayers, liquid fertilizers, uniformity of distribution, droplet formation, design, optimization

Funding: the study on which this article is based was funded by the authors' own funds

For citation: Sidorov OO, Yunusov GS. Investigating the influence of the shape and size of nozzle holes on the working solution distribution uniformity. Vestnik Vyatskogo GATU. 2026;(3):95–105. DOI: 10.66783/2782-3172.2026.87.13.010 (In Russ.).

Введение. Эффективность внесения жидких удобрений во многом зависит от качества работы распыливающих элементов. Равномерность распределения рабочего раствора является ключевым показателем, определяющим эффективность использования удобрений и урожайность сельскохозяйственных культур [4, 6].

Целью исследования является разработка и обоснование оптимальных конструктивных параметров форсунок, обеспечивающих равномерное распределение рабочего раствора при внесении жидких удобрений.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- установление взаимосвязи между геометрией проходного сечения форсунки и гидродинамическими характеристиками потока;
- оценка влияния формы отверстия на дисперсность распыла и равномерность покрытия обрабатываемой поверхности

Материалы и методы. В экспериментальной части исследования использовались форсунки с различными формами проходного сечения – в частности, круглые и эллипсовидные сопла, спроектированные с учётом расчётных значений коэффициентов расхода и требуемого объёмного расхода рабочей жидкости.

Для количественной оценки расходных характеристик применялся объёмно-гравиметрический метод: измерение объёма собранной жидкости в мерных ёмкостях за фиксированный интервал времени с последующим пересчётом на объёмный расход (Q , л/мин). Серия измерений включала не менее пяти повторностей для каждого типа форсунки с целью минимизации случайных погрешностей и статистической оценки воспроизводимости результатов.

Оценка дисперсности распыла и пространственного распределения рабочей жидкости осуществлялась с применением методики регистрации следов капель на водочувствительной фильтровальной бумаге. Методика базировалась на стандартизованных подходах к визуализации факела распыла и включала следующие этапы [1, 5]:

1. Размещение листов водочувствительной бумаги на горизонтальной поверхности на фиксированном расстоянии $L = 50$ см от среза сопла.
2. Проведение распыла в течение нормированного $t = 2$ с при постоянном рабочем давлении $P = 3$ атм.
3. После экспозиции — оптическая микроскопия центральной зоны факела с формированием статистической выборки не менее чем из $n = 100$ характерных пятен, интерпретируемых как проекции капель. По размерам пятен определялся средний диаметр капель (d_{32} , мкм) и рассчитывалась плотность покрытия (количество следов на единицу площади).
4. Для оценки равномерности распределения, бумаги размещались по всей ширине факела с разделением на три характерные зоны (центр, середина, край) и последующей оценкой относительной площади смоченных участков в каждой зоне.

В качестве модельной рабочей жидкости использовалась вода ($\rho = 1000$ кг/м³), что позволяло исключить влияние вариативности физико-химических свойств реальных удобрений на первичные гидродинамические параметры. При этом полученные закономерности по влиянию геометрии сопла на характеристики распыла могут быть экстраполированы на рабочие растворы сопоставимой вязкости и плотности с введением соответствующих поправочных коэффициентов.

Обработка экспериментальных данных выполнялась методами математической статистики: рассчитывались средние значения, среднеквадратичные отклонения, доверительные интервалы при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Сравнение выборок проводилось с использованием критериев, обеспечивающих достоверность выводов о различиях между исследуемыми типами форсунок [2, 6].

Результаты и обсуждение. В данном разделе представлены результаты собственных экспериментальных исследований, а также расчётные данные, полученные с использованием методик и формул из литературных источников [3, 4, 6]. В процессе экспериментального исследования были задействованы два конструктивных варианта форсунок для проведения сравнительных испытаний.

В качестве базового образца использовались стандартные щелевые форсунки с классическим круглым сечением сопла (рисунок 1, а). Они представляли собой типовую конструкцию серийных распылителей с постоянным диаметром выходного отверстия и формированием конусообразного факела распыла [1, 4].

Второй вариант форсунки представлял собой эллипсовидную форму наконечника (рисунок 1, б) с инновационной конструкцией распыляющего элемента. Их отличительной особенностью являлось специально разработанное эллипсовидное сечение сопла с оптимизированными геометрическими параметрами. Конструкция также предусматривала возможность регулировки угла распыла и модифицированный формирователь струи [1, 4].



Рисунок 1. Варианты конструктивных форсунок для проведения сравнительных испытаний:

а) плоскоструйная щелевая форсунка; б) эллипсовидная форсунка

Оба типа распылителей были интегрированы в телескопическую штангу экспериментальной установки (рисунок 2) и подключены к единой системе подачи рабочего раствора. При проведении испытаний обеспечивались идентичные условия работы для обоих вариантов: одинаковое давление подачи жидкости, скорость перемещения агрегата, температура и вязкость рабочего раствора [4].



Рисунок 2. Место установки форсунок

Гидравлические расчёты, представленные ниже, выполнены по методикам, описанным в работах [3, 4, 6], и расчётные значения коэффициентов расхода ($\mu_{\text{ш}} = 0,75$ и $\mu_{\text{элп}} = 0,82$) приняты на основе данных этих источников. В рамках исследования выполнена сравнительная оценка гидродинамических характеристик двух типов распылительных устройств – круглого сопла и щелевой форсунки – при идентичном объёмном расходе рабочей жидкости. Целью расчёта являлось определение геометрических параметров обоих типов сопел, обеспечивающих эквивалентный расход $Q = 1,0 \text{ л/мин} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ при рабочем давлении $P = 3 \text{ атм} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$. В качестве модельной жидкости принята вода с плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. При расчётах учтены различия в коэффициентах расхода для щелевой форсунки $\mu_{\text{ш}} = 0,75$, эллипсного сопла $\mu_{\text{кр}} = 0,82$, что обусловлено повышенными гидравлическими потерями на трение в канале щелевого типа [2, 6].

Первый этап – геометрический расчет щелевой плоской форсунки. Задача щелевой форсунки заключается в формировании плоского веерного факела распыла при сохранении заданного объёмного расхода. Ввиду меньшего коэффициента расхода ($\mu_{\text{ш}} = 0,75$) площадь проходного сечения щелевого канала должна быть скорректирована в сторону увеличения по сравнению с круглым соплом.

Требуемая площадь щели определена из уравнения расхода:

$$S_{\text{щель}} = \frac{Q}{\mu \cdot \sqrt{2P/\rho}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-5}}{0,75 \cdot 24,5} = \frac{1,67 \cdot 10^{-5}}{18,375} \approx 0,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (1)$$

Переводим в мм²: $S_{\text{щель}} = 0,91 \text{ мм}^2$.

Для обеспечения технологичности и эксплуатационной надёжности (в частности, предотвращения засорения канала частицами взвеси в жидких удобрениях) высота щели (зазор) была зафиксирована на уровне $h = 0,5 \text{ мм}$. При этом ширина щели b определена как [5]

$$b = \frac{S_{\text{щель}}}{h} = \frac{0,91}{0,5} = 1,82 \text{ мм}. \quad (2)$$

Следовательно, геометрия проходного сечения щелевой форсунки составляет $1,82 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$.

Средняя скорость истечения жидкости через щель составила [6]

$$v_{\text{щ}} = \frac{Q}{S_{\text{щель}}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-5}}{9,1 \cdot 10^{-7}} \approx 18,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3)$$

Скорость жидкости на выходе $\approx 18,4$ м/с (чуть ниже, чем у круга).

Формирование веерного факела с углом раскрытия в диапазоне 80° – 120° достигается за счёт взаимодействия струи с дефлектором, интегрированным в конструкцию форсунки. При этом заданная высота щели $h = 0,5$ мм обеспечивает баланс между требуемой производительностью, качеством распыла и устойчивостью к засорению при работе с суспензионными формами удобрений.

Вторым этапом производим гидродинамический расчет эллипсовидной форсунки [3].

В рамках сравнительного анализа рассмотрена эллипсовидная конфигурация проходного сечения форсунки, функциональная задача которой заключается не в формировании веерного факела, а в интенсификации процесса каплеобразования за счёт развития гидродинамической неустойчивости струи на начальном участке её истечения. В отличие от щелевой форсунки, эллипсовидное сопло призвано оптимизировать качество распыла путём управления структурой потока непосредственно в выходном сечении.

Коэффициент расхода эллипсовидной форсунки принят близким к значению для круглого сопла $\mu_{\text{элл}} = 0,82$, что обусловлено схожей топологией канала и сопоставимым уровнем локальных потерь. Вместе с тем, с учётом эффекта «залипания» струи вдоль большой оси эллипса, приводящего к локальному перераспределению скоростей и увеличению гидравлического сопротивления, расчётная площадь проходного сечения скорректирована путём введения 5 %-го запаса относительно площади эталонного круглого сопла. Таким образом, требуемая площадь эллиптического отверстия составляет

$$S_{\text{элл}} \approx 0,87 \text{ мм}^2.$$

Для обеспечения оптимальных характеристик распыла использовано рекомендованное соотношение полуосей эллипса: отношение большей полуоси к меньшей принято равным 1,25. Обозначим малую полуось как a , тогда большая полуось $b = 1,25a$. Площадь эллипса выражается формулой

$$S = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot a \cdot (1,25a) = 3,93 \cdot a^2. \quad (4)$$

Приравняв расчётную площадь к требуемому значению, получаем

$$3,93 \cdot a^2 = 0,87 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$a^2 = \frac{0,87}{3,93} \approx 0,221 \text{ мм}^2 \\ a \approx 0,47 \text{ мм}.$$

Соответственно, геометрические параметры эллиптического отверстия составляют:

- малая ось (диаметр по малой полуоси): $2a \approx 0,94$ мм;
 - большая ось (диаметр по большой полуоси): $2b = 0,94 \cdot 1,25 \approx 1,18$ мм.
- Таким образом, расчётные размеры эллипсовидной форсунки: $1,18 \text{ мм} \times 0,94$.

Средняя скорость истечения рабочей жидкости через эллиптическое сечение определена из соотношения $v=Q/S$ [2]

$$v_{\text{элл}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-5}}{0,87 \cdot 10^{-6}} = 19,2 \text{ м/с.} \quad (5)$$

Характер течения в эллипсовидной форсунке отличается развитием асимметричных возмущений в струе: из-за неравномерного распределения скоростей по сечению и влияния градиентов давления вдоль большой оси уже на выходе из сопла возникают пульсации, способствующие раннему распаду струи на капли. Данный эффект позволяет интенсифицировать процесс каплеобразования без применения дополнительных конструктивных элементов (например, дефлекторов), что является технологическим преимуществом эллипсовидной геометрии в задачах высокодисперсного распыла.

Полученные данные вносим в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительный результат гидравлических расчетов щелевой и эллипсовидной форсунок

Параметры	Щелевая форсунка	Эллипсовидная форсунка
Расход (Q)	1,0 л/мин	1,0 л/мин
Давление (Р)	3 атм	3 атм
Форма отверстия	прямоугольник (щель)	эллипс
Размеры отверстия	1,82 мм × 0,5 мм	1,18 мм × 0,94 мм
Площадь отверстия	0,910 мм ²	0,870 мм ²
Кэф. расхода (μ)	0,75	0,82
Скорость истечения	~18,4 м/с	~19,5 м/с
Форма факела	плоский веер (80°–120°)	колеблющаяся струя
Размер капель	средние/крупные	мелкие (на 15–20 % мельче)

Особенности геометрического исполнения и расходные характеристики. Ключевое различие в геометрии исследуемых типов форсунок проявляется в требуемой площади проходного сечения для обеспечения идентичного объёмного расхода рабочей жидкости ($Q = 1,0$ л/мин) при рабочем давлении $P = 3$ атм. Вследствие повышенных гидравлических потерь на трение в щелевом канале (обусловленных большей относительной площадью контакта потока со стенками) площадь проходного сечения щелевой форсунки превышает площадь круглого сопла приблизительно на 9 %. Эллипсовидная форсунка по величине требуемой площади занимает промежуточное положение, что объясняется сочетанием относительно высокого коэффициента расхода ($\mu = 0,82$), сопоставимого с круглым соплом, и необходимости компенсации локальных эффектов перераспределения скоростей (в частности, эффекта «залипания» струи вдоль большой оси эллипса).

Скоростные характеристики истечения существенно различаются в зависимости от геометрии сопла и напрямую определяют особенности формирования факела распыла и эксплуатационные свойства форсунок.

Щелевая форсунка характеризуется наименьшей скоростью истечения ($v \approx 18,4$ м/с). Данная особенность имеет важное практическое значение: пониженная кинетическая энергия струи способствует снижению интенсивности образования мелкодисперсной фракции («пылевого облака») и минимизирует эффект сноса (дрейфа) капель под действием ветровых нагрузок. Это делает щелевую форсунку предпочтительным вариантом при внесении гербицидов, где критическим параметром является локализация рабочей жидкости в заданной зоне обработки.

Эллипсовидная форсунка обеспечивает повышенную скорость истечения ($v \approx 19,5$ м/с), близкую к скорости истечения через круглое сопло. Высокая кинетическая энергия потока

в сочетании с асимметрией сечения инициирует развитие гидродинамических неустойчивостей непосредственно на выходе из сопла, что способствует интенсивному распаду струи на капли. Данный механизм позволяет достичь более высокой степени дисперсности распыла без применения дополнительных конструктивных элементов.

Следующим будет оценка объёмного расхода и стабильности дозирования форсунок (таблица 2). Измерение объёмного расхода осуществлялось гравиметрическим/объёмным методом с применением мерных ёмкостей (рисунок 3).

Таблица 2. Расход форсунок

Параметры	Щелевая плоская форсунка	Эллипсовидная форсунка
Замер № 1	1015 мл	998 мл
Замер № 2	1022 мл	1005 мл
Замер № 3	1008 мл	997 мл
Средний расход	1015 мл/мин	1000 мл/мин
Отклонение от номинала (1 л/мин)	+1,5 %	0 %
Стабильность потока	высокая (пульсации почти нет)	средняя (видна слабая вибрация струи)

Результаты показали, что обе форсунки обеспечивают поддержание номинального расхода в пределах допустимой погрешности. При этом зафиксировано незначительное превышение расхода у щелевой форсунки по сравнению с эллипсовидной (рисунок 3). Данный эффект обусловлен большей площадью проходного сечения щелевого канала ($S_{щ} = 0,91 \text{ мм}^2$, геометрия $1,82 \times 0,5 \text{ мм}$) относительно эллипсовидного отверстия ($S_{элл} \approx 0,87 \text{ мм}^2$, размеры $1,18 \times 0,94 \text{ мм}$).



а)



б)

Рисунок 3. Расход жидкости через форсунки в мерной емкости:

а) щелевая форсунка; б) эллипсовидная форсунка

Повышенная стабильность дозирования эллипсовидной форсунки объясняется близостью её коэффициента расхода ($\mu_{элл} = 0,82$) к эталонному значению для круглого отверстия, что обеспечивает более предсказуемую зависимость расхода от давления и снижает чувствительность к малым отклонениям геометрии.

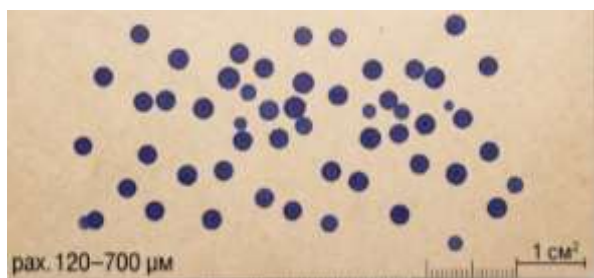
Далее произведем анализ дисперсности распыла и плотности покрытия (таблица 3). Для оценки размеров капель и плотности распределения использовалась методика регистрации следов распыла на водочувствительной бумаге. Распыление производилось с расстояния $L = 50 \text{ см}$ в течение $t = 2 \text{ с}$. После экспозиции выполнялась оптическая микроскопия центральной зоны факела с последующей статистической выборкой $n = 100$ характерных пятен, интерпретируемых как проекции капель.

Таблица 3. Результаты размеров следов распыла форсунок на водочувствительной бумаге

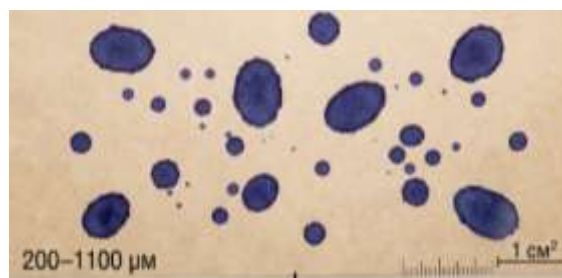
Параметр	Щелевая плоская	Эллипсовидная
Диаметр пятен (визуально)	крупные, овальные	мелкие, округлые
Средний диаметр пятна (измерено лупой)	~650 мкм	~420 мкм
Расчетный средний размер капли (коэф. растекания 1,8)	~360 мкм	~230 мкм
Диапазон размеров (мин/макс)	200–1100 мкм	120–700 мкм
Однородность (полидисперсность)	высокая (много крупных и мелких)	умеренная (преобладают средние и мелкие)
Количество пятен на 1 см ²	~8–10 шт.	~22–25 шт.

Полученные данные свидетельствуют о существенном различии в дисперсности формируемого аэрозоля.

Эллипсовидная форсунка обеспечивает формирование более мелкодисперсного распыла (рисунок 4, а): средний диаметр капель составил $d_{32} \approx 230$ мкм, что в 1,5 раза меньше, чем у щелевой форсунки (рисунок 4, б) ($d_{32} \approx 360$ мкм).



а)



б)

Рисунок 4. Результаты размеров следов распыла форсунок на водочувствительной бумаге:

а) эллипсовидная форсунка; б) щелевая форсунка

Плотность покрытия (количество следов на единицу площади) для эллипсовидной форсунки оказалась приблизительно в 2,52 раза выше по сравнению со щелевой.

Физическое объяснение данного эффекта связано с развитием асимметричных гидродинамических неустойчивостей на выходе из эллипсовидного сопла: неравномерное распределение скоростей по сечению и градиенты давления вдоль большой оси эллипса инициируют пульсации струи, ускоряя её распад на капли меньшего размера.

С агротехнологической точки зрения, повышенная дисперсность эллипсовидной форсунки является определяющим фактором для внекорневой подкормки: капли меньшего диаметра легче проникают в листья растений, при этом повышая эффективность усвоения питательных веществ. Щелевая форсунка, формирующая более крупные капли, характеризуется меньшей склонностью к сносу ветром, однако демонстрирует сниженную эффективность покрытия листовой поверхности.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить существенные различия в характеристиках распыла форсунок различной геометрической конфигурации. Анализ полученных данных показывает, что форма проходного сечения сопла оказывает комплексное влияние на гидродинамические и дисперсионные характеристики потока.

В ходе исследования установлено, что щелевая форсунка с геометрией $1,82 \times 0,5$ мм демонстрирует расход 1015 мл/мин, что на 1,5 % превышает номинальное значение. Эллипсовидная форсунка с размерами $1,18 \times 0,94$ мм показывает практически идеальный расход 1000 мл/мин. При этом площадь проходного сечения щелевой форсунки (0,91 мм²)

на 9 % превышает площадь эллипсовидной (0,87 мм²), что объясняется более низким коэффициентом расхода (0,75 с сравнением 0,82).

Анализ дисперсионных характеристик выявил значительное различие в размерах капель: эллипсовидная форсунка формирует капли со средним диаметром 230 мкм, что на 36 % меньше, чем у щелевой форсунки (360 мкм). Плотность покрытия при этом различается в 2,5 раза: эллипсовидная форсунка обеспечивает 22-25 капель на см², тогда как щелевая – только 8–10 капель на см².

Исследование равномерности распределения показало, что щелевая форсунка формирует более широкий факел с неравномерным распределением жидкости, где периферийные зоны существенно обеднены. Эллипсовидная форсунка демонстрирует более равномерное распределение в меньшей по ширине зоне.

Экспериментально подтверждено, что эллипсовидная форсунка обеспечивает более эффективное каплеобразование благодаря развитию гидродинамических неустойчивостей в струе. Это подтверждается статистическими данными: при одинаковой скорости подачи (3 атм) эллипсовидная форсунка показывает скорость истечения 19,5 м/с, что незначительно выше, чем у щелевой (18,4 м/с).

Заключение. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Геометрическая конфигурация проходного сечения форсунки существенно влияет на характеристики распыла. Щелевая форсунка с размерами 1,82 × 0,5 мм и площадью 0,91 мм² обеспечивает стабильный расход 1015 мл/мин при скорости истечения 18,4 м/с. Эллипсовидная форсунка (1,18 × 0,94 мм, площадь 0,87 мм²) демонстрирует расход 1000 мл/мин и скорость 19,5 м/с.

2. Эллипсовидная форсунка обладает следующими преимуществами: формированием более мелких капель (230 мкм против 360 мкм у щелевой форсунки), повышенной плотностью покрытия (в 2,5 раза выше), более равномерным распределением жидкости по обрабатываемой поверхности, а также оптимальным соотношением скорости истечения и размера капель.

3. Щелевая форсунка характеризуется более широким факелом распыла, сниженной склонностью к сносу капель ветром, стабильной работой при повышенных нагрузках и большей площадью покрытия.

4. Практическая значимость работы заключается в возможности обоснованного выбора типа форсунки под конкретные технологические задачи, оптимизации расхода рабочей жидкости, повышения эффективности внесения удобрений и снижения потерь при обработке.

Список источников

1. Калабушев А. Н. Обзор возможных форсунок для внесения жидких удобрений совместно с посевом // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства : сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 14–15 февраля 2022 года / под научной редакцией Н. П. Ларюшина, О. Н. Кухарева. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2022. С. 43–46. EDN FGIMWR.
2. Лавров В. И., Кирдишев Д. В. Техническое диагностирование топливных форсунок на стендах в ремонтных мастерских // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 5 (57). С. 65–68. EDN WVQLQX.
3. Обоснование и результаты исследований технологии внутривредного внесения жидких органических удобрений / Т. С. Байбулатов, Е. А. Судзеровская, М. Г. Исламов [и др.] // Проблемы развития АПК региона. 2018. № 1 (33). С. 109–113. EDN YTUNDU.
4. Сидоров О. О., Шабалин Р. А. Существующие машины и рабочие органы для внесения жидких удобрений в почву // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства : материалы международной

научно-практической конференции, Йошкар-Ола, 20–21 марта 2025 года. Йошкар-Ола : Марийский государственный университет, 2025. С. 806–810. EDN NEOLDO.

5. Францкевич В. С., Гребенчук П. С., Минченко П. А. Исследование центробежных форсунок шликерного атоизатора // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2022. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tsentrobeznyh-forsunok-shlikernogo-atomizatora> (дата обращения: 27.08.2026).

6. Экспериментальное обоснование параметров форсунки-распылителя для агропромышленного комплекса / Д. М. Юмаев, Г. К. Рембалович, М. Ю. Костенко [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2022. Т. 14, № 4. С. 193–200. DOI: 10.36508/RSATU.2022.10.18.025. EDN TZCHSB.

References

1. Kalabushev AN. Obzor vozmozhnykh forsunok dlya vneseniya zhidkikh udobreniy sovmestno s posevom = Review of possible nozzles for applying liquid fertilizers together with sowing. In: Resursosberegayushchiye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva dlya proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva: sbornik statey VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Resource-saving technologies and technical means for crop and livestock production: collection of articles of the VII international scientific and practical conference. Penza, February 14–15, 2022. Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet; 2022. P. 43–46. EDN FGIMWR. (In Russ.).
2. Lavrov VI, Kirdishchev DV. Technical diagnostics of fuel injectors on benches in repair workshops. Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2016;(5):65–68. EDN WVQLQX. (In Russ.).
3. Baibulatov TS, Sudzerovskaya EA, Islamov MG, et al. Justification and results of research into the technology of intrasoil application of liquid organic fertilizers. Problemy razvitiya APK regiona. 2018;(1):109–113. EDN YTHUDU. (In Russ.).
4. Sidorov OO, Shabalin RA. Sushchestvuyushchiye mashiny i rabochiye organy dlya vneseniya zhidkikh udobreniy v pochvu = Existing machines and working parts for applying liquid fertilizers to the soil. In: Aktual'nyye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Current issues in improving the technology of production and processing of agricultural products: materials of the international scientific and practical conference, Yoshkar-Ola, March 20–21, 2025. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy universitet; 2025. P. 806–810. EDN NEOLDO. (In Russ.).
5. Frantskevich VS, Grebenchuk PS, Minchenko PA. Investigation of centrifugal nozzles of a slurry atomizer. Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova. 2022;(9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tsentrobeznyh-forsunok-shlikernogo-atomizatora>. [Accessed August 27 2026]. (In Russ.).
6. Yumaev DM, Rembalovich GK, Kostenko MYu, et al. Experimental substantiation of the parameters of a spray nozzle for the agro-industrial complex. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva. 2022;14(4):193–200. DOI: 10.36508/RSATU.2022.10.18.025. EDN TZCHSB. (In Russ.).

Информация об авторах

Сидоров Олег Олегович, аспирант кафедры агроинженерии и технологии производства, переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», ул. Машиностроителей, д. 15, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Российская Федерация, 424020
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9829-4368>
e-mail: oleg.sidorov23@yandex.ru

Юнусов Губейдулла Сибятуллович, доктор технических наук, профессор кафедры агроинженерии и технологии производства, переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», ул. Машиностроителей, д. 15, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Российская Федерация, 424020
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2127-6439>
e-mail: 270144@mail.ru

Information about the authors

Sidorov Oleg Olegovich, postgraduate student at the department of Agroengineering and Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Mari State University, 15 Mashinostroiteley Street, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424020, the Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9829-4368>
e-mail: oleg.sidorov23@yandex.ru

Yunusov Gubeidulla Sibyatulloovich, doctor of technical sciences, professor at the department of Agroengineering and Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Mari State University, 15, Mashinostroiteley Street, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424020, the Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2127-6439>
e-mail: 270144@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: the authors declared that there was no conflict of interest

Статья / The article

поступила в редакцию / was received	07.08.2026
одобрена после рецензирования / approved after reviewing	18.08.2026
принята к публикации / accepted for publication	28.08.2026