Оригинальное исследование
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-636373 EDN: SDBAVD

Разработка и оценка опрыскивателя с колёсным приводом для малообеспеченных фермерских хозяйств

М.М. Рахман, Х. Моханта, М.З. Уддин, М.М.Х. Оливер

Сельскохозяйственный университет Бангабандху Шейха Муджибура Рахмана, Сална, Газипур, Бангладеш

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для обработки полей химикатами фермеры применяют ручные ранцевые рычажные опрыскиватели, что требует больших затрат времени, труда и средств. При длительной эксплуатации у оператора возникает ощущение дискомфорта в руках, плечах и пояснице, что влечёт за собой общее состояние утомления. Эту проблему можно решить с помощью ряда механических средств.

Цель — разработка и оценка колёсного ранцевого опрыскивателя, подходящего для обработки пропашных культур.

Методы. Устройство объединяет в себе рычажный опрыскиватель и колёсный механизм, который применяется для передачи мощности с помощью цепного привода со звёздочкой. Эффективность опрыскивателя оценивалась в условиях мастерской, а также в полевых условиях с учётом таких факторов, как расход на форсунке, угол распыления, зона покрытия, ширина захвата штанги и производительность.

Результаты. Авторами разработано устройство для обработки посевов различной высоты, полевая производительность составила 88,46%. Анализ безубыточности показал, что минимальная площадь, которую необходимо обработать до достижения точки безубыточности опрыскивателя, составляет 34,13 га. Стоимость изготовления, составляющая 105,93 долл. США, представляется доступной для малообеспеченных фермерских хозяйств в странах с низким и средним уровнем дохода.

Выводы. Разработанный колёсный опрыскиватель эффективен в полевых условиях, прост в эксплуатации, а также снижает трудоёмкость процесса опрыскивания полей пестицидами.

Ключевые слова: ранцевый опрыскиватель; колёсный привод; высота форсунки; полевые культуры.

Как цитировать:
Рахман М.М., Моханта Х., Уддин М.З., Оливер М.М.Х. Разработка и оценка опрыскивателя с колёсным приводом для малообеспеченных фермерских хозяйств // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 1. С. 57–67. DOI: 10.17816/0321-4443-636373 EDN: SDBAVD

Рукопись получена: 22.09.2024 **Рукопись одобрена:** 11.03.2025 **Опубликована online:** 17.03.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Original Study Article
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-636373 EDN: SDBAVD

Development and evaluation of a wheel-powered sprayer machine for marginal farmers

Md. Mostafizar Rahman, Khokon Mohanta, Md. Zamil Uddin, Md. Moinul Hosain Oliver

Bangabandhu Sheikh Mujibur Rahman Agricultural University, Salna, Gazipur, Bangladesh

ABSTRACT

BACKGROUND: Knapsack-type lever-arm sprayers are manually operated by farmers to apply chemicals in the field, which is time-consuming, labor-intensive, and costly. Prolonged use can cause discomfort in the hands, shoulders, and waist of operators, leading to fatigue. This problem can be affordably overcome by some mechanical maneuvers.

AIM: This research aims to develop and evaluate a wheel-operated, knapsack-type sprayer machine suitable for row crops.

METHODS: The machine integrates a lever-operated sprayer with a wheel-driven mechanism, transferring power via a chain and sprocket system. The sprayer's performance was evaluated in both workshop and field conditions, considering factors such as nozzle discharge, spray angle, coverage area, swath width, and efficiency.

RESULTS: The machine was made to serve at variable heights of crops, and its field efficiency was measured at 88.46%. A break-even analysis indicated 34.13 ha as the minimum acreage that must be sprayed for the sprayer to be profitable. The cost of fabrication (USD 105.93) was found to be affordable by marginal farmers of low- to middle-income countries.

CONCLUSION: The developed wheel-operated sprayer is effective in field conditions, offering improved ease of use and reduced drudgery in pesticide application.

Keywords: backpack sprayer; wheel-powered; nozzle height; field crops.

To cite this article:
Rahman MM, Mohanta Kh, Uddin MZ, Oliver MMH. Development and evaluation of a wheel-powered sprayer machine for marginal farmers. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2025;92(1):57–67. DOI: 10.17816/0321-4443-636373 EDN: SDBAVD

Received: 22.09.2024 **Accepted:** 11.03.2025 **Published online:** 17.03.2025

moscow polytech
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2025
ECO•VECTOR

ОБОСНОВАНИЕ

Эффективность борьбы с насекомыми и вредителями в сельском хозяйстве всё больше зависит от применения механических средств, используемых для опрыскивания полей гербицидами и пестицидами [1]. В последние несколько лет у малообеспеченных фермеров из стран Азии и Африки к югу от Сахары стали набирать популярность ранцевые опрыскиватели [2]. Они произвели революцию в сельскохозяйственной практике и привели к повышению производительности фермерских хозяйств [3] по всему миру.

Опрыскиватели отличаются простотой эксплуатации, не требуют частого технического обслуживания и способны подавать целевые объёмы жидкости [1]. К другим их характеристикам можно отнести равномерность опрыскивания и поддержание необходимого уровня давления благодаря прецизионным форсункам для регулирования потока, которые обеспечивают различные типы распыления (аэрозольное, слабое или интенсивное). Существуют опрыскиватели разных типов, включая модели с ручным, механическим и автоматическим управлением. Управление автоматическими опрыскивателями обеспечивает блок управления, который не требует вмешательства со стороны оператора [4], в то время как для управления механическими опрыскивателями требуется контроль со стороны оператора [5]. Например, в Бангладеш популярны ранцевые, ножные и электрические опрыскиватели. В настоящее время на фермерских хозяйствах Бангладеш используется более двух миллионов опрыскивателей [6]. Ручные ранцевые опрыскиватели с рычажным механизмом являются оптимальным вариантом для фермерских хозяйств. Однако при их эксплуатации у оператора возникает ощущение дискомфорта в руках, плечах и пояснице. Следовательно, повышение качества ранцевого опрыскивания с помощью малозатратной технологии может ещё больше повысить производительность труда в сельском хозяйстве.

Одна из возможных технологий [7, 8] — это рычажный опрыскиватель, соединённый с колёсным приводом, который можно использовать для повышения качества применения ранцевого опрыскивания. Данные устройства также набирают популярность во многих развивающихся странах [9] ввиду простоты эксплуатации по сравнению с обычными опрыскивателями. Традиционные ранцевые опрыскиватели с рычажным приводом требуют значительных физических усилий, что зачастую сопряжено с возникновением у оператора болевых ощущений в руках, плечах и спине. Кроме того, этот метод опрыскивания требует больших затрат времени и финансовых затрат, а также более трудоёмок по сравнению с механизированным опрыскиванием пахотных земель. Опрыскиватели с рычажным приводом на колёсном ходу, напротив, более доступны по цене и просты в эксплуатации в полевых условиях [3]. Рычажные опрыскиватели на колёсном ходу снижают уровень физических усилий, необходимых для ручного управления рычагами, и опрыскиватель становится более удобным в плане перемещения и управления. Колёсный опрыскиватель сокращает время работы, повышает эффективность опрыскивания и снижает уровень утомляемости оператора [7]. В связи с этим мы разработали доступный колёсный опрыскиватель для овощеводов из Бангладеш. В данной аналитической работе представлен подробный анализ этапов проектирования и разработки устройства, а также комплексный анализ его себестоимости.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является разработка и оценка колёсного опрыскивателя, подходящего для обработки пропашных культур в малообеспеченных фермерских хозяйствах в странах с низким и средним уровнем дохода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Компоненты системы

Базовые компоненты колёсного опрыскивателя делятся на две группы: основные и вспомогательные.

1.1 Основные компоненты

Форсунка и опрыскиватель: в опрыскивателе используется 1,5-миллиметровая распылительная форсунка специальной конструкции (рис. 1). Форсунка создаёт струю воды, которая распыляется в диаметре 0,5–2 м в зависимости от заданного давления воды. Опрыскиватель оборудован прямоугольным баком объёмом 20 л (компонент системы 7 на рис. 2) со встроенным поршневым насосом (компонент системы 6 на рис. 2) и несколькими гибкими трубопроводами.

Колесо: в качестве привода для рычажного распылителя используется велосипедное колесо со спицами

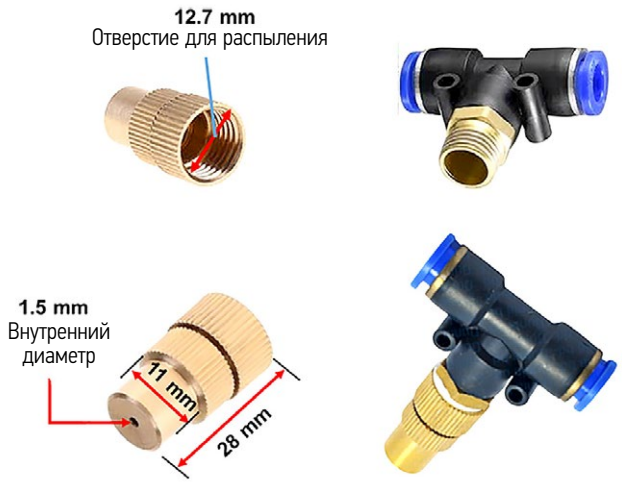


Рис. 1. Распылительная форсунка (с габаритами).
Fig. 1. Spray nozzle and its dimensions.

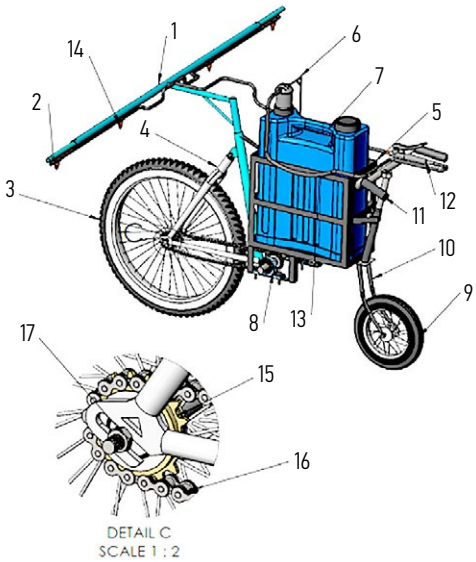
размером 24″ × 1,95″ (компонент системы 3 на рис. 2). Ещё одно небольшое колесо размером 9,6″ × 1,54″ (компонент системы 9 на рис. 2) используется в качестве опоры для опрыскивателя на земле.

1.2 Вспомогательные компоненты

К вспомогательным компонентам исследуемой системы относятся детали велосипеда, подшипники, железные прутки, шланги, болты с гайками, детали для присоединения форсунок и патрубки.

Проектирование и разработка колёсного опрыскивателя

Конструкция колёсного опрыскивателя разработана с помощью программного обеспечения SolidWorks (рис. 2). Основная рама опрыскивателя изготовлена из полосовых и угловых профилей из мягкой стали, сваренных в раму велосипеда (см. рис. 3). Колеса, форсунки, насос ранцевого опрыскивателя и другие комплектующие приобретены на местном рынке. Опрыскиватель размещается внутри изготовленной рамы. Четыре форсунки установлены на заданном расстоянии (0,9 м) друг от друга и подсоединены к системе напорных шлангов. Рычаг на верхней части поршневого насоса соединяется с подшипником (компонент системы 8 на рис. 2) под баком. Данный подшипник соединяется с передним колесом (компонент системы 3 на рис. 2) с помощью цепи. Следовательно, при вращении колеса подшипник сразу же проворачивается и, в свою очередь, перемещает рычаг вверх и вниз, создавая давление в шланге. Сброс давления через форсунки регулируется с помощью клапана сброса давления (компонент системы 12 на рис. 2), который активируется оператором, располагающимся за малым колесом (компонент системы 9 на рис. 2).



№ п/п	Название компонента
1	Штанга опрыскивателя
2	Штанга опрыскивателя с насадкой
3	Ходовое колесо
4	Опорная рама ходового колеса
5	Блок опрыскивателя
6	Кривошипно-рычажный механизм
7	Бак опрыскивателя
8	Подшипник P205

№ п/п	Название компонента
9	Опорное колесо
10	Вилка опорного колеса
11	Руль
12	Клапан сброса давления
13	Шланг
14	Форсунка
15	Звёздочка
16	Цепь
17	Болт с гайкой

Рис. 2. Изометрическое изображение колёсного опрыскивателя.
Fig. 2. Isometric view of the wheel-powered sprayer machine.

Рис. 3. Конструкция колёсного опрыскивателя.
Fig. 3. Development of the wheel-powered sprayer machine.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-636373

Оценка эффективности колёсного опрыскивателя

Оценка эффективности сконструированного опрыскивателя проводилась в мастерской и на опытном поле кафедры сельскохозяйственного машиностроения (рис. 4) Сельскохозяйственного университета Бангабандху Шейха Муджибура Рахмана. При проведении оценки эффективности в мастерской учитывались различные параметры, в т. ч. рабочая скорость, равномерность расхода на форсунках, угол распыления, ширина захвата, перекрытие, зона распыления и необработанная площадь. На опытном поле также проводилась оценка полевой производительности и эффективности (рис. 4).

На основе данных, полученных в ходе испытаний в мастерской и в полевых условиях, проведён анализ следующих параметров.

Скорость движения опрыскивателя. Рабочая скорость *V* опрыскивателя рассчитывалась на основе расстояния *L*, пройдённого устройством за определённое время *t*. Скорость определялась по следующему уравнению (1).

$$V = \frac{L}{t}. \quad (1)$$

Равномерность расхода на форсунках. Мы оценивали расход (мл/с) на каждой форсунке для определения количества распыляемой жидкости и измеряли изменение расхода на каждой форсунке на участке в 10 м по ходу опрыскивателя. Жидкость, распылённая из каждой форсунки, собиралась в полиэтиленовый пакет, а её объем измерялся с помощью измерительной шкалы. Кроме того, для расчёта расхода мы регистрировали время, необходимое для преодоления указанного расстояния. Испытания проводились три раза; для оценки изменения расхода на форсунках рассчитывался коэффициент вариации (CV%). Согласно рекомендации Гомеса и Гомеса [10] вариация менее 10% считалась допустимой. В настоящем исследовании давление поддерживалось на уровне 10 фунтов на квадратный дюйм.

Измерение угла распыления. Угол распыления измерялся на основе величин оптимальной высоты (*Y*) и ширины зоны распыления (*X*) одной форсунки (рис. 5). Угол распыления рассчитывался по уравнению (2).

$$\theta = 2 \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{X}{2 \cdot Y}\right). \quad (2)$$

Измерение площади орошения на разных высотах. Для определения площади орошения опрыскиватель устанавливался на разных высотах. В ходе испытания мы оценивали площадь орошения на высотах установки штанги 0,89, 0,97 и 1,04 м. Площадь орошения на поверхности размечалась белой маркировкой, нанесённой одним движением опрыскивателя.

Оценка в условиях опытного поля

Оценка в условиях мастерской

Рис. 4. Оценка эффективности колёсного опрыскивателя в условиях мастерской и опытного поля.
Fig. 4. Performance evaluation of the wheel-powered sprayer machine in the workshop and research field.

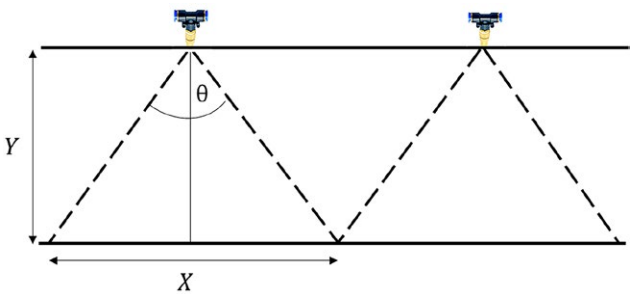


Рис. 5. Измерение угла распыления.
Fig. 5. Measurement of the spraying angle.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-636373

Ширина захвата. Ширина захвата штанги определялась по величине обработанной зоны, покрываемой распыляемыми каплями за один проход форсунки.

Перекрытие распыления. Перекрытие определялось по ширине зоны, обработанной двумя соседними форсунками, разделённой на ширину зоны, обрабатываемой одной форсункой. Данная величина рассчитывалась и выражалась в процентах (рис. 6). Перекрытие в первую очередь влияет на конфигурацию распыления и величину зоны покрытия опрыскивателя, которая также зависит от высоты штанги и расстояния между форсунками. В ходе настоящего исследования форсунки устанавливались на расстоянии 0,9 м друг от друга.

Измерение необработанной площади. Величина необработанной площади $\overline{S}$ рассчитывалась как отношение неорошённой площади $A_{\text{н}}$ к общей площади распыления $A_{\text{р}}$, обработанной опрыскивателем, в процентах. Необработанная площадь рассчитывалась по уравнению (3).

$$\overline{S} = \frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{р}}} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Полевая производительность опрыскивателя.

Теоретическая полевая производительность рассчитывалась по следующей формуле:

$$F_{\text{т}} = \frac{w \cdot S}{C}, \quad (4)$$

где $F_{\text{т}}$ — теоретическая полевая производительность (га/ч); w — ширина зоны орошения штанги (м); C — константа [10].

Фактическая полевая производительность определяет фактическую площадь обработки за единицу времени.

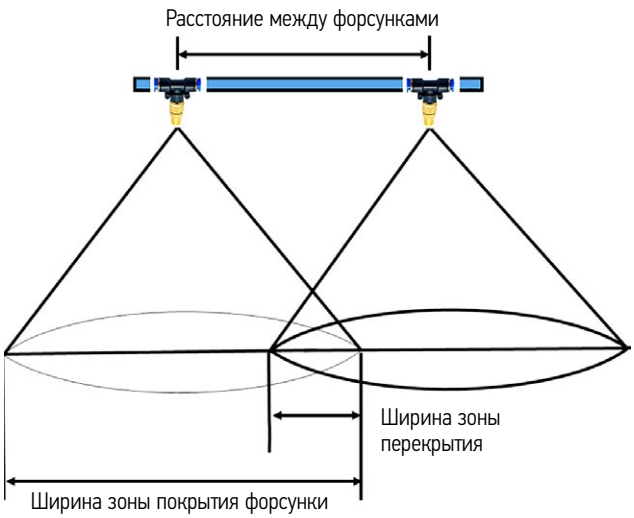


Рис. 6. Перекрытие распыления.
Fig. 6. Spray overlapping.

Фактическая полевая производительность опрыскивателя рассчитывалась по уравнению (5).

$$F_A = \frac{A}{t}, \quad (5)$$

где F_A — фактическая полевая производительность (га/ч); A — общая площадь, обрабатываемая опрыскивателем (га); t — общее время (ч).

Полевая эффективность. Полевая эффективность представляет собой отношение эффективной полевой производительности к теоретической полевой производительности, которое определяется по уравнению (6).

$$E_f = \frac{F_A}{F_{\text{т}}}, \quad (6)$$

где E_f — полевая эффективность (%); F_A — фактическая полевая производительность; $F_{\text{т}}$ —теоретическая полевая производительность.

Анализ себестоимости колёсного опрыскивателя

Расчётная себестоимость колёсного опрыскивателя определена на основе известных цен на материалы и затрат на его изготовление, хотя они могут различаться в зависимости от конъюнктуры местного рынка. При расчёте общей стоимости эксплуатации опрыскивателя (в га/ч) учитывались как постоянные, так и переменные затраты.

Постоянные затраты. Постоянные затраты представляют собой сумму амортизации, процентов на инвестиции и расходов по налогам, страхованию и хранению устройства в закрытом помещении.

1) годовая амортизация и процентные расходы ($ADIC$). Величина $ADIC$ определялась по коэффициенту эффективности капиталовложений ($K_{\text{эк}}$) и расчётной покупной цене $C_{\text{оп}}$ опрыскивателя.

$$ADIC = K_{\text{эк}} \cdot C_{\text{оп}} \quad (7)$$

где $K_{\text{эк}} = \frac{I \cdot (1+I)^n}{(1+I)^n - 1}$; I — процентная ставка; n — срок службы.

2) расходы по налогам, страхованию и хранению устройства в закрытом помещении составляют 1,5% от стоимости опрыскивателя.

Переменные затраты. Переменные затраты зависят от интенсивности эксплуатации опрыскивателя. В данном случае учитывались затраты на ремонт и техническое обслуживание, трудозатраты и затраты на приобретение смазочных материалов:

1) затраты на ремонт и техническое обслуживание определены из расчёта 0,025 долл. США в час;
2) расчётные затраты на приобретение смазочных материалов составили 0,033 долл. США в час;
3) трудозатраты $З_{оп\ ср}$ рассчитывались по коэффициенту равномерных годовых затрат ($EACF$):

$$EACF = \left\{ \frac{(1+r)^n - (1+I)^n}{(1+r) - (1+I)} - \left(\frac{I}{(1+I)^n - 1} \right) \right\}, \quad (8)$$

где r — темпы роста (12–15%), и годовой заработной плате оператора $З_{оп}$:

$$З_{оп\ ср} = EACF \cdot З_{оп} \quad (9)$$

Далее проведен анализ безубыточности опрыскивателя. Под ним понимается количество гектаров, которое необходимо обработать опрыскивателем для покрытия расходов на его использование.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка колёсного опрыскивателя

Средняя скорость опрыскивателя составила 1,44 км/ч, расстояние перемещения — 10 м, время перемещения — 23–26 сек. (см. таблицу 1). Указанная скорость практически аналогична скорости других колёсных шагающих машин других конструкций [9].

Таблица 1. Скорость колёсного опрыскивателя
Table 1. Speed of the wheel-operated sprayer

Расстояние, м	Время, с	Скорость, м/с	Средняя скорость, км/ч
10	23	0,43	
10	26	0,38	1,44
10	25	0,40	

Средние величины расхода на форсунках составили 3,43, 3,58 и 3,74 мл/с (рис. 7), при этом опрыскиватель перемещался с переменной высотой штанги (0,89, 0,97 и 1,04 м) на расстояние 10 м. Расчётный коэффициент вариации определён на основе среднего расхода на форсунке и составил 4,35%, что ниже рекомендуемого диапазона в 10% [10]. Этот результат показывает, что при увеличении высоты штанги меняется распределение давления по форсункам, что может привести к изменению расхода [11].

Изменение угла распыления на разных высотах штанги показано на рис. 8. Средние углы распыления форсунок θ_1 N1, θ_2 N2, θ_3 N3 и θ_4 N4 составили 60,1°, 60,5° и 57,4° при высоте штанги 0,89, 0,97 и 1,04 м, соответственно. Эти результаты показывают, что угол распыления немного уменьшается при увеличении высоты штанги, что подтверждается в научной литературе [12]. По мере увеличения высоты штанги увеличивалась ширина зоны распыления, в результате чего увеличивалась зона покрытия и уменьшался угол распыления. Уменьшение угла распыления связано с увеличением расстояния между форсункой и мишенью, что могло повлиять на размер капель и равномерность их распределения [13–14].

Зона покрытия опрыскивателя во время эксперимента в мастерской показана на рис. 9. Зона покрытия составила 20,84, 23,12 и 25,84 м² при высоте стрелы 0,89, 0,97 и 1,04 м, соответственно. При увеличении высоты штанги

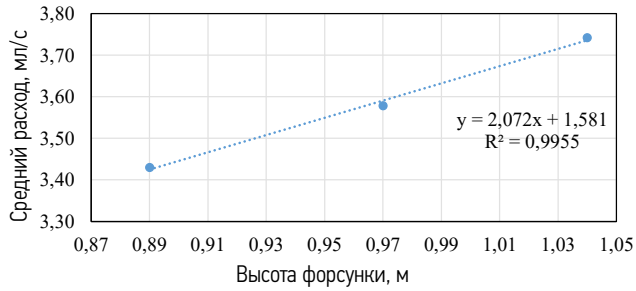


Рис. 7. Изменение расхода в зависимости от высоты штанги.
Fig. 7. Discharge variation with varying boom heights.

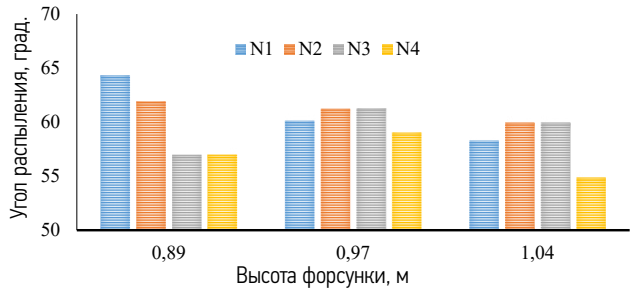


Рис. 8. Изменение угла распыления при разной высоте штанги.
Fig. 8. Spraying angle variation at different boom heights.

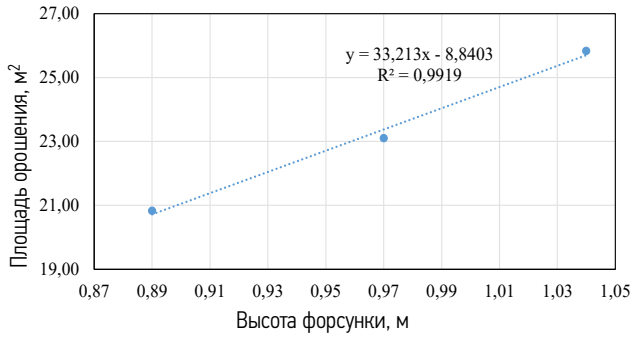


Рис. 9. Изменение зоны покрытия при разной высоте штанги.
Fig. 9. Spraying variation with different boom heights.

увеличивается зона покрытия форсунок опрыскивателя. Этот вывод также согласуется с другими аналогичными публикациями [1], [13].

Ширина захвата определялась исходя из размера площади покрытия распыляемыми каплями за один проход форсунки. В ходе экспериментов наблюдались разные величины ширины захвата форсунок N1, N2, N3 и N4. Как показано на рис. 10, ширина захвата форсунок действительно увеличивалась при увеличении высоты штанги. Это обусловлено в первую очередь большим расстоянием между форсункой и целевой зоной, в результате чего жидкость распылялась по более широкой зоне. На высоте 1,04 м все форсунки обрабатывали большую площадь по сравнению с высотой 0,89 м. Исследования показали, что с увеличением высоты штанги угол распыления может меняться, поэтому ширина захвата обычно увеличивается [15-16].

Обработанные зоны, зоны перекрытия и необработанные зоны (в процентах) при разных высотах штанги показаны на рис. 11. Процент перекрытия составил 49,96%, 58,77% и 62,41% при высоте штанги 0,89, 0,97 и 1,04 м, соответственно. Эти результаты указывают на то, что при увеличении высоты штанги увеличивается процент перекрытия, что может быть полезно для обеспечения равномерного покрытия [1], [13]. Такое перекрытие необходимо для гарантированного внесения в ту или иную зону нужного количества пестицидов или гербицидов и определяется расстоянием между форсунками и высотой штанги [17]. Однако следует отметить, что, хотя при увеличении высоты штанги увеличивается и перекрытие, но также увеличивается риск сноса, что снижает эффективность опрыскивания и сопряжено с проблемами экологической безопасности. В то же время необработанная площадь (в процентах) составила 34,26%, 27,20% и 18,64% при высоте стрелы 0,89, 0,97 и 1,04 м, соответственно. Процент необработанной площади в частности зависит от процента перекрытия и высоты штанги (см. рис. 11).

Для определения полевой производительности и эффективности колёсного опрыскивателя мы провели его испытания на опытном поле размером 10,37 м × 21,95 м (227,6 м², или 0,023 га) (таблица 2). Теоретическая полевая производительность в 0,52 га/ч определена для скорости 1,44 км/ч и ширины зоны

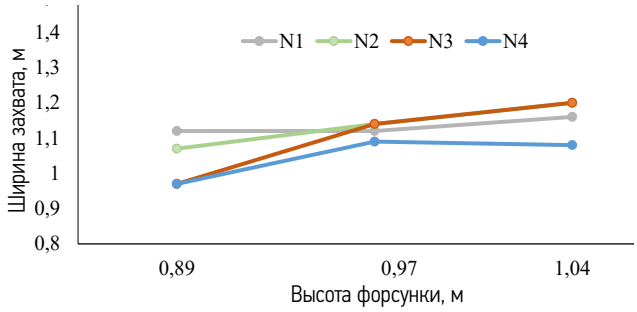


Рис. 10. Изменение ширины захвата при разной высоте штанги.
Fig. 10. Variation of the swath width with different boom heights.

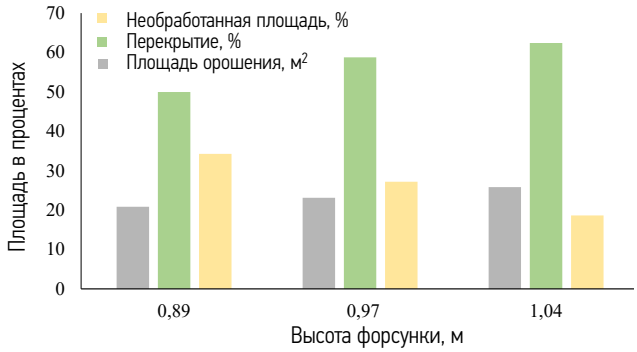


Рис. 11. Необработанная площадь и зоны перекрытия в процентах при разных высотах штанги.
Fig. 11. Percentage of missing and overlap areas at different boom heights.

покрытия опрыскивателя 3,6 м, тогда как эффективная полевая производительность поля составила 0,46 га/ч. Спроектированному колёсному опрыскивателю требуется 2,15 часа для обработки 1,0 га земли, тогда как при использовании ранцевого опрыскивателя потребуется 7,35 часа, так как на обработку 0,02276 га земли с его помощью потребуется 0,167 часа. Эффективность разработанного опрыскивателя в полевых условиях также составила 88,46%, что полностью соответствует результатам, полученным Мулату [8].

Стоимость разработки и эксплуатации колёсного опрыскивателя

Стоимость изготовления опрыскивателя с одним агрегатом составила приблизительно 105,93 долл. США

Таблица 2. Полевая производительность и эффективность колёсного опрыскивателя
Table 2. Field capacity and efficiency of the wheel-operated sprayer

Общая площадь	Общее время	Ширина зоны покрытия, м	Скорость перемещения, км/ч	Теоретическая полевая производительность, га/ч	Эффективная полевая производительность, га/ч	Эффективность, %
227,6 м²	2,95 мин.					
0,02276 га	0,049 часа	3,6	1,44	0,52	0,46	88,46
1,0 га	2,15 часа					

(см. таблицу 3). Она может меняться в зависимости от цены на производственные материалы на местном рынке. Расчётная стоимость эксплуатации опрыскивателя составляет 139,30 долл. США в год (таблица 4). Опрыскиватель достигает точки безубыточности на уровне 34,13 га, тогда как расчётная чистая прибыль от его использования составляет 2,76 долл. США на гектар земли, т. е. фермерское хозяйство будет получать прибыль, если с помощью опрыскивателя обрабатывать минимум 34,13 га земли в год (см. рис. 12).

Таблица 3. Ориентировочная стоимость изготовления опрыскивателя в мастерской

Table 3. Approximate costs for the fabrication of a sprayer machine in the workshop

Элемент	Стоимость, долл. США*
Рама велосипеда, вилка и руль	25,42
Велосипедный обод (27 и 12 дюймов), спицы, шина и подставка	16,95
Велосипедная цепь, звёздочка и корпус с двумя подшипниками	7,63
Труба и уголок ½ и ¾ дюйма из оцинкованной стали	21,19
Бак опрыскивателя объёмом 20 л и клапан сброса давления	15,25
4 распылительные форсунки с соединительным патрубком и шлангом	5,08
Прутки и болты с гайками из мягкой стали	1,69
Стоимость изготовления рамы для крепления штанги и бака опрыскивателя	12,71
Расчётная общая стоимость	105,93

* Один доллар США равен 118 бангладешским такам.

Таблица 4. Общая стоимость эксплуатации колёсного опрыскивателя на гектар земли

Table 4. Total operating cost incurred per hectare for the wheel-powered sprayer machine

Вид затрат	Статья затрат	Стоимость, долл. США*
Постоянные статьи затрат	Расчётная цена покупки, долл. США	105,93
	Срок службы, лет	8
	Процентная ставка, %	10
	Налоги, страхование и хранение устройства в закрытом помещении (бокс), %	1,5
	$K_{эк}$	0,1874
Переменные статьи затрат	Стоимость ремонта и обслуживания, долл. США/ч	0,025
	Расход смазочных материалов, кг/ч	0,0130
	Стоимость смазочных материалов, долл. США/ч	0,033
	Трудозатраты, долл. США/день	5,08
	Средняя продолжительность рабочего времени в год, час/год	120
	$EACF$	1,453
	Полевая производительность, га/ч	0,46
	Годовое покрытие, га/год	55,2
	Расчёт общей стоимости эксплуатации	
Постоянные затраты	$ADIC$	19,86
	Налоги, страхование и хранение устройства в закрытом помещении (бокс)	1,59
	Общая фиксированная стоимость, така/год	21,45
Переменные затраты	Стоимость ремонта и технического обслуживания, долл. США/год	3,05
	Трудозатраты, долл. США/год	110,84
	Стоимость смазочных материалов, долл. США/год	3,96
	Итого переменные затраты, долл. США/год	117,85
	Итого переменные затраты, долл. США/га	2,13
Общая стоимость эксплуатации (= общие постоянные затраты + общие переменные затраты), долл. США/год		139,30
Безубыточная эксплуатация опрыскивателя, га		34,13

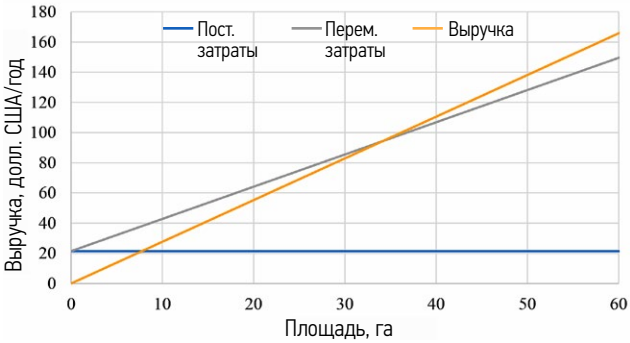


Рис. 12. Анализ безубыточности опрыскивателя.
Fig. 12. Break-even analysis of the sprayer machine.

ВЫВОД

После изготовления колёсного опрыскивателя были проведены его испытания в мастерской и в полевых условиях. Рабочая скорость опрыскивателя составила 1,44 км/ч. Скорость распыления форсунки, зона покрытия опрыскивателя и ширина захвата увеличивались по мере увеличения высоты штанги опрыскивателя, при этом уменьшался угол распыления. Тем не менее, при увеличении высоты штанги также наблюдалось перекрытие зон действия форсунок, а процент необработанной площади зависел как от высоты штанги, так и от степени перекрытия. В ходе полевых испытаний эффективность опрыскивателя составила 88,46%, теоретическая полевая производительность — 0,52 га/ч, эффективная полевая производительность — 0,46 га/ч.

Расчётная стоимость эксплуатации опрыскивателя составила 139,30 долл. США, точка безубыточности — 34,13 га, т. е. для того, чтобы опрыскиватель стал прибыльным, он должен обработать минимум 34,13 га земли. Учитывая доходы малообеспеченных фермерских хозяйств в странах с низким и средним уровнем дохода, это очень доступное устройство с перспективами прибыльности. Данное устройство может обработать 1,0 га всего за 2,15 часа, что сокращает время работы и трудозатраты по сравнению с традиционными ранцевыми опрыскивателями. Хотя в ходе полевых испытаний мы не оценивали конкретные параметры состояния здоровья человека, наши наблюдения показывают, что этот опрыскиватель снижает уровень утомляемости и упрощает процесс выполнения работ при частом применении.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Мухаммад Мустафизар Рахман — идеи, разработка, оценка, написание и редактирование текста аналитической работы; Хокан Моханто — оценка и создание текста аналитической работы; Мухаммад Замиль Уддин — редактирование графиков и таблиц; Мухаммад Моинул Хосейн Оливер — проверка и редактирование текста аналитической работы. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов.

Источники финансирования. Исследование проведено при поддержке отдела управления исследованиями (RMW) Сельскохозяйственного университета Бангабандху Шейха Муджибура Рахмана, Бангладеш.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. Md Mostafizar Rahman — idea generation, development, evaluation, and writing and editing the text of the manuscript; Khokan Mohanto — evaluation and creating the text of the manuscript; Md Zamil Uddin — editing the graphs and tables; Md Moinul Hosain Oliver — review and editing of the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Disclosure of interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest

Funding sources. The research was supported by the Research Management Wing (RMW) of Bangabandhu Sheikh Mujibur Rahman Agricultural University, Bangladesh.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Matthews G, Bateman R, Miller P. *Pesticide application methods.* John Wiley & Sons; 2014.
2. Parnell JR. *Agricultural Sprayers Handbook.* Agriworld Publishing; 2004.
3. Angadi R, Rohit lG, Changond S, et al. Cam operated agrochemical pesticide sprayer. *International journal of engineering research & technology.* 2017;6(1):233–236.
4. Devi KG, SenthilKumar C, Kishore B, et al. Design of Cost Effective Automated and Semi Automated Pesticide Spraying Robot. *Design Engineering.* 2021;9:1723–1737.
5. Kshirsagar S, Dadmal V, Umak P, et al. Design and Development of agriculture sprayer vehicle. *International Journal of Current Engineering and Technology.* 2016;4:405–408.
6. Rahman MM, Ali MR, Oliver MMH, et al. Farm mechanization in Bangladesh: A review of the status, roles, policy, and potentials. *Journal of Agriculture and Food Research.* 2021;6:100225. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100225
7. Panchal RN, Deshmukh N, Shahapure P, et al. Single wheel Operated Pesticide Spraying Machine. *International Engineering Research Journal.* 2016;2(3):889–892.
8. Mulatu Y. Fabrication and performance evaluation of ground wheel operated boom sprayer. *International Journal of Engineering Science.* 2018;6:16–23.
9. Singh S, Padhee D, Sonwani S, et al. Design, Fabrication and Evaluation of Wheel Operated Sprayer. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 2020;9(1):1649–1659. doi: /10.20546/ijcmas.2020.901.182
10. Gomez KA, Gomez AA. *Statistical procedure for agricultural research.* 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York; 1984.

11. Višacki VV, Sedlar AD, Gil E, et al. Effects of sprayer boom height and operating pressure on the spray uniformity and distribution model development. *Applied Engineering in Agriculture.* 2016;32(3):341–346. doi: 10.13031/aea.32.11376

12. Zhu H, Dorner JW, Rowland DL, et al. Spray penetration into peanut canopies with hydraulic nozzle tips. *Biosystems Engineering.* 2004;87(3):275–283. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2003.11.012

13. Nuyttens D, Baetens K, De Schampheleire M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems engineering.* 2007;97(3):333–345. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001

14. Al Heidary M, Douzals JP, Sinfort C, et al. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *Crop protection.* 2014;63:120–130. doi: 10.1016/j.cropro.2014.05.006

15. Samuel A, Mingxiong O, Weidong J, et al. Assessing Nozzle Geometry, Spacing and Height Effect on Pesticide Spray Characteristics and Swath from Ground and Aerial Sprayers. *European Scientific Journal.* 2020;16(30):103–120. doi: 10.19044/esj.2020.v16n30p103

16. Elwakeel AE, Ahmed SF, Zein Eldin AM, et al. Effect of spraying height, pressure, and nozzle type on flow characteristics of a field sprayer. *Al-Azhar Journal of Agricultural Engineering.* 2021;1(1):29–38. doi: 10.21608/azeng.2021.209946

17. Hewitt AJ. Spray drift: impact of requirements to protect the environment. *Crop Protection.* 2008;19(8–10):623–627. doi: 10.1016/S0261-2194(00)00082-X

ОБ АВТОРАХ

*** Рахман Мухаммад Мустафизар,**
канд. наук в сфере природопользования,
профессор кафедры сельскохозяйственного машиностроения;
адрес: Бангладеш, 1706, Газипур, Сална;
ORCID: 0000-0003-4378-2412;
e-mail: mostafizar-age@bsmrau.edu.bd

Моханта Хокон,
магистр в сфере ирригации и управления водными ресурсами,
научный сотрудник кафедры сельскохозяйственного машиностроения;
ORCID: 0009-0009-3501-2101;
e-mail: khokonmohanto@gmail.com

Уддин Мухаммад Замиль,
магистр в сфере ирригации и управления водными ресурсами,
доцент кафедры сельскохозяйственного машиностроения;
ORCID: 0000-0002-5773-3534;
e-mail: zamil@bsmrau.edu.bd

Оливер Мухаммад Мойнул Хосейн,
канд. наук в сфере экологии,
профессор кафедры сельскохозяйственного машиностроения;
ORCID: 0000-0001-6395-7684;
e-mail: oliver@bsmrau.edu.bd

AUTHORS' INFO

*** Md. Mostafizar Rahman,**
PhD (Environmental Resources),
Professor of the Agricultural Engineering Department;
address: Salna, Gazipur, Bangladesh, 1706;
ORCID: 0000-0003-4378-2412;
e-mail: mostafizar-age@bsmrau.edu.bd

Khokon Mohanta,
MS (Irrigation and Water Management),
Research Associate of the Agricultural Engineering Department;
ORCID: 0009-0009-3501-2101;
e-mail: khokonmohanto@gmail.com

Md. Zamil Uddin,
MS (Irrigation and Water Management),
Assistant Professor of the Agricultural Engineering Department;
ORCID: 0000-0002-5773-3534;
e-mail: zamil@bsmrau.edu.bd

Md. Moinul Hosain Oliver,
PhD (Environmental Science),
Professor of the Agricultural Engineering Department;
ORCID: 0000-0001-6395-7684;
e-mail: oliver@bsmrau.edu.bd

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author