

ОБОСНОВАНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ СКАТНОЙ ПЛАСТИНЫ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ПОДКОРНЕВОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

© 2026 Валиев А. Р. ✉, Хазиев А. А., Сабиров Р. Ф., Гайнутдинов Б. И.

*Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ ayratvaliev@mail.ru*

Реферат. Повышение эффективности использования минеральных удобрений является одной из важнейших задач современного земледелия. Одним из перспективных направлений совершенствования технологий внесения удобрений является их локальное подкорневое размещение с формированием расширенной зоны питания растений. Эффективность такого способа во многом определяется равномерностью распределения гранул удобрений в почвенном слое, которая зависит от конструктивных параметров распределяющих элементов рабочего органа. Цель исследования – обоснование рационального радиуса кривизны скатной пластины рабочего органа для подкорневого внесения минеральных удобрений. Теоретические исследования выполнены на основе анализа движения гранул по криволинейной поверхности с учётом действия центробежных сил и условий сохранения контакта гранул с рабочей поверхностью. Для уточнения влияния радиуса кривизны на характер распределения гранул проведено численное моделирование методом дискретных элементов в программном комплексе Rocky DEM. Установлено, что радиус кривизны скатной пластины оказывает определяющее влияние на формирование полосовой зоны размещения удобрений. Наиболее равномерное распределение гранул обеспечивается при радиусе кривизны 20 мм, при котором коэффициент равномерности распределения достигает значения 0,92. Уменьшение или увеличение радиуса относительно рационального значения приводит к ухудшению равномерности распределения и локализации гранул в отдельных участках борозды. Результаты могут быть использованы при проектировании рабочих органов для локального внесения гранулированных минеральных удобрений.

Ключевые слова: минеральные удобрения, подкорневое внесение, рабочий орган, скатная пластина, радиус кривизны, распределение гранул, Rocky DEM, коэффициент равномерности.

Для цитирования: Обоснование радиуса кривизны скатной пластины рабочего органа для подкорневого внесения минеральных удобрений / А.Р. Валиев, А.А. Хазиев, Р.Ф. Сабиров, Б.И. Гайнутдинов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 2(82). С. 71-78. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-71-78

JUSTIFICATION OF CURVATURE RADIUS OF DEFLECTOR PLATE OF A WORKING UNIT FOR SUBSURFACE APPLICATION OF MINERAL FERTILIZERS

© 2026 Valiev A. R. ✉, Khaziev A. A., Sabirov R. F., Gaynutdinov B. I.

*Kazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)
✉ ayratvaliev@mail.ru*

Abstract. Improvement of mineral fertilizer use efficiency is one of the most important challenges in modern crop production. One promising approach for improving fertilizer application technologies is their localized subsurface placement, creating an expanded plant nutrition zone. The effectiveness of this method is largely determined by the uniformity of fertilizer granule distribution in the soil layer, which depends on the design parameters of the spreading elements of the working unit. The aim of the study is to justify the rational curvature radius of deflector plate of a working unit for subsurface application of mineral fertilizers. Theoretical studies were conducted based on an analysis of granule movement along a curved surface, taking into account the action of centrifugal forces and conditions for maintaining granule contact with the working surface. Numerical simulation was carried out using Discrete Element Method in Rocky DEM software package in order to clarify the influence of curvature radius on granule distribution pattern. It was found that curvature radius of deflector plate has a significant influence on the formation of strip fertilizer placement zone. The most uniform granule distribution is achieved with a curvature radius of 20 mm, at which the distribution uniformity coefficient reaches 0.92. Decreasing or increasing the radius relative to the optimal value leads to deterioration of distribution uniformity and localization of granules in certain sections of the furrow. The results can be used in the design of working units for localized subsurface application of granular mineral fertilizers.

Key words: mineral fertilizers, subsurface application, working unit, deflector plate, curvature radius, granule distribution, Rocky DEM, coefficient of uniformity.

For citation: Valiev AR, Khaziev AA, Sabirov RF, Gaynutdinov BI. [Justification of curvature radius of deflector plate of a working unit for subsurface application of mineral fertilizers]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 2(82). 71-78 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-71-78

Введение. Одним из основных факторов повышения урожайности сельскохозяйственных культур является рациональное применение минеральных удобрений. При традиционных способах внесения значительная часть питательных веществ используется растениями не полностью, вследствие неравномерного распределения в почве, вымывания в нижние горизонты и перехода элементов питания в труднодоступные формы [1, 2, 3].

Перспективным направлением повышения эффективности использования удобрений является их локальное размещение непосредственно в зоне развития корневой системы растений. Такой способ позволяет концентрировать элементы питания в наиболее активной части корнеобитаемого слоя, снижать потери удобрений и повышать коэффициент их использования растениями [4, 5, 6].

Для реализации технологии локального подкорневого внесения разработан рабочий орган, обеспечивающий формирование борозды и распределение гранул минеральных удобрений по её ширине посредством специальной скатной пластины. В отличие от традиционного ленточного внесения, предлагаемая конструкция формирует расширенную полосовую зону размещения удобрений, более полно соответствующую характеру развития мочковатой корневой системы зерновых культур [7].

Характер распределения гранул удобрений в значительной степени определяется геометрией скатной пластины. Одним из основных

параметров является радиус её кривизны. При недостаточном радиусе происходит резкое изменение траектории движения гранул, что приводит к их концентрации в отдельных участках борозды. Чрезмерное увеличение радиуса, напротив, снижает интенсивность поперечного перераспределения частиц и приводит к ухудшению равномерности размещения удобрений.

В связи с этим возникает необходимость теоретического и численного обоснования рационального значения радиуса кривизны скатной пластины, обеспечивающего наиболее равномерное распределение гранул минеральных удобрений по ширине формируемой зоны размещения.

Цель исследования – обосновать рациональный радиус кривизны скатной пластины рабочего органа для подкорневого внесения минеральных удобрений на основе теоретического анализа движения гранул и результатов численного моделирования методом дискретных элементов.

Условия, материалы и методы. Объектом исследования являлся разработанный рабочий орган для подкорневого внесения гранулированных минеральных удобрений (рис. 1), предназначенный для формирования расширенной полосовой зоны размещения удобрений в почве. Конструктивной особенностью рабочего органа является наличие скатной пластины криволинейной формы, обеспечивающей поперечное перераспределение гранул удобрений по ширине формируемой борозды.

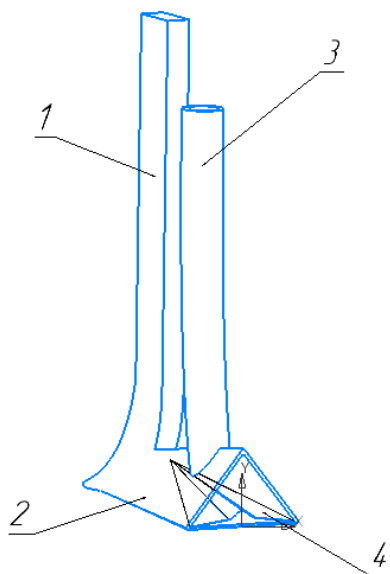


Рис. 1 – Конструкция рабочего органа для подкорневого внесения минеральных удобрений

1 – стойка; 2 – лоток; 3 – тукопровод, 4 – скатная пластина

Fig. 1 – Design of the working tool for sub-root application of mineral fertilizers:

1 – shank; 2 – tray; 3 – fertilizer duct; 4 – chute plate

Технологический процесс работы заключается в следующем. При движении агрегата рабочий орган формирует борозду заданной глубины, после чего поток гранулированных удобрений поступает на скатную пластину (4) через тукопровод (3). Под действием силы тяжести, инерционных сил и контактных взаимодействий с рабочей поверхностью гранулы изменяют направление движения и распределяются по ширине борозды, формируя расширенную зону размещения удобрений.

Для обоснования рационального радиуса кривизны скатной пластины выполнены теоретические исследования движения гранулы по криволинейной поверхности и численное моделирование методом дискретных элементов (DEM) [8, 9, 10].

Теоретический анализ основан на рассмотрении движения отдельной гранулы удобрения по поверхности скатной пластины радиуса кривизны R . При движении по криволинейной траектории на гранулу действуют сила тяжести, нормальная реакция поверхности, сила трения и центробежная сила инерции.

Условием сохранения контакта гранулы с поверхностью является положительное значение нормальной реакции:

$$N = mg \cos \theta - m \frac{v^2}{R},$$

Где m – масса гранулы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; v – скорость движения гранулы по поверхности пластины, м/с; R – радиус кривизны скатной пластины, м; θ – угол наклона касательной к поверхности в рассматриваемой точке.

Из условия $N > 0$ получаем:

$$R > \frac{v^2}{g \cos \theta},$$

Полученное условие определяет нижнюю границу допустимых значений радиуса кривизны скатной пластины, при которых сохраняется контакт гранулы с рабочей поверхностью в процессе её движения. Следовательно, радиус кривизны не может быть произвольно уменьшен, поскольку это приводит к увеличению центробежной составляющей и повышает вероятность нарушения устойчивого движения гранул. В результате происходит нарушение управляемости движения частиц и ухудшается равномерность распределения удобрений.

Для уточнения влияния радиуса кривизны на характер движения гранул использован метод дискретных элементов в программном комплексе Rocky DEM. Данный метод позволяет моделировать взаимодействие большого количества отдельных частиц и учитывать процессы столкновений между гранулами и рабочими поверхностями [8].

В качестве исследуемого материала приняты гранулы азотосодержащего материала со средними физико-механическими характеристиками, соответствующими реальным условиям эксплуатации

туковсевающих аппаратов. Параметры почвенной среды соответствовали серым лесным среднесуглинистым почвам с плотностью 1200 кг/м³. Контактное взаимодействие частиц описывалось моделью Герца–Миндлина с учётом адгезионного взаимодействия JKR [8, 10].

Численный эксперимент выполнялся по двухфакторной схеме. В качестве варьируемых факторов были приняты:

- радиус кривизны скатной пластины $R = 10; 15; 20; 25; 30$ мм;

- норма внесения минеральных удобрений $Q = 100; 160; 220$ шт.

Критерием оценки эффективности распределения служил коэффициент равномерности распределения гранул K .

Для каждого сочетания исследуемых факторов выполнялся один расчётный прогон модели. Поскольку моделирование осуществлялось при фиксированных входных параметрах и детерминированных условиях расчёта, полученные результаты использовались для сравнительной оценки влияния радиуса кривизны скатной пластины на коэффициент равномерности распределения гранул. Статистическая обработка повторностей в рамках данного исследования не проводилась.

На основании результатов моделирования выполнена статистическая обработка данных и получены регрессионные зависимости, характеризующие влияние радиуса кривизны скатной пластины на коэффициент равномерности распределения гранул минеральных удобрений.

Результаты и обсуждение. Для оценки влияния радиуса кривизны скатной пластины на характер распределения минеральных удобрений проведено численное моделирование процесса движения гранул в программном комплексе Rocky DEM. В ходе исследований анализировались траектории движения частиц, ширина зоны их размещения и коэффициент равномерности распределения.

Для количественной оценки равномерности распределения гранул минеральных удобрений использовался коэффициент равномерности распределения K , рассчитываемый по процентному содержанию гранул в отдельных лотках измерительного устройства. Использование данного показателя позволяет перейти от дискретного распределения частиц по лоткам к обобщённой характеристике процесса распределения, пригодной для статистической обработки и регрессионного анализа.

Коэффициент равномерности распределения определяли по выражению:

$$K = 1 - \frac{\sum |p_i - p_{cp}|}{2 \sum p_i},$$

где p_i – доля гранул, попавших в i -й лоток; p_{cp} – среднее значение (20 % для 5 лотков).

Значение коэффициента равномерности изменяется в пределах от 0 до 1. При $K = 1$ распределение удобрений является полностью равномерным. Снижение значения

коэффициента свидетельствует об увеличении неравномерности распределения гранул по ширине борозды. Данный показатель позволяет объективно оценить влияние конструктивных параметров рабочего органа на качество формирования зоны размещения минеральных удобрений.

Для расчёта коэффициента равномерности абсолютное количество гранул, зарегистрированных в каждом лотке, предварительно переводилось в процентную долю от общего числа гранул, попавших в измерительное устройство. Таким образом, коэффициент K характеризует степень отклонения фактического распределения гранул от теоретически равномерного распределения, при котором на каждый

из пяти лотков приходится по 20% частиц.

В таблице 1 представлены средние значения количества гранул, зарегистрированных в каждом лотке по результатам трёх повторностей численного моделирования. Коэффициент равномерности распределения рассчитывали не по абсолютному количеству гранул, приведённому в таблице, а после предварительного перевода этих значений в относительные величины (% от общего числа гранул, поступивших в измерительное устройство). Поэтому сумма значений по лоткам в таблице соответствует количеству гранул, использованных при моделировании, а при расчёте коэффициента K сумма относительных значений составляла 100%.

Таблица 1 – Среднее количество гранул, зарегистрированных в лотках при различных значениях радиуса кривизны скатной пластины

Table 1 – Average number of granules recorded in the trays at different values of the curvature radius of the chute plate

R	Q , шт	Лоток 1	Лоток 2	Лоток 3	Лоток 4	Лоток 5	K
10	160	22	27	62	28	21	0,60
15	160	25	31	48	32	25	0,78
20	160	26	30	47	30	26	0,92
25	160	38	24	16	24	38	0,69
30	160	42	18	12	18	42	0,56

Следует отметить, что симметричность распределения гранул относительно центральной оси борозды не является критерием равномерности. Коэффициент K характеризует степень отклонения распределения гранул от равномерного распределения, при котором на каждый из пяти лотков приходится одинаковая доля частиц (20%). Поэтому при радиусе кривизны $R = 30$ мм, несмотря на симметричность распределения, наблюдается концентрация гранул в крайних лотках и недостаточное их количество в центральной части, что приводит к снижению коэффициента равномерности до $K = 0,56$.

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что изменение радиуса кривизны скатной пластины оказывает существенное влияние на процесс перераспределения гранул минеральных удобрений по ширине борозды. При малых значениях радиуса кривизны наблюдается интенсивное изменение направления движения гранул, что сопровождается увеличением количества их взаимных столкновений. В результате формируются локальные зоны повышенной концентрации удобрений, а распределение частиц по ширине борозды становится менее равномерным.

При радиусе кривизны 10 мм коэффициент равномерности распределения составляет 0,60. Это свидетельствует о наличии значительных отклонений от равномерного распределения гранул по ширине обрабатываемой полосы. Подобный характер движения частиц обусловлен высокой кривизной рабочей поверхности,

вследствие чего отдельные гранулы получают повышенное поперечное ускорение и изменяют первоначальную траекторию движения.

Увеличение радиуса кривизны до 15 мм приводит к улучшению условий перемещения гранул по поверхности скатной пластины. Коэффициент равномерности возрастает до 0,78, что указывает на снижение концентрации частиц в центральной части борозды и более эффективное использование площади формируемой зоны размещения удобрений. Однако распределение гранул по-прежнему нельзя считать полностью равномерным вследствие сохранения отдельных участков локального накопления удобрений.

Наиболее благоприятные условия распределения достигаются при радиусе кривизны 20 мм. В данном случае коэффициент равномерности принимает максимальное значение 0,92. Это свидетельствует о формировании устойчивого потока гранул и наиболее полном использовании рабочей ширины борозды. При данном значении радиуса создаются условия для плавного изменения направления движения частиц без резких перегрузок и отрыва гранул от поверхности скатной пластины.

Анализ полученных данных показывает, что зависимость коэффициента равномерности от радиуса кривизны носит ярко выраженный экстремальный характер. При увеличении радиуса от 10 до 20 мм наблюдается последовательное повышение коэффициента равномерности с 0,60 до 0,92. Дальнейшее увеличение радиуса сопровождается снижением

данного показателя до 0,56 при значении радиуса 30 мм.

Для оценки характера распределения гранул минеральных удобрений по ширине борозды был выполнен анализ результатов

численного моделирования. В качестве иллюстрации на рисунке 2 представлена картина распределения гранул при рациональном значении радиуса кривизны скатной пластины.

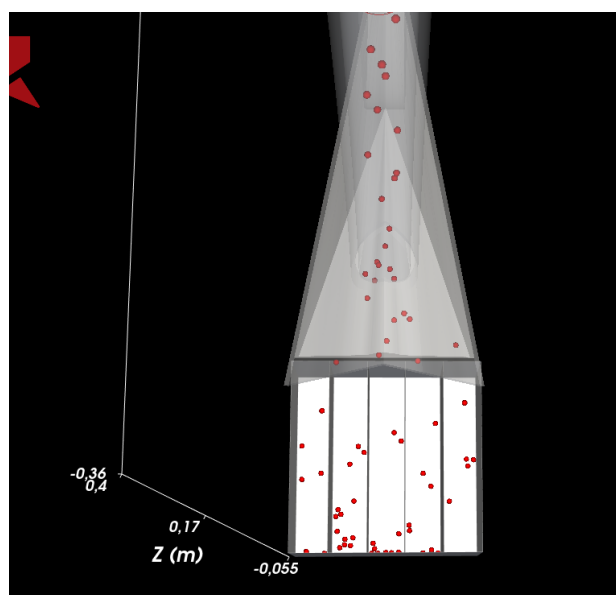


Рис. 2 – Распределение гранул минеральных удобрений по ширине борозды
Fig. 2 – Distribution of mineral fertilizer granules across the furrow width

Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, согласно которым уменьшение радиуса кривизны приводит к возрастанию центробежной составляющей движения гранул и увеличению вероятности нарушения их устойчивого контакта с поверхностью скатной пластины. Полученное ранее условие устойчивого движения гранул определяет область допустимых значений радиуса кривизны и показывает, что чрезмерное уменьшение данного параметра может негативно сказаться на характере распределения удобрений.

Результаты численного моделирования подтвердили наличие рационального диапазона изменения радиуса кривизны скатной пластины. Установлено, что максимальное значение коэффициента равномерности распределения гранул ($K = 0,92$) достигается при радиусе кривизны $R = 20$ мм. При меньших значениях радиуса наблюдается концентрация гранул в центральной части борозды, тогда как при увеличении радиуса свыше 20 мм происходит перераспределение частиц к периферийным зонам. Таким образом, значение $R = 20$ мм следует рассматривать как результат численной оптимизации процесса распределения гранул, выполненной методом дискретных элементов.

При дальнейшем увеличении радиуса кривизны до 25–30 мм поверхность скатной пластины становится близкой к прямолинейной. Поперечное перераспределение гранул уменьшается, вследствие чего большая часть удобрений перемещается по близким траекториям. Это приводит к сужению

зоны распределения и снижению коэффициента равномерности.

Для количественной оценки влияния исследуемого параметра выполнен регрессионный анализ результатов моделирования. Для построения регрессионной модели выполнено кодирование исследуемых факторов по следующим зависимостям:

x_1 – кодированное значение радиуса кривизны скатной пластины;

x_2 – кодированное значение нормы внесения удобрений.

$$x_1 = \frac{R - 20}{10}, \quad x_2 = \frac{Q - 160}{60},$$

где R – радиус кривизны скатной пластины, мм;

Q – количество гранул удобрений, подаваемых в расчётную область модели, шт;

20 мм и 160 шт являются центральными уровнями факторов;

10 мм и 60 шт – интервалы варьирования факторов.

Уравнение регрессии, описывающее зависимость коэффициента равномерности распределения гранул от радиуса кривизны скатной пластины и нормы внесения минеральных удобрений:

$$K = 0,427 + 0,02x_1 + 1,7e^{-3}x_2 - 4,3e^{-4}x_1^2 - 1,8e^{-6}x_2^2 + 6e^{-6}x_1x_2,$$

где x_1 – кодированное значение радиуса кривизны скатной пластины; x_2 – кодированное значение нормы внесения удобрений.

Проверка адекватности модели выполнена по F-критерию Фишера. Расчётное значение критерия составило $F = 62,1$, что превышает табличное значение при уровне значимости $p = 0,05$. Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,888$. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности регрессионной модели и возможности её использования для анализа влияния исследуемых факторов на коэффициент равномерности распределения гранул минеральных удобрений.

Анализ статистической значимости коэффициентов регрессии показал, что линейные члены x^1 и x^2 , а также квадратичный член x^{12} являются статистически значимыми ($p < 0,05$). При этом коэффициенты при членах x^2_2 и x^1x^2 оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$), что свидетельствует о слабом

влиянии квадратичного эффекта количества гранул и взаимодействия факторов на коэффициент равномерности распределения.

Наибольшее влияние на исследуемый показатель оказывает радиус кривизны скатной пластины. Наличие значимого квадратичного члена подтверждает нелинейный характер зависимости и существование рационального значения исследуемого параметра.

Графическая интерпретация полученной регрессионной зависимости в виде поверхности отклика представлена на рисунке 3. Анализ поверхности позволяет наглядно оценить совместное влияние радиуса кривизны скатной пластины и нормы внесения минеральных удобрений на коэффициент равномерности распределения гранул.

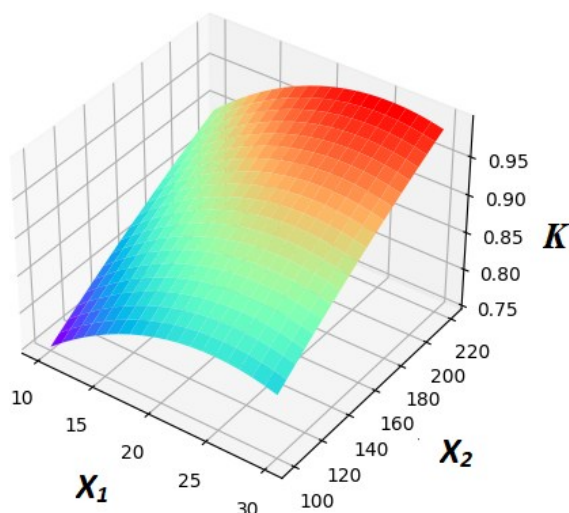


Рис. 3 – Поверхность отклика коэффициента равномерности распределения гранул минеральных удобрений в зависимости от радиуса кривизны скатной пластины и нормы внесения
Fig. 3 – Response surface of the uniformity coefficient of mineral fertilizer granule distribution depending on the curvature radius of the chute plate and the application rate

Полученная зависимость подтверждает наличие экстремума функции и существование рационального значения радиуса кривизны. Наличие квадратичного члена в уравнении регрессии свидетельствует о нелинейном характере исследуемого процесса и подтверждает, что как уменьшение, так и увеличение радиуса относительно оптимального значения приводит к ухудшению качества распределения удобрений.

Результаты численного моделирования показывают, что радиус кривизны скатной пластины является одним из определяющих конструктивных параметров рабочего органа. Именно данный параметр формирует траекторию движения гранул и оказывает непосредственное влияние на ширину полосы размещения удобрений и равномерность их распределения в почве.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования установленного значения радиуса

кривизны при проектировании рабочих органов для локального внесения гранулированных минеральных удобрений. Применение рационального радиуса позволяет формировать полосовую зону размещения удобрений шириной до 10 см, что способствует более полному охвату корнеобитаемого пространства растений и повышению доступности элементов питания для сельскохозяйственных культур с мочковатой корневой системой.

Выводы. По результатам теоретических исследований и численного моделирования процесса распределения гранулированных минеральных удобрений установлено, что радиус кривизны скатной пластины оказывает существенное влияние на характер движения гранул и равномерность их размещения в борозде.

На основе анализа движения гранул по криволинейной поверхности установлено, что уменьшение радиуса кривизны приводит к увеличению интенсивности столкновений

частиц и локализации удобрений в отдельных участках борозды, тогда как чрезмерное увеличение радиуса снижает эффективность поперечного перераспределения гранул.

Численным моделированием в программном комплексе Rocky DEM установлено, что зависимость коэффициента равномерности распределения удобрений от радиуса кривизны скатной пластины носит экстремальный характер. Максимальное значение коэффициента равномерности распределения $K = 0,92$ получено при радиусе кривизны $R = 20$ мм.

Установлено, что применение скатной пластины с радиусом кривизны 20 мм обеспечивает формирование устойчивой полевой зоны размещения минеральных удобрений шириной до 10 см и наиболее равномерное распределение гранул по ширине борозды.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании рабочих органов для подкорневого внесения гранулированных минеральных удобрений и совершенствовании технологий локального размещения удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур.

Литература

1. Nitrogen use efficiency – a key to enhance crop productivity under a changing climate / P. Govindasamy, S.K. Muthusamy, M. Bagavathiannan, et al. // *Front. Plant Sci.* 2023. 14:1121073. doi: 10.3389/fpls.2023.1121073.
2. Current agronomic evidence on nano-urea in the nitrogen transition of cropping systems. A mini-review / Guido Fellet, Laura Pilotto, Paolo Ceecon, et al. // *European Journal of Agronomy.* 2026. Vol. 165. doi: 10.1016/j.eja.2025.127476.
3. Башкин В. Н. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщение 1. Агрогеохимические подходы // *Агрохимия.* 2022. № 7. С. 82-96. doi: 10.31857/S0002188122070031.
4. The spatial distribution of soil nitrogen determines responses of Sorghum bicolor to banded phosphorus fertilizer / Hunter M. A., Bell M. J., van der Bom F. J. T., et al. // *Crop and Pasture Science.* 2024. Vol. 75. № 12. doi: 10.1071/CP24256.
5. Кузьменко Н. Н. Повышение эффективности комплексного удобрения под лен-долгунец // *Агрохимия.* 2020. № 8. С. 37-42. doi: 10.31857/S000218812006006X.
6. Optimizing nitrogen dynamics and agronomic efficiency through one-time root-zone targeted fertilization in maize cropping systems of Northeast China: a multifaceted assessment / Irfan M., Wang Y., Yokamo S. et al. // *Journal of Soils and Sediments.* 2026. Vol. 26, article 170. doi: 10.1007/s11368-026-04363-0.
7. Патент на полезную модель № 239031 U1 РФ, МПК A01C 5/08, A01C 7/20, A01B 15/00. Рабочий орган для разноразмерного внесения удобрений / А. А. Хазиев, Р. Ф. Сабиров, А. Р. Валиев и др.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ». – № 2025102671; заявл. 07.02.2025; опубл. 21.11.2025. Бюл. № 33.
8. Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г., Хасанов Э. Р. Экспериментальная калибровка параметров контактной модели цифрового двойника почвенной среды методом дискретных элементов // *Вестник аграрной науки Дона.* 2025. Т. 18. № 1(69). С. 4-18. doi: 10.55618/20756704_2025_18_1_4-18.
9. Повышение эффективности проектирования сельскохозяйственной техники с помощью цифровых двойников / Ю. Ф. Лачуга, С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов и др. // *Вестник Российской академии наук.* 2025. № 6. С. 50-58. doi: 10.7868/S3034520025060068.
10. Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Гареев И. Ф. Моделирование взаимодействия анкерного сошника с почвой и семенами методом дискретных элементов: анализ тягового сопротивления и агротехнических параметров // *Российский электронный научный журнал.* 2025. № 1(55). С. 287-295. doi: 10.31563/2308-9644-2025-55-1-287-295.

References

1. Govindasamy P, Muthusamy SK, Bagavathiannan M. Nitrogen use efficiency – a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front. Plant Sci.* 2023; 14. 1121073. doi: 10.3389/fpls.2023.1121073.
2. Fellet Guido, Pilotto Laura, Ceecon Paolo. Current agronomic evidence on nano-urea in the nitrogen transition of cropping systems. A mini-review. *European Journal of Agronomy.* 2026; Vol.165. doi: 10.1016/j.eja.2025.127476.
3. Bashkin VN. [Increasing of nitrogen use efficiency: problems and solutions. Message 1. Agrogeochemical approaches]. *Agrokhimiya.* 2022; 7. 82-96 p. doi: 10.31857/S0002188122070031.
4. Hunter MA, Bell MJ, van der Bom FJT. The spatial distribution of soil nitrogen determines responses of Sorghum bicolor to banded phosphorus fertilizer. *Crop and Pasture Science.* 2024; Vol.75. 12. doi: 10.1071/CP24256.
5. Kuzmenko NN. [Increasing the efficiency of complex fertilizer for fiber flax]. *Agrokhimiya.* 2020; 8. 37-42 p. doi: 10.31857/S000218812006006X.
6. Irfan M, Wang Y, Yokamo S. Optimizing nitrogen dynamics and agronomic efficiency through one-time root-zone targeted fertilization in maize cropping systems of Northeast China: a multifaceted assessment. *Journal of Soils and Sediments.* 2026; Vol.26. article 170. doi: 10.1007/s11368-026-04363-0.
7. Khaziev AA, Sabirov RF, Valiev AR. [Working unit for multi-level fertilizer application]. Patent № 239031 U1 RF, MPK A01C 5/08, A01C 7/20, A01B 15/00. Applicant: Kazan State Agrarian University. № 2025102671; applied 07.02.2025; published 21.11.2025. Bulletin № 33.
8. Mukhametdinov AM, Mudarisov SG, Khasanov ER. [Experimental calibration of contact model parameters for a digital twin of soil environment using discrete element method]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona.* 2025; Vol.18. 1(69). 4-18 p. doi: 10.55618/20756704_2025_18_1_4-18.
9. Lachuga YuF, Mudarisov SG, Farkhutdinov IM. [Increasing the efficiency of agricultural machinery design using digital twins]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk.* 2025; 6. 50-58 p. doi: 10.7868/S3034520025060068.
10. Mudarisov SG, Farkhutdinov IM, Gareev IF. [Modeling the interaction of an anchor opener with soil and seeds using discrete element method: analysis of draft resistance and agrotechnical parameters]. *Rossiyskiy elektronnyy nauchnyy zhurnal.* 2025; 1(55). 287-295 p. doi: 10.31563/2308-9644-2025-55-1-287-295.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, чл.-корр. АН РТ, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: ayratvaliev@mail.ru, ORCID 0000-0003-3175-6487

Хазиев Айбулат Алмазович – аспирант кафедры эксплуатации и ремонта машин Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: khaziev.aubylat@gmail.com, ORCID 0009-0008-2559-522X

Сабиров Раис Фаритович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта машин Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: agromehanika116@gmail.com, ORCID 0000-0002-7270-2883

Гайнутдинов Булат Ильдусович – аспирант кафедры эксплуатации и ремонта машин Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: bulat.gaynutdinov31@gmail.com, ORCID 0009-0008-7420-5857

Вклад авторов:

А.Р. Валиев – разработка общей концепции исследования, постановка цели и задач, теоретический анализ движения гранул, формулировка выводов, научное редактирование текста;

А.А. Хазиев – разработка конструктивной схемы рабочего органа, проведение численного моделирования в программном комплексе Rocky DEM, обработка первичных данных моделирования;

Р.Ф. Сабиров – участие в планировании вычислительного эксперимента, статистическая обработка результатов, построение регрессионных моделей и поверхностей отклика;

Б.И. Гайнутдинов – сбор и анализ литературных источников, оформление таблиц и графических материалов, подготовка рукописи к публикации.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 17.03.2026; одобрена после рецензирования 22.06.2026; принята к публикации 25.06.2026.

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

Authors:

Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, corresponding member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Machine Operation and Repair Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: ayratvaliev@mail.ru, ORCID 0000-0003-3175-6487

Khaziev Aybulat Almazovich – post-graduate student of Machine Operation and Repair Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: khaziev.aubylat@gmail.com, ORCID 0009-0008-2559-522X

Sabirov Rais Faritovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Machine Operation and Repair Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: agromehanika116@gmail.com, ORCID 0000-0002-7270-2883

Gaynutdinov Bulat Ildusovich – post-graduate student of Machine Operation and Repair Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: bulat.gaynutdinov31@gmail.com, ORCID 0009-0008-7420-5857

Contribution of the authors:

A.R. Valiev – Research concept development, Problem statement, Theoretical analysis of granule motion, Formulation of conclusions, Scientific editing;

A.A. Khaziev – Design of the working unit, Numerical simulation in Rocky DEM, Primary data processing;

R.F. Sabirov – Planning of computational experiments, Statistical analysis, Regression modelling and response surface construction;

B.I. Gaynutdinov – literature review, Preparation of tables and figures, Manuscript formatting.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 17.03.2026; revised 22.06.2026; accepted 25.06.2026.

