

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.348:632.934.1

doi: 10.15507/2658-4123.034.202401.072-087

Оригинальная статья



Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя

И. И. Гуреев¹✉, Б. Н. Нуралин², М. У. Мухтаров²,
О. Н. Костюченкова³

¹ Курский федеральный аграрный научный центр
(г. Курск, Российская Федерация)

² Западно-Казахстанский аграрно-технический
университет имени Жангир хана
(г. Уральск, Республика Казахстан)

³ Казахский агротехнический исследовательский университет
имени Сакена Сейфуллина (г. Астана, Республика Казахстан)

✉ gureev06@mail.ru

Аннотация

Введение. При выращивании высокорослых сельскохозяйственных культур (зерновых на поздних фазах развития, кукурузы, подсолнечника и др.) используют штанговые опрыскиватели, оснащенные двухфакельными распылителями с неизменяемыми углами наклона к вертикали факелов распыла. Рабочая жидкость такими распылителями более интенсивно наносится на набегающую сторону листьев растений, а интенсивность покрытия рабочей жидкостью растений с тыльной стороны снижается. Повысить качество обработки культур штанговыми опрыскивателями позволит усовершенствование их распылителей.

Цель исследования. Экспериментальное определение алгоритма изменения углов наклона факелов распыла двухфакельного распылителя, обеспечивающего одинаковую интенсивность нанесения рабочей жидкости на листья высокорослых растений.

Материалы и методы. Исследования проводили на стенде, нанося подкрашенную воду на набегающую и тыльную стороны макета высокорослого растения, движущегося с задаваемой скоростью. Эксперимент выполняли по методике оптимального планирования. В качестве параметра оптимизации приняли разницу между содержанием следов капель на набегающей и тыльной сторонах макета. Варьируемыми факторами были углы наклона факелов распыла и рабочая скорость опрыскивателя. **Результаты исследования.** Алгоритм изменения оптимальных значений углов наклона факелов распыла в зависимости от скорости опрыскивателя определили, исходя из равенства нулю первой производной параметра оптимизации по значению этих углов.

© Гуреев И. И., Нуралин Б. Н., Мухтаров М. У., Костюченкова О. Н., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. Согласно алгоритму, с увеличением рабочей скорости опрыскивателя с 1,2 до 3,2 м/с оптимальный угол наклона к вертикали переднего факела линейно изменяется от 25 до 21°, а заднего – от 46,7 до 57°. Наличие алгоритма позволит обосновать техническое задание на создание процессора для автоматического управления углами наклона факелов распыла при работе опрыскивателя.

Ключевые слова: высокорослое растение, полевой опрыскиватель, адаптивный распылитель, форсунка, факел распыла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в Курском федеральном аграрном научном центре в рамках государственного задания № FGZU-2022-0005 и в Западно-Казахстанском аграрно-техническом университете имени Жангир хана в рамках плана НИОКР на 2020–2025 гг. «Ресурсосберегающие технологии и технические средства возделывания и уборки сельскохозяйственных культур в условиях Западного Казахстана».

Для цитирования: Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя / И. И. Гуреев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 72–87. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>

Original article

Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer

I. I. Gureev^a ✉, B. N. Nuralin^b, M. U. Mukhtarov^b,
O. N. Kostyuchenkova^c

^a Federal Agricultural Kursk Research Center
(Kursk, Russian Federation)

^b Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University
(Uralsk, Republic of Kazakhstan)

^c S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University
(Astana, Republic of Kazakhstan)

✉ gureev06@mail.ru

Abstract

Introduction. When growing tall-growth crops (cereal crops in late the phases of development, corn, sunflower, etc.), there are used boom sprayers equipped with twin-fluid spray cones with fixed angles of inclination to the vertical of the spray cones. The working fluid is applied with such sprays are more intensively on the front side of the plant leaves while the intensity of covering the plants from the back side with the working fluid decreases. The development of the spray system will allow improving the quality of crop treatment with boom sprayers.

Aim of the Study. The aim of the research is to determine experimentally the algorithm for changing the angles of inclination of a twin-fluid spray cone that provides the same intensity of applying working liquid to the leaves of high-growth plants.

Materials and Methods. The research was carried out on a test bench by applying colored water to the front and rear sides of a tall-growth plant model moving at a specified speed. The experiment was carried out according to the method of optimal planning. The difference between the content of droplets on the front and rear sides of the tall-growth plant model was taken as an optimization parameter. Variable factors were the spray cone inclination angles and the operating speed of the sprayer.

Results. The algorithm for changing the optimum values of the spray cone inclination angles depending on the sprayer speed was determined based on the equality of the first derivative of the optimization to zero parameter by the value of these angles.

Discussion and Conclusion. According to the algorithm, when the sprayer operating speed increases from 1.2 to 3.2 m/s, the optimal angle of inclination to the front spray cone vertical changes linearly from 25 to 21 degrees, and the rear one – from 46.7 to 57 degrees. This algorithm will allow justifying the technical specifications to develop a processor for automatic control of the spray cone inclination angles cones when the sprayer is operating.

Keywords: high-growth plant, field sprayer, adaptive spray system, spray cone

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Funding: The research was carried out in the Federal Agricultural Kursk Research Center under the state assignment No. FGZU-2022-0005 and at the Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University under the R&D plan for 2020–2025 “Resource-saving technologies and technical means of cultivation and harvesting of agricultural crops in Western Kazakhstan”.

For citation: Gureev I.I., Nuralin B.N., Mukhtarov M.U., Kostyuchenkova O.N. Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):72–87. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), ущерб от совокупного воздействия вредных организмов на сельскохозяйственные культуры составляет от 25 до 40 %. Без применения химических средств защиты растений (пестицидов) мировые потери урожая увеличились бы наполовину, а цены на продовольственную продукцию выросли бы в 2–3 раза. В Российской Федерации потенциальные потери урожая от вредных организмов в среднем составляют 25,7 % [1]. Положительные последствия применения пестицидов сказываются и на производимых семенах, которые обладают повышенной энергией прорастания и всхожестью [2]. Поэтому использование пестицидов является перспективным направлением современного мирового и отечественного земледелия [3].

Однако широкий спектр средств химической защиты сельскохозяйственных культур при возможном нарушении регламента использования приводит к загрязнению окружающей среды, что оказывает экотоксикологическое воздействие на живые организмы [4]. Вероятность экологических проблем достаточно велика, так как в производстве продуктов питания применяется более 60 тыс. химических реагентов, в составе которых находится 90 % вредных веществ [5]. Установлено развитие тяжелых респираторных заболеваний у обслуживающего персонала вследствие нарушения регламента использования пестицидов¹ [6].

На вегетирующие растения средства защиты наносят преимущественно с помощью опрыскивания, применяя штанговые опрыскиватели с рабочими органами в виде плоскофакельных распылителей с форсунками, формирующими факелы распыла рабочей жидкости. Задача опрыскивания состоит в нормированном дозировании растворов рабочей жидкости и равномерном распределении ее по

¹ Андреева Д. С. Характеристика рисков при работе с пестицидами // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета : сб. науч. тр. Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2020. № 1. С. 54–58.

поверхности растений. Отклонение от этих требований является причиной перерасхода препаратов, повышения затрат на обработку посевов и негативных последствий воздействия на окружающую среду [7; 8].

Надлежащее исполнение технологического процесса в большей степени зависит от совершенства конструкции распылителей, обеспечивающих соблюдение требуемой равномерности нанесения препаратов на обрабатываемую поверхность и точность дозировок [3; 9]. Ключевой проблемой является ограниченный срок службы распылителей. Их форсунки в процессе работы изнашиваются и подлежат своевременной замене. При использовании изношенных форсунок превышение нормы расхода рабочей жидкости достигает 30–60 % [10].

Цель исследования – экспериментальное определение алгоритма изменения углов наклона к вертикали факелов распыла адаптивного двухфакельного распылителя в зависимости от скорости перемещения опрыскивателя, обеспечивающего одинаковую интенсивность нанесения рабочей жидкости на набегающую и тыльную стороны листьев высокорослых растений по ходу движения опрыскивающего агрегата. Это позволит обосновать техническое задание на создание процессора для автоматического управления углами наклона факелов распыла при работе опрыскивателя.

Обзор литературы

Современные конструкции опрыскивателей оснащают распылителями зарубежного производства (Lechler, Lurmark, Tee Jet, Agrotop, Nozal, Albuz и др.)² [11]. Качество нанесения рабочей жидкости на растения определяется размером капель, образуемых распылителями [12]. Большое значение имеет способность капель противостоять потерям препаратов от неконтролируемого сноса ветром, напрямую зависящего от массы капель рабочей жидкости [13]. Для удовлетворения большинства потребностей при опрыскивании посевов наиболее актуальны компактные плоскофакельные инжекторные распылители поколения IDK, формирующие тяжелые жидкостно-воздушные капли, менее подверженные сносу ветром [14; 15]. При соприкосновении с листьями растений такие капли под действием содержащихся в них пузырьков воздуха дробятся и более равномерно покрывают обрабатываемую поверхность.

Распылители полевых опрыскивателей производят однофакельными и двухфакельными. Качество нанесения рабочей жидкости однофакельными распылителями на растения высокорослых культур (зерновые на поздних фазах развития, кукурузу, подсолнечник и др.) существенно зависит от рабочей скорости опрыскивателя.

В продольно-вертикальной плоскости вектор относительной скорости капель, истекающих из форсунки однофакельного распылителя, направлен вертикально вниз. За счет горизонтальной переносной скорости опрыскивателя вектор абсолютной скорости капель отклоняется от вертикали вперед по ходу движения опрыскивателя и капли более интенсивно осаждаются на растениях с набегающей стороны. Соответственно, степень покрытия каплями тыльной стороны понижается³. С увеличением скорости опрыскивателя разность между интенсивностью

² Тхагапсова А. Р., Маршенов Р. Х., Хажметов Л. М. Анализ способов опрыскивания и типов распылителей // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты : сб. науч. тр. Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. (04–05 февраля 2021 г.). Нальчик : ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. С. 140–143.

³ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель? М. : АМА-ПРЕСС, 2013. 54 с.

нанесения рабочей жидкости на набегающую и тыльную стороны растений возрастает. Следствием этого являются ухудшение качества опрыскивания растений и существенные экономико-экологические издержки [16].

Лучшие показатели качества опрыскивания обеспечивают двухфакельные распылители, оснащенные двумя форсунками, направленными вперед и назад по ходу рабочего перемещения опрыскивающего агрегата. Наклон факелов распыла к вертикали в продольно-вертикальной плоскости может быть симметричным. Например, у распылителей TFA, TFLD, TFS (Италия) для переднего и заднего факелов угол наклона составляет 30° .

Но более эффективными являются двухфакельные распылители с асимметричным расположением факелов распыла. У распылителя TurboDrop[®] немецкого производства передний факел наклонен к вертикали вперед под углом 10° , а задний – назад под углом 50° . При рабочем перемещении опрыскивателя за счет его скорости наклон к вертикали вектора абсолютной скорости капель для передней форсунки возрастает, а для задней – уменьшается. На оптимальной скорости перемещения опрыскивателя эти углы выравниваются, и рабочая жидкость с одинаковой интенсивностью наносится на растения как с набегающей, так и с тыльной стороны⁴. Таким образом, для двухфакельного распылителя существует единственное оптимальное значение рабочей скорости опрыскивателя, соответствующее равномерному распределению рабочей жидкости на листьях высокорослых растений.

Также предложено углы наклона факелов распыла двухфакельной форсунки определять расчетным путем с учетом рабочей скорости опрыскивателя, скорости истечения капель рабочей жидкости из передней и задней форсунок, скорости и направления ветра. Расчетные значения обозначенных параметров рекомендуется откладывать на шкалах измерений и фиксировать [17].

Но в практических условиях наличие переменных уклонов на обрабатываемых полях не позволяет опрыскивающим агрегатам работать с неизменной рабочей скоростью [18]. Кроме того, скорость поступательного перемещения распылителей изменяется по ширине захвата штанги опрыскивателя при перемещении агрегата по криволинейным участкам поля, что также сказывается на качестве нанесения рабочей жидкости на растения⁵ [19]. Следовательно, для каждого значения переменной скорости движения агрегата должны быть свои оптимальные углы наклона к вертикали факелов распыла.

Ручная перенастройка распылителей на оптимальный режим в процессе выполнения полевых работ со средствами защиты растений увеличивает затраты и себестоимость производимой продукции, а самое главное – создает предпосылки угрозы здоровью обслуживающего персонала от возможного непосредственного контакта с ядохимикатами.

Поэтому предложена конструкция адаптивного двухфакельного распылителя, предполагающая автоматически изменяемый поворот факелов распыла в продольно-вертикальной плоскости в зависимости от рабочей скорости опрыскивающего агрегата [20; 21].

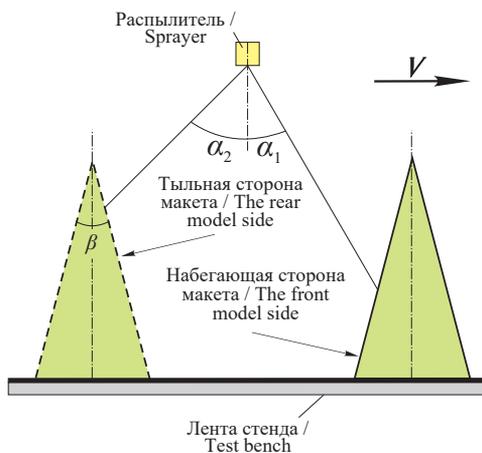
⁴ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель?

⁵ Москвин О. Н. Повышение эффективности процесса опрыскивания регулированием расхода пестицидов // Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе : сб. тр. LVII студен. науч.-практ. конф. Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2022. С. 20–25.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории севооборотов и адаптивных агротехнологий Курского федерального аграрного научного центра на стенде, позволяющем плавно изменять скорость опрыскивания, давление рабочей жидкости в нагнетательной магистрали и наклон осей факелов распыла адаптивного двухфакельного распылителя в продольно-вертикальной плоскости. Использовали опытный образец распылителя в виде блока двух широко распространенных компактных инжекторных плоскофакельных распылителей IDK калибра 03 (синие) со щелевыми форсунками⁶.

При проведении эксперимента на движущуюся с задаваемой скоростью V ленту стенда устанавливали усредненный макет высокорослого растения, фаза развития которого соответствует необходимости обработки пестицидами (рис. 1).



Р и с. 1. Схема стенда для проведения экспериментальных исследований
F i g. 1. Scheme of the test bench for experimental research

Абрис макета в продольно-вертикальной плоскости вписывался в равнобедренный треугольник высотой 0,52 м с углом при вершине $\beta = 19^\circ$. Над лентой на высоте 0,75 м устанавливали опытный образец адаптивного двухфакельного распылителя с возможностью изменения углов наклона к вертикали осей факелов распыла в продольно-вертикальной плоскости.

С набегающей (сплошные линии) и тыльной (штриховые линии) сторон макета крепили сменяемые листы белой бумаги формата А4, на которые распылителем наносили подкрашенную воду. По площади следов капель на бумаге оценивали степень покрытия рабочей жидкостью листьев с набегающей и тыльной сторон растений. Для этого следы капель сканировали и полученные изображения обрабатывали в программе Adobe Photoshop СС, которая отображала информацию по процентному содержанию площади следов капель на обрабатываемом изображении.

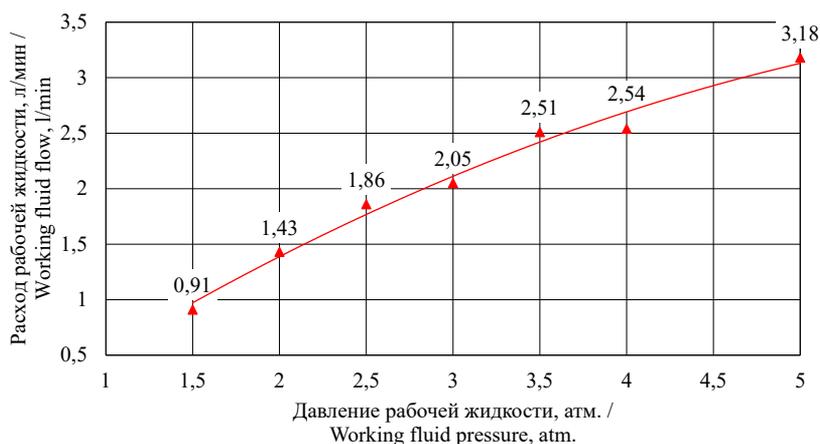
Соотношение между давлением рабочей жидкости и скоростью опрыскивания на всех вариантах испытаний поддерживалось исходя из постоянной дозы внесения

⁶ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель?

рабочей жидкости на уровне $Q = 250$ л/га. Такая доза наиболее распространена при внесении средств защиты растений в производстве сельскохозяйственных культур. Для поддержания постоянного значения Q (л/га) при изменении скорости опрыскивателя V (м/с) расход рабочего раствора через распылитель должен удовлетворять условию⁷:

$$q = 0,003QV, \text{ л/мин.} \quad (1)$$

Расход q изменяли давлением p рабочего раствора в нагнетательной магистрали. Взаимосвязь $q = q(p)$ установили экспериментальным тестированием исследуемого распылителя. Результаты тестирования представлены на рисунке 2.



Р и с. 2. Влияние давления рабочей жидкости на ее расход через распылитель
F i g. 2. The influence of working fluid pressure on its flow through the sprayer

Данные тестирования с достоверностью $R^2 = 0,99$ аппроксимировали уравнением второй степени $q = -0,072p^2 + 1,082p - 0,49$ решение которого относительно p имеет вид:

$$p = 7,51\sqrt{49,6 - 13,9q}, \text{ атм.} \quad (2)$$

В уравнение (2) подставили значение q из условия (1) и получили взаимосвязь давления рабочей жидкости со скоростью перемещения опрыскивателя:

$$p = 7,51\sqrt{49,6 - 10,4V}, \text{ атм.}$$

Эксперимент трехфакторный. Варьируемыми в исследовании факторами выступили углы наклона к вертикали осей факелов распыла распылителя в продольно-вертикальной плоскости: α_1 – переднего; α_2 – заднего. Режимным фактором явилась скорость перемещения V опрыскивателя. В качестве параметра оптимизации использовали разницу ΔY между содержанием площади следов капель на макете с набегающей и тыльной сторон.

⁷ Там же.

Процесс равномерного распределения рабочей жидкости опрыскивателем, перемежающимся по полю, достаточно сложный, и его невозможно описать линейной моделью вследствие ее неадекватности. Поэтому использовали более сложные нелинейные модели. Опытные данные получили по методике полного факторного планирования эксперимента в виде симметричного ортогонального центрально-композиционного плана, позволяющего представить результаты исследований в виде нелинейного уравнения регрессии второго порядка:

$$\Delta Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2, \% \quad (3)$$

где ΔY – параметр оптимизации; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{33}$ – коэффициенты регрессии; X_1, X_2, X_3 – кодированные значения j -х факторов, $j = 1, 2, 3$.

Уровни и интервалы варьирования факторов устанавливали на основании априорной информации. Используя многочленный полином в качестве математической модели, j -е факторы кодировали по формуле:

$$X_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (4)$$

где X_j – кодовое значение фактора; x_j – натуральное текущее значение фактора; x_{j0} – нулевой уровень фактора; Δx_j – интервал варьирования фактора;

$$\Delta x_j = \frac{x_{j\max} - x_{j\min}}{2},$$

где $x_{j\max}, x_{j\min}$ – максимальное и минимальное значение j -го фактора.

Результаты исследования

После кодирования уровни факторов принимают значения -1 и $+1$, а в качестве нулевого уровня выступает центр интервала, в котором проводится эксперимент (табл. 1).

По данному плану выполнено $N = 15$ опытов в двукратной повторности ($r = 2$) (табл. 2).

Таблица 1

Table 1

Уровни и интервалы варьирования факторов
Levels and intervals of factor variation

Факторы / Factors	Обозначения / Designations		Уровни варьирования факторов / Levels of factor variation:				
	Кодовые / Code	Натуральные / Natural	Кодовые / Code				
			-1,215	-1,0	0	+1,0	+1,215
Натуральные / Natural							
Угол наклона переднего факела / Front spray cone inclination angle	X_1	α_1 , град. / α_1 , deg.	0	3	15	27	30
Угол наклона заднего факела / Rear spray cone inclination angle	X_2	α_2 , град. / α_2 , deg.	32	35	50	65	68
Рабочая скорость опрыскивателя / Sprayer operating speed	X_3	V , м/с / V , m/s	1,2	1,4	2,2	3,0	3,2

Таблица 2
Table 2

Матрица полного факторного эксперимента
Matrix of a full factorial experiment

№	Уровни факторов / Factor levels			Площадь следов капель с набегающей стороны макета, % / Area of drop traces on the front side of the model, %				Площадь следов капель с тыльной стороны макета, % / Area of drop traces on the rear side of the model, %				Экспериментальные значения параметра оптимизации $\Delta Y, \%$ / Experimental values of the optimization parameter $\Delta Y, \%$	Дисперсия параллельных опытов, $s^2(\Delta Y) /$ Variance of parallel experiments, $s^2(\Delta Y)$	Расчетные значения параметра оптимизации, $\Delta Y, \%$ / Calculated values of the optimization parameter, $\Delta Y, \%$	$\frac{\Delta Y - \lambda}{\Delta Y}$
	X_1	X_2	X_3	Повторности / Repetition		Среднее / Average		Повторности / Repetition		Среднее / Average					
				1	2	1	2	1	2						
1	-1	1	1	11,9	12,5	12,2	6,8	7,2	7,0	5,2	0,50	5,19	0,00		
2	-1	1	-1	23,0	21,4	22,2	26,0	24,8	25,4	-3,2	3,92	-0,49	7,34		
3	-1	-1	1	13,5	10,5	12,0	9,0	7,8	8,4	3,6	8,82	3,23	0,14		
4	-1	-1	-1	21,1	23,1	22,1	13,7	15,9	14,8	7,3	8,82	8,91	2,59		
5	1	1	1	24,7	25,9	25,3	14,8	12,4	13,6	11,7	0,72	14,37	7,13		
6	1	1	-1	22,5	20,7	21,6	13,4	12,4	12,9	8,7	3,92	8,69	0,00		
7	1	-1	1	21,9	18,9	20,4	16,3	17,7	17,0	3,4	1,28	4,97	2,46		
8	1	-1	-1	26,3	27,9	27,1	16,6	15,6	16,1	11	0,18	10,65	0,12		
9	-1,215	0	0	13,0	11,6	12,3	14	14,8	14,4	-2,1	0,18	-2,02	0,01		
10	+1,215	0	0	21,1	19,3	20,2	15,2	16,2	15,7	4,5	0,32	4,61	0,01		
11	0	-1,215	0	17,2	18,8	18,0	6,4	7,0	6,7	11,3	2,42	11,08	0,05		
12	0	+1,215	0	13,4	16,6	15,0	4,1	4,7	4,4	10,6	7,22	11,08	0,23		
13	0	0	-1,215	20,8	18,4	19,6	17,2	16,6	16,9	2,7	4,50	4,07	1,88		
14	0	0	+1,215	17,2	15,2	16,2	14,3	13,5	13,9	2,3	3,92	4,07	3,13		
15	0	0	0	16,0	17,4	16,7	11,8	12,8	12,3	4,4	2,88	4,07	0,11		
												$s^2(\Delta Y) = 3,31$		25,21	

Для наглядности на рисунке 3 показан вид следов капель с набегающей и тыльной сторон макета (вариант 6, табл. 2).

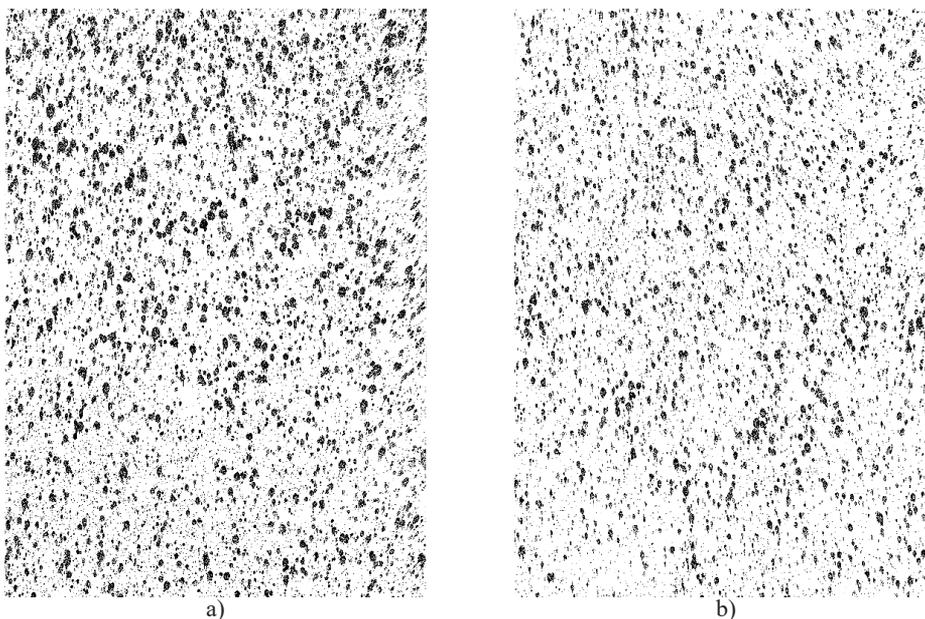


Рис. 3. Следы капель с набегающей (а) и тыльной (б) сторон макета
Fig. 3. Droplets on the front (a) and back (b) sides of the model

Систематические ошибки исключали повторением опытов в случайном порядке.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента составила $s^2(\Delta Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = 3,31$.

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения (3) проводили с помощью t -критерия Стьюдента. Критическое значение его ($t \geq 2,13$) выбирали по таблице⁸ для числа степеней свободы $N(r-1) = 15$ с уровнем значимости 0,05 (табл. 3).

После исключения незначимых коэффициентов получили уравнение регрессии:

$$\Delta Y = 4,07 + 2,73X_1 - 1,86X_1X_2 - 2,84X_2X_3 - 1,88X_1^2 + 4,75X_2^2, \% \quad (5)$$

Уравнение (5) проверили на адекватность, оценивая отклонения предсказываемых расчетных значений параметра оптимизации ΔY от экспериментальных ΔY для каждого из N опытов осуществляемого эксперимента, что позволило определить дисперсию адекватности для равного числа параллельных опытов по формуле:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{r}{N-k} \sum_{i=1}^N (\Delta Y - \overline{\Delta Y})^2 = \frac{2}{15-6} 25,21 = 5,6,$$

где k – число значимых коэффициентов уравнения регрессии, $k = 6$.

⁸ Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие для технических вузов / В. П. Бородюк [и др.]. М. : Высшая школа, 1983. 216 с.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Коэффициенты уравнения регрессии
Regression equation coefficients

Коэффициент / Coefficient	Расчетное значение / Calculated value	Дисперсия / Dispersion	Среднее квадратическое отклонение / Standard deviation	t-критерий Стьюдента / Student's t-test	Значимость коэффициентов / Significance of coefficients
b_0	4,07	1,89	1,37	2,96	значим / significant
b_1	2,73	0,30	0,55	4,97	значим / significant
b_2	0,34	0,30	0,55	-0,62	незначим / insignificant
b_3	-0,04	0,30	0,55	-0,06	незначим / insignificant
b_{12}	-1,86	0,41	0,64	2,90	значим / significant
b_{13}	-1,16	0,41	0,64	-1,81	незначим / insignificant
b_{23}	-2,84	0,41	0,64	4,41	значим / significant
b_{11}	-1,88	0,76	0,87	-2,16	значим / significant
b_{22}	4,75	0,76	0,87	5,44	значим / significant
b_{33}	-1,00	0,76	0,87	-1,15	незначим / insignificant

Адекватность уравнения оценивали с помощью F -критерия, расчетное значение которого:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2(\Delta Y)} = \frac{5,6}{3,31} = 1,69.$$

Табличное значение F -критерия при степенях свободы $f_{ад} = N - k = 9$ и $f_e = N(r - 1) = 15(2 - 1) = 15$ и 95-процентным уровнем значимости составляет $F_{табл} = 2,59$. Гипотеза об адекватности модели принимается, так как $F_p \leq F_{табл}$.

Таким образом, можно судить о соответствии теоретических и экспериментальных значений углов наклона осей форсунок распылителей, то есть уравнение (5) применимо для оптимизации конструктивных и режимных параметров адаптивного двухфакельного распылителя. Используя его, при заданной рабочей скорости X_3 определили оптимальные значения X_1 и X_2 из условия равенства нулю первой производной параметра оптимизации по значению этих углов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta Y}{\partial X_1} &= 2,73 - 1,86X_2 - 3,76X_1 = 0; \\ \frac{\partial \Delta Y}{\partial X_2} &= 1,86X_1 + 2,84X_3 - 9,5X_2 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) имеет вид:

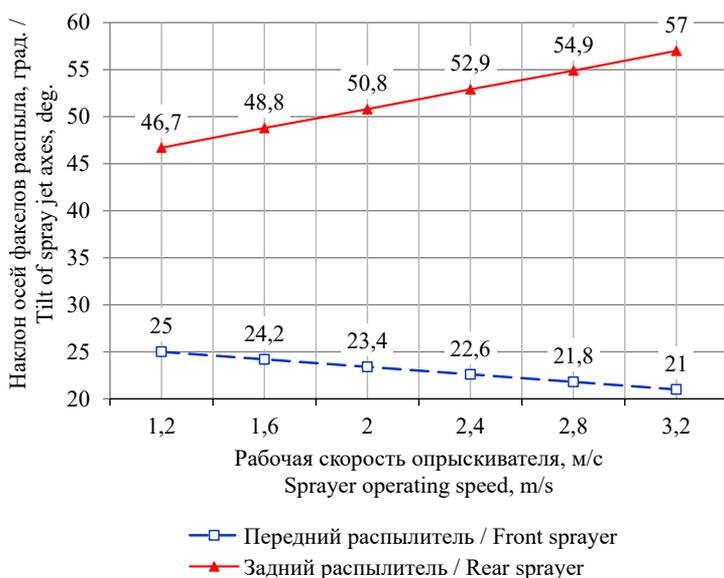
$$\begin{aligned} X_1 &= 0,665 - 0,135X_3; \\ X_2 &= 0,127 + 0,273X_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Обсуждение и заключение

В уравнения (7) подставили соотношения (4) и получили алгоритм изменения оптимальных натуральных значений факторов:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 27,4 - 2,03V, \text{ град.}; \\ \alpha_2 &= 40,6 + 5,12V, \text{ град.}\end{aligned}\quad (8)$$

Линейные взаимосвязи (8), полученные по экспериментальным данным, представлены на рисунке 4.



Р и с. 4. Влияние рабочей скорости опрыскивателя на величину углов наклона к вертикали осей переднего и заднего факелов распыла

F i g. 4. Influence of the sprayer operating speed on the inclination angle of the axes of the front and rear spray cones to the vertical

Из их анализа следует, что с повышением рабочей скорости опрыскивателя оптимальный угол наклона к вертикали оси переднего факела распыла α_1 уменьшается, а заднего α_2 – увеличивается.

Для оценки соответствия экспериментально-расчетных результатов (8) поставленной цели исследований провели дополнительный эксперимент. При скорости опрыскивателя $V = 2$ м/с установили давление рабочей жидкости $p = 2,1$ атм. Углы наклона к вертикали осей факелов распыла определили для заданной скорости по номограмме: $\alpha_1 = 23,4^\circ$; $\alpha_2 = 50,8^\circ$ (рис. 4). После эксперимента в двукратной повторности получили содержание площади следов капель на макете: с набегающей стороны – 19,1 %; с тыльной – 18,3 %. Разница составляет 0,8 % и в относительном измерении не превышает 4,5 %, что дает основание утверждать о достижении поставленной цели исследования.

Экспериментально обоснован алгоритм для оптимизации углов наклона к вертикали осей переднего и заднего факелов распыла адаптивного двухфакельного инжекторного распылителя ИДК калибра 03 при внесении штанговым опрыскивателем 250 л/га рабочей жидкости. Согласно алгоритму, с увеличением рабочей скорости опрыскивателя с 1,2 до 3,2 м/с угол наклона к вертикали переднего факела линейно изменяется от 25 до 21°, а заднего – от 46,7 до 57°. Наличие алгоритма необходимо для подготовки технического задания по созданию процессора для автоматического поддержания оптимальных режимов опрыскивания в процессе выполнения работ по защите растений. Это позволит рационально использовать дорогостоящие химические препараты и снизить затраты на производимую растениеводческую продукцию. Позитивным следствием минимизации использования ресурсов является экологический эффект в виде понижения уровня химического воздействия на здоровье обслуживающего персонала и окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчин И. К., Потапов Р. И., Полтев М. И. Современные тенденции развития производства и применения химических средств защиты растений в Российской Федерации // АгроФорум. 2021. № 6. С. 25–28. EDN: [EIHZSE](#)
2. Influence of Plant Protection Products on Yield and Sowing Qualities of Spring Wheat Seeds / S. Liskovskyi [et al.] // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. № 65. P. 3–9. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-65-1-3-9>
3. Башкирев А. П., Шварц А. А., Шкабенко А. Ю. Анализ работы полевых опрыскивателей // Наука в центральной России. 2019. № 6 (42). С. 50–58. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-50-58>
4. A Critical Review of Effect Modeling for Ecological Risk Assessment of Plant Protection Products / F. Larras [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 43448–43500. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19111-3>
5. Plant Protection Products Residues Assessment in the Organic and Conventional Agricultural Production / V. Bursić [et al.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, Issue 3. Article no. 1075. <https://doi.org/10.3390/su13031075>
6. Changes in Lung Function and Respiratory Symptoms During Pesticide Spraying Season Among Male Sprayers / R. Sapbamrer [et al.] // Archives of Environmental & Occupational Health. 2020. Vol. 75, Issue 2. P. 88–97. <https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1577208>
7. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей / И. С. Крук [и др.] // Агропанорама. 2022. № 5 (153). С. 2–10. URL: <https://ap.bsatu.by/images/files/2022/AgroP-2022-05-int.pdf> (дата обращения: 22.08.2023).
8. Terra F. P., Nascimento G. H. d., Duarte G. A., et al. Autonomous Agricultural Sprayer Using Machine Vision and Nozzle Control / F. P. Terra [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2021. Vol. 102, Issue 2. С. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01361-x>
9. Shahrooz M., Talaeizadeh A., Alasty A. Agricultural Spraying Drones: Advantages and Disadvantages // 2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences (OMICAS). (23–27 November 2020). Bogota, 2020. <https://doi.org/10.1109/OMICAS52284.2020.9535527>
10. Разработка конструкции щелевого сельскохозяйственного распылителя и исследование его выходных параметров / В. Э Славкина [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 34–37. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
11. Оценка технологических и технических характеристик распылителей опрыскивателей / А. Б. Барагунов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 7 (133). <https://>

doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62

12. Slavkina V. E., Goncharova Y. A. Types of Droplet Size Tests on Sprayers // Science in the Modern Information Society : Materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference. Bengaluru, 2023. P. 95–100. EDN: [QKTLWX](https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62)

13. Потемкин Р. А., Свиридов А. С. Особенности испытаний распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // Технический сервис машин. 2020. № 4 (141). С. 47–53. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-47-53>

14. Свиридов А. С., Катаев Ю. В., Загоруйко М. Г. Анализ типов распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // Аграрный научный журнал. 2021. № 6. С. 96–100. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>

15. Park S., Park K. Principles and Droplet Size Distributions of Various Spraying Methods: A Review // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. Vol. 36, Issue 8. P. 4033–4041. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0724-3>

16. Techno-Economic Impacts of Using a Laser-Guided Variable-Rate Spraying System to Retrofit Conventional Constant-Rate Sprayers / A. Manandhar [et al.] // Precision Agriculture. 2020. Vol. 21, Issue 5. P. 1156–1171. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09712-8>

17. Способ изменения угла наклона факелов распыла форсунок сельскохозяйственного опрыскивателя при его перемещении по полю : патент 2780840 Российская Федерация / Башкирев А. П., Шкабенко А. Ю. № 2021102413 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 04.10.2022. 7 с.

18. Patil S. S., Patil Y. M., Patil S. B. Review on Automatic Variable-Rate Spraying Systems Based on Orchard Canopy Characterization // Informatics and Automation. 2023. Vol. 22, Issue 1. P. 57–86. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.3>

19. Fabula J. V., Sharda A., Mishler B. Quantification of Self-Propelled Sprayers Turn Compensation Feature Utilization and Advantages During On-Farm Applications // Precision Agriculture. 2022. Vol. 23, Issue 5. P. 1675–1687. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09903-5>

20. Распылитель сельскохозяйственного опрыскивателя : патент 2416466 Российская Федерация / Гуреев И. И. № 2008146305/12 ; заявл. 24.11.2008 ; опубл. 27.05.2010. 6 с.

21. Распылитель сельскохозяйственного опрыскивателя : патент KZ 7614 Республика Казахстан / Мухтаров М. У. [и др.]. № 2022/0880.2 ; заявл. 12.10.2022 ; опубл. 25.11.2022.

Поступила в редакцию 22.09.2023; поступила после рецензирования 08.10.2023; принята к публикации 23.10.2023

Об авторах:

Гуреев Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, заведующий лабораторией Курского федерального аграрного научного центра (305021, Российская Федерация, г. Курск, ул. К. Маркса, 70Б), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

Нуралин Бекет Нургалиевич, доктор технических наук, профессор, профессор Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0507-5445>, bnuralin@mail.ru

Мухтаров Мурат Утембекович, докторант Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5910-6811>, murat.utembek@mail.ru

Костюченкова Оксана Николаевна, кандидат технических наук, доктор философии, старший преподаватель кафедры транспортной техники и технологии Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина (010011, Республика Казахстан, Астана, пр-т Женис, 62), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2060-7083>, oxy_uno@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

И. И. Гуреев – научное руководство, теоретическое обоснование эксперимента.

Б. Н. Нуралин – научное руководство, разработка программы и методики исследования.

М. У. Мухтаров – получение экспериментальных данных.
О. Н. Костюченкова – обзор литературы, статистическая обработка экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kolchin I.K., Potapov R.I., Poltev M.I. [Modern Trends in the Development of Production and Use of Chemical Plant Protection Products in the Russian Federation]. *AgroForum*. 2021;(6):25–28. (In Russ.) EDN: EIHZSE
2. Liskovskyi S., Demydov O., Siroshtan A., Kavunets V., Zaima O., Shevchenko T. Influence of Plant Protection Products on Yield and Sowing Qualities of Spring Wheat Seeds. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;(65):3–9. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-65-1-3-9>
3. Bashkirev A.P., Shvarts A.A., Shkabenko A.Yu. Analysis of the Work of Field Sprayers. *Science in Central Russia*. 2019;(6):50–58. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-50-58>
4. Larras F., Charles S., Chaumot A., Pelosi C., Le Gall M., Mamy L., et al. A Critical Review of Effect Modeling for Ecological Risk Assessment of Plant Protection Products. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:43448–43500. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19111-3>
5. Bursić V., Stojanović T., Petrović A., Marinković D., Konstantinović B., Vuković G., et al. Plant Protection Products Residues Assessment in the Organic and Conventional Agricultural Production. *Sustainability*. 2021;13(3):1075. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/su13031075>
6. Sapbamrer R., Thongtip S., Khacha-ananda S., Wunnapuk K., Sittitoon N. Changes in Lung Function and Respiratory Symptoms During Pesticide Spraying Season Among Male Sprayers. *Archives of Environmental & Occupational Health*. 2020;75(2):88–97. <https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1577208>
7. Kruk I.S., Gordeenko O.V., Karpovich S.K., Soroka S.V., Markevich A.E. [Directions for Increasing the Efficiency of Using Field Boom Sprayers]. *Agropanorama*. 2022;(5):2–10. Available at: <https://ap.bsatu.by/images/files/2022/AgroP-2022-05-int.pdf> (accessed 22.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Terra F.P., Nascimento G.H.d., Duarte G.A., Drews-Jr P.L.J. Autonomous Agricultural Sprayer Using Machine Vision and Nozzle Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021;102(2):1–18. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01361-x>
9. Shahrooz M., Talaeizadeh A., Alasty A. Agricultural Spraying Drones: Advantages and Disadvantages. In: 2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences (OMICAS). Bogota, 2020. <https://doi.org/10.1109/OMICAS52284.2020.9535527>
10. Slavkina V.E., Sviridov A.S., Arumugam G., Goncharova Yu.A., Kasimov R.M. Developing the Design of a Slotted Agricultural Sprayer and Studying of Its Output Parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(4):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
11. Baragunov A.B., Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Fiapshev A.G. An Evaluation of Technological and Technical Characteristics of Sprayer Atomizers. *International Research Journal*. 2023;(7). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62>
12. Slavkina V.E., Goncharova Y.A. Types of Droplet Size Tests on Sprayers. In: Science in the Modern Information Society. Materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference. Bengaluru, 2023. P. 95–100. EDN: QKTLWX
13. Potemkin R.A., Sviridov A.S. Features of Testing Sprayers for Agricultural Machines. *Machinery Technical Service*. 2020;(4):47–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-47-53>
14. Sviridov A.S., Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G. Analysis of the Types of Agricultural Sprayers' Nozzles. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;(6):96–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>
15. Park S., Park K. Principles and Droplet Size Distributions of Various Spraying Methods: A Review. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022;36(8):4033–4041. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0724-3>



16. Manandhar A., Zhu H., Ozkan E., Shah A. Techno-Economic Impacts of Using a Laser-Guided Variable-Rate Spraying System to Retrofit Conventional Constant-Rate Sprayers. *Precision Agriculture*. 2020;21(5):1156–1171. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09712-8>
17. Bashkirev A.P., Shkabenko A.Yu. [Method for Changing Angle of Inclination of Spray Torches of Nozzles of Agricultural Sprayer, When It is Moved Across Field]. Patent 2,780,840 Russian Federation. 2022 October 4. 7 p. (In Russ.)
18. Patil S.S., Patil Y.M., Patil S.B. Review on Automatic Variable-Rate Spraying Systems Based on Orchard Canopy Characterization. *Informatics and Automation*. 2023;22(1):57–86. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.3>
19. Fabula J.V., Sharda A., Mishler B. Quantification of Self-Propelled Sprayers Turn Compensation Feature Utilization and Advantages During On-Farm Applications. *Precision Agriculture*. 2022;23(5):1675–1687. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09903-5>
20. Gureev I.I. [Sprayer of Agricultural Sprinkler]. Patent 2,416,466 Russian Federation. 2010 May 27. 6 p. (In Russ.)
21. Mukhtarov M.U., Nuralin B.N., Gureev I.I., Shadyarov T.M., Nuralin A.Zh., Okas K. [Atomizer of Agricultural Sprayer]. Patent KZ 7,614 Republic of Kazakhstan. 2022 November 25.

Submitted 22.09.2023; revised 08.10.2023; accepted 23.10.2023

About the authors:

Ivan I. Gureev, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Head of the Laboratory of the Federal Agricultural Kursk Research Center (70B Karl Marx St., Kursk 305021, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

Beket N. Nuralin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0507-5445>, bnuralin@mail.ru

Murat U. Mukhtarov, Doctoral Student of Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5910-6811>, murat.utembek@mail.ru

Oksana N. Kostyuchenkova, Cand.Sci. (Engr.), PhD, Senior Lecturer of the Chair of Transport Engineering and Technology of the S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University (62 Zhenis Avenue, Astana 010011, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2060-7083>, oxy_uno@mail.ru

Authors contribution:

I. I. Gureev – scientific guidance, theoretical justification of the experiment.

B. N. Nuralin – scientific guidance, development of research program and methodology.

M. U. Mukhtarov – obtaining experimental data.

O. N. Kostyuchenkova – literature review, statistical processing of experimental data.

All authors have read and approved the final manuscript.