

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЁДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ПОКРЫТИЮ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

**К.П. Мандровский**<sup>1</sup>, [effectmash@mail.ru](mailto:effectmash@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7180-424X>  
**Я.С. Садовникова**<sup>2</sup>, [jana.sadovnikova@yandex.ru](mailto:jana.sadovnikova@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0069-6816>

<sup>1</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Эксперт-Центр», Москва, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме обеспечения равномерности распределения частиц твёрдого противогололёдного материала по дорожным покрытиям. Под равномерностью распределения частиц твёрдых противогололёдных материалов понимается характер взаимного расположения частиц материала на поверхности покрытия. Вопрос о равномерности распределения остаётся актуальным в сфере мероприятий по зимнему содержанию дорог, поскольку равномерность является составляющей понятия качества противогололёдной обработки. Главная задача данной статьи состоит в систематизации научных и производственных данных, накопленных исследователями в ходе решения проблемы обеспечения качества распределения ПГМ, в частности такого её показателя, как равномерность распределения частиц. Указанная задача будет решена методом анализа и оценки научных работ, посвящённых процессам распределения твёрдых частиц по покрытиям. На основе анализа накопленных научных исследований показано, что можно выделить несколько факторов, определяющих показатели равномерности, такие как конструктивные особенности распределительного оборудования, внешние условия, физико-химические свойства материала, способ подачи материала на распределительный диск. Вопрос совершенствования конструкции распределителей отличается высокой степенью проработанности научной проблемы. Анализ работ показал, что изучено влияние на равномерность распределения таких особенностей конструкции, как форма сечения и размеры высевной щели, расположенной на дне бункера, форма поперечного сечения лопаток, диаметр и угол наклона распределительного диска. Выявленный характер влияния физико-химических свойств материалов на равномерность распределения в основном базируется на результатах исследований работы сельскохозяйственных машин. Авторами предложена альтернатива повсеместно используемому традиционному несимметричному методу подачи материала на диск – симметричный способ подачи, позволяющий повысить равномерность распределения частиц противогололёдного материала при обработке ограниченных городских территорий.

**Ключевые слова:** противогололёдный материал (ПГМ), равномерность распределения, распределительный диск, полоса обработки, зона подачи, лопатка диска

**Для цитирования:** Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Факторы, влияющие на равномерность распределения противогололёдных материалов по покрытию: обзор исследований // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 2. С. 17–32. DOI: 10.14529/engin260202

## FACTORS AFFECTING THE UNIFORM DISTRIBUTION OF ANTI-ICING MATERIALS ON THE ROAD: A REVIEW OF RESEARCH

**K.P. Mandrovskiy**<sup>1</sup>, *effectmash@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7180-424X>  
**Y.S. Sadovnikova**<sup>2</sup>, *jana.sadovnikova@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-0069-6816>

<sup>1</sup> *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Expert Center LLC, Moscow, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to the problem of ensuring the uniform distribution of particles of solid deicing material over road surfaces. The uniformity of the distribution of particles of solid anti-icing materials is understood as the nature of the mutual arrangement of the material particles on the coating surface. The issue of uniformity of distribution remains relevant in the field of winter road maintenance measures, since uniformity is a component of the concept of quality of deicing treatment. The main objective of this article is to systematize the scientific and industrial data accumulated by researchers in the course of solving the problem of ensuring the quality of GHM distribution, in particular, its indicator, such as the uniformity of particle distribution. This task will be solved by analyzing and evaluating scientific papers on the processes of particulate matter distribution over coatings. Based on the analysis of accumulated scientific research, it is shown that several factors can be identified that determine uniformity indicators, such as: design features of distribution equipment, external conditions, physicochemical properties of the material, and the method of feeding the material to the distribution disk. The issue of improving the design of distributors is characterized by a high degree of elaboration of the scientific problem. The analysis of the work showed that the influence on the uniformity of the distribution of such design features as the shape of the section and the size of the seeding slot located at the bottom of the hopper, the shape of the cross-section of the blades, the diameter and angle of inclination of the distribution disc. The revealed nature of the influence of the physicochemical properties of materials on the uniformity of distribution is mainly based on the results of research on the operation of agricultural machinery. The authors propose an alternative to the widely used traditional asymmetric method of feeding material to a disk – a symmetrical feeding method that allows to increase the uniformity of the distribution of particles of anti-iced material when processing limited urban areas.

**Keywords:** de-icing material, uniformity of distribution, distribution disk, processing strip, feed zone, disk blade

**For citation:** Mandrovskiy K.P., Sadovnikova Y.S. Factors affecting the uniform distribution of anti-icing materials on the road: a review of research. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026:26(2):17–32. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260202

### Введение

Проблема равномерности распределения противогололёдного материала (ПГМ) по дорожному покрытию остается не до конца решенной. Разработка эффективной методики и механизма управления показателями равномерности остается актуальной задачей. Особую важность приобретает экологическое воздействие химических противогололёдных материалов на окружающую среду и необходимость экономного расходования химикатов [1].

Под равномерностью распределения частиц твёрдых противогололёдных материалов понимается характер взаимного расположения частиц материала на поверхности покрытия. Равномерность принято оценивать по ширине полосы обработки (в направлении, перпендикулярном направлению движения машины) и по длине полосы обработки (в направлении движения машины).

### Материалы и методы

Цель статьи заключается в выявлении степени изученности основных факторов, влияющих на равномерность распределения ПГМ в пределах ширины полосы обработки, образуемой при

проходе машины по проезжей части с работающим распределительным оборудованием. Главная задача при этом состоит в систематизации научных и производственных данных, накопленных исследователями в ходе решения проблемы обеспечения качества распределения ПГМ, в частности такого её показателя, как равномерность распределения частиц. Указанная задача будет решена методом обзора, анализа и оценки научных работ, посвящённых процессам распределения твёрдых частиц по покрытию.

### **Исследования факторов, влияющих на равномерность распределения частиц противогололёдных материалов по покрытию**

Следует отметить, что большинство анализируемых работ относится к сельскохозяйственной технике, поскольку проблема обеспечения равномерности распределения материала по поверхностям изначально возникла в сфере сельскохозяйственных работ по внесению жидких и твёрдых удобрений. Разбрасыватель удобрений так же, как и распределитель ПГМ, включает в себя бункер с воронками (лотками) в нижней части распределительного узла. В бункере установлены загрузочные решетки для защиты материала от непредвиденного прикосновения к вращающимся деталям и от падения посторонних частиц и крупных комков материала (удобрений) в распределитель. Распределитель удобрений оснащается в основном двумя распределительными дисками, вращающимися в направлении, противоположном движению машины. В каждой воронке имеется спиральная мешалка для равномерной подачи удобрений к выходному отверстию, величина которого изменяется заслонкой дозатора посредством регулировочного рычага. Распределительные диски снабжены длинной и короткой лопастями (лопатками). Короткая лопасть распределяет удобрения в основном по центру посева, в то время как длинная лопасть – по краям полосы посева (полосы обработки). Конструкции распределительного оборудования дорожных и сельскохозяйственных машин имеют специфические особенности, однако методические подходы к решению проблемы достижения равномерности могут быть применены к дорожной сфере с учетом поправки на конструктивное исполнение распределительных машин, характер их эксплуатации и особенности технологического процесса.

Проанализируем степень изученности факторов, определяющих равномерность распределения ПГМ по ширине полосы обработки покрытия (поверхности).

#### *1. Влияние особенностей конструкции распределительного оборудования на равномерность распределения ПГМ*

Известны работы, в которых равномерность распределения частиц рассматривается исключительно в тесной связи с конструкцией оборудования [1–28]. Анализ технической документации, имеющейся в свободном доступе, свидетельствует о наличии непрерывно совершенствуемых бортовых систем управления процессом распределения ПГМ. Erobasic, EроMaster, ACOTEL GSA – это примеры наиболее популярных систем управления автоматизированным распределением ПГМ. Они позволяют с пульта управления устанавливать дозировку, ширину и направление распределения материала (путём изменения положения окна выхода материала при помощи электродвигателя корпусного диска). Постоянное значение расхода ПГМ обеспечивается за счет его корректировки при изменении скорости движения машины. Такие производители систем управления распределением, как Giletta, Monroe, Epoke, Nido, Küpper-Weisser, Falköping, AEBI Schmidt оснащают распределители датчиками контроля температуры дорожного покрытия, датчиками GPS и датчиками скорости машины. На данный момент качество обработки обеспечивается за счет изменения частоты вращения распределительных дисков, фактического расхода ПГМ, направления распределения ПГМ с учетом показаний датчиков температуры дорожного покрытия. Равномерность распределения ПГМ напрямую в процессе распределения не оценивается и не регулируется [2]. Наиболее востребованными конструкциями машин-распределителей являются: шнековая, цепная или ленточная система, подающая ПГМ из бункера машины на распределительный диск; измельчитель/мешалка, расположенный в нижней части конвейерной системы, обеспечивающий движение постоянного, равномерного потока ПГМ к диску; распределительный диск с лопатками. Также машины могут быть оснащены серводвигателем и потенциометром, предназначенными для настройки схемы распределения (симметрично или асимметрично), насосным агрегатом для жидкого ПГМ для предварительного смачивания материалов.

Перспективной конструкцией, широко применяемой за рубежом, является распределитель с нулевой скоростью. К ним относятся: Industrial Hydraulic System (IHS), The Muncie Electronic Spreader Package (MESP), Pengwyn Zero Velocity, Swenson Zero Velocity System, Tyler Zero Velocity System, Y System. Основная задача подобного распределителя – распределять ПГМ из задней части машины со скоростью, равной скорости движения машины. Таким образом абсолютная (относительно проезжей части дороги) скорость движения частиц противогололёдных материалов равна нулю. Это предотвращает попадание частиц за пределы полосы обработки и на обочину. Согласно исследованиям [4], дисковый распределитель выбрасывает до 40 % противогололёдного материала за пределы полосы обработки. Современные системы с нулевой скоростью распределения сконструированы таким образом, что способны работать при скорости движения машины до 72 км/ч, тем самым уменьшая разницу скоростей между потоком движущегося транспорта.

В качестве фундаментальных теоретических исследований справедливо отметить труды [5–7], представляющие собой аналитические исследования движения твёрдых частиц на диске центробежного распределителя материалов, в том числе по криволинейной направляющей [7]. Данные исследования базируются на классических методах аналитической механики и теории дифференциальных уравнений. Исследования движения частиц методами математического моделирования, методами дискретных элементов (DEM) и методами оптимизации посвящены работы [8–10]. В данных работах используется понятие «коэффициент поперечной вариации» для оценки распределения. Совместно с разработкой имитационной модели стандартного центробежного дискового распределителя представлен алгоритм настройки имитационной модели для точного распределения частиц [10] с помощью системы автоматического управления.

Экспериментальные исследования конструктивных параметров распределительного оборудования представлены рядом работ [11–14]. Разработка конструкции наклонного вращающегося диска и моделирование процесса распределения при помощи экспериментальных исследований представлены в [9]. В частности, установлено, что частота вращения диска с наклонной осью оказывает наиболее существенное влияние на значение коэффициента вариации распределения частиц. В работах [11, 12] методами стендовых испытаний и статистического анализа изучено влияние числа и высоты лопаток диска на равномерность распределения материалов. Изучению влияния формы лопаток на распределение удобрений посвящена работа [13]. Показано, что оптимальная высота лопаток может варьироваться в зависимости от расхода материала. Увеличение высоты лопатки может способствовать повышению скорости потока движущихся частиц [12]. Загнутые вперед лопатки, как правило, обеспечивают лучшую равномерность, чем прямые. Форма лопатки также может влиять на величину отскока частиц и эффективную ширину распределения. Лопатка U-образного сечения позволяет максимально увеличить ширину распределения, а лопатка, отклонённая назад, уменьшает отскок частиц и улучшает равномерность распределения. При более высоких скоростях вращения диска такая форма может привести к большей ширине распределения по сравнению с другими конструкциями лопаток [13].

В работе [15] методом лабораторных испытаний и статистического анализа были определены количество лопаток, угол их расположения и скорость вращения дисков, при которых значение коэффициента вариации, характеризующего равномерность поперечного распределения частиц, снижается до минимально возможного (меньше 10 %). При этом разница между количеством материала, распределяемым вправо и влево относительно оси диска, составляет меньше 4 %. Выявлено, что количество лопаток и угол наклона лопаток имеют статистическую значимость для коэффициента вариации, а равномерность поперечного распределения частиц увеличивается с увеличением скорости вращения диска.

Исследование [16], посвящённое анализу влияния формы поперечного сечения лопаток и диаметра вращающегося диска на равномерность распределения ПГМ, подтверждает, что наилучшее значение плотности распределения достигается при использовании согнутой до 70° лопатки с диаметром диска, равным 450 мм.

Влияние угла установок вращающегося диска на равномерность распределения изучено методом полевых испытаний в статье [14] и методом теоретических исследований в работе [17]. Исследования, базирующиеся на законах механики и динамики сыпучих сред [17], показали, что угол наклона диска распределителя ПГМ к горизонтали не оказывает существенного влияния на

дальность распределения частиц твёрдого материала, однако существенно меняет характер и траекторию движения частиц: при увеличении угла наклона диска к горизонтали дальность полёта частиц увеличивается. В процессе распределения ПГМ необходимо учитывать, что при углах наклона диска, превышающих  $20^\circ$  в поперечной или продольной плоскости, высота разлёта частиц материала в два и более раз превышает значение высоты установки диска над покрытием [17]. Исследованиями [17] установлено, что увеличение высоты установки диска над покрытием приводит к ухудшению равномерности распределения материала. Доказано, что сопротивление воздуха существенно влияет на окончательное распределение частиц по поверхности. В основном это связано с изменением дальности полёта отдельных частиц. В области сельскохозяйственной техники подобные исследования подтверждаются, в частности, в статье [14].

В работе [18] исследователи пришли к выводу, что равномерность распределения частиц зависит от значения радиуса и скорости вращения диска. Авторы указывают, что в реальных полевых условиях эта скорость меняется и приводит к увеличению неравномерности распределения частиц. По мере того, как расстояние загрузки от центра диска растёт, эффект удара и отскакивания частиц становится более значительным. В работе также аналитически обоснованы форма сечения и размеры высевной щели, расположенной на дне бункера над распределительным диском. Получены уравнения, описывающие форму высевной щели. Определены численные значения параметров высевной щели и размеры отражателя для конкретной конструкции распределителя. Частицы ПГМ, попадая на распределительный диск, сходят с него под некоторым углом, затем попадают на поверхность отражателя, а затем отскакивают от него и попадают на дорожное покрытие. Форма отражателя в горизонтальной плоскости описывается уравнением параболы.

В работе представлена формула для определения радиуса отражающего кожуха диска:

$$r = \frac{p}{1 - \cos\varphi},$$

где  $r$  – радиус отражающего кожуха диска;  $p$  – фокальный параметр параболы, образованной кожухом в горизонтальном сечении;  $\varphi$  – полярный угол, когда полярная ось проходит через продольную ось симметрии агрегата и направлена вдоль оси движения машины [18].

Для обеспечения равномерного распределения материала по ширине полосы обработки сформулировано условие

$$k = \frac{dS}{d\Pi},$$

где  $k$  – постоянная;  $dS$  – площадь сечения высевной щели,  $d\Pi$  – ширина полосы дорожного покрытия [18].

Ширина  $E$  высевной щели определяется по формуле

$$E = k \frac{p}{R_0(1 - \cos\varphi)},$$

где  $R_0$  – средний радиус подачи материала от оси вращения диска [18].

Отдельно следует отметить конструктивные решения, направленные на повышение качества распределения частиц [15, 19, 20–23]. Данные конструкторско-теоретические исследования и патентные разработки направлены на проектирование машин-распределителей [19, 20] и разработку способов настройки параметров центробежного распределителя твёрдых частиц [21, 22] методами математического и компьютерного моделирования. Запатентованные решения предлагают новые конструкции лопаток, механизмов подачи материала, а также системы и алгоритмы для расчёта параметров рабочего оборудования, в частности с применением датчиков, предоставляющих информацию о состоянии покрытия и процессе распределения в реальном времени.

Однако большая доля исследований применима в сфере сельскохозяйственной техники. Для дорожных машин, распределяющих противогололёдные материалы, нельзя констатировать большой объём накопленных исследований. В числе трудов, относящихся к машинам и оборудованию для распределения ПГМ, можно выделить работы [4, 16–18, 24–28].

Данные работы представляют собой оценку показателей работы распределителей противогололёдных материалов: в том числе с нулевой скоростью [4, 24]; экспериментальное исследование распределителей материалов [28]; аналитическое обоснование влияния диаметра диска и формы лопаток на равномерность распределения [18]; изучение влияния формы лопаток и диаметра дис-

ка на равномерность распределения [16]; анализ влияния параметров (высоты установки и диаметра диска) устройств распределения материалов на ширину полосы обработки и плотность распределения материала [26]; описание методики расчёта параметров механизма подачи материалов с учётом скорости движения машины, обуславливающей ширину и плотность распределения материала [27]; изучение влияния угла наклона вращающегося диска на траекторию и дальность отлёта частиц ПГМ [17]; разработку многофункциональной машины для распределения смесей [23, 25]. Анализ имеющихся исследований выявляет тенденцию перехода от аналитических моделей к совместному использованию методов численного моделирования, компьютерного (имитационного) моделирования и методов оптимизации для учёта реальных условий работы машин.

## *2. Влияние внешней среды на равномерность распределения*

Изучение и оптимизация процесса распределения твёрдых материалов с учётом влияния внешней среды (скорости и направления ветра) представлено в работах [4, 17, 29-33]. Можно отметить работы, отражающие результаты экспериментов в полевых и лабораторных условиях [4, 29, 30]. В работе [4] выполнено сравнение протоколов распределения и оценка эффективности распределителя с нулевой скоростью для повышения эффективности противогололёдной обработки. В работе отсутствует физико-математический аппарат для анализа процесса распределения. Упомянутые выше системы распределения с нулевой скоростью оснащены дозирующим устройством, поддерживающим равномерность распределения при высоких скоростях движения машины. Завихрения воздушных потоков в задней части машины являются одной из причин неравномерности распределения. Испытания схем распределения при скорости 64 км/ч показывают, что только одна из систем с нулевой скоростью даёт небольшое преимущество по показателям равномерности по сравнению с обычными системами распределения [4]. Завихрения воздушных потоков приводят к тому, что система распределяет частицы материала по очень большой площади, что сводит на нет использование системы с нулевой скоростью. Исходя из опыта эксплуатации, устанавливаются рекомендуемые скорости движения машин с системами нулевой подачи материала в диапазоне от 32 до 64 км/ч [4].

В работе [29] измерена равномерность распределения удобрений в реальных условиях, оценена связь параметров работы машины с качеством процесса распределения. Для этого использованы коэффициенты вариации распределения удобрений для разных режимов работы распределителя. Установлено, что сопротивление воздушной среды не пропорционально скорости движения частиц. В диапазоне скоростей ветра до 0,5 м/с влияние воздушного потока на дальность полёта частиц не превышает 5 %, что соответствует увеличению неравномерности распределения на 0,35 %. Наибольшее влияние на неравномерность распределения оказывает поток воздуха, действующий под углом от 45 до 135 градусов к оси, направленной перпендикулярно направлению движения машины.

В статье [30] применён эксперимент совместно с моделированием. С помощью высокоскоростной съёмки изучено движение частицы с учётом лобового сопротивления и подъёмной силы. В лабораторных условиях получены количественные данные о влиянии скорости и направления ветра на траекторию и дальность полёта частиц разной формы и массы. Установлено, что частицы с меньшей плотностью, меньшим размером и более неправильной формой были более чувствительны к ветру. В работе [31] также применена высокоскоростная видеосъёмка совместно с моделированием на базе нелинейной системы дифференциальных уравнений первого порядка. Исследованы траектории полёта частиц после слёта с диска, в частности измерены начальные условия полёта (скорость, угол схода с диска) для частиц разного типа. Однако эксперимент проводился в контролируемых условиях без учёта влияния ветра.

Результаты аналитического и компьютерного моделирования процесса распределения для изучения влияния внешних факторов представлены в статьях [17, 32, 33]. В работе [32] получена математическая модель движения частицы с учётом скорости ветра. При этом частица рассматривается как материальная точка, находящаяся под действием силы тяжести и ветра. Получены аналитические выражения для определения величины смещения частицы от заданной траектории под воздействием ветра (аэродинамические свойства частицы отдельно не рассматривались).

В работе [33] выполнена визуализация и количественный анализ движения частиц в воздушном потоке, создаваемом вращающимися дисками. В исследовании использованы средства ком-

пьютерного моделирование (CFD-DEM), вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и аэродинамики. Полученная исследователями модель и квадратично-ортогональный имитационный (вычислительный) эксперимент для анализа траекторий частиц и оптимизации параметров распределителя требуют экспериментальной проверки.

Результаты упомянутых выше исследований свидетельствуют, что пренебрежение внешними условиями делает модель процесса распределения ПГМ неадекватной. Для достижения высокой точности при исследовании показателей качества распределения требуется развитие двух направлений: систем точного определения и прогнозирования траектории частиц (на основе математических и компьютерных моделей) и систем мониторинга условий распределения в режиме реального времени. В сфере дорожной техники наблюдается дефицит исследований, посвящённых оценке влияния внешних условий на процесс распределения ПГМ. Необходимо адаптировать передовые CFD-DEM модели, разработанные для сельскохозяйственных разбрасывателей [33], для задач оптимизации процесса распределения ПГМ с учётом специфических особенностей устройства рабочего оборудования и условий его работы.

### *3. Влияние физико-химических свойств распределяемого материала*

Влиянию физико-химических свойств материала на процесс распределения посвящены работы [34–44]. Анализ движения отдельных частиц удобрений методом дискретных элементов (DEM) выполнен в работах [34–37]. В статьях [34, 36] разработаны уравнения движения частицы по плоскости с учётом сил трения, центробежной силы и силы Кориолиса с использованием инструментов классической механики. В работах [36, 38] проведены стендовые испытания для проверки адекватности математических моделей. В статьях [34, 38] представлены результаты лабораторного анализа физико-механических свойств материалов (плотность, форма, коэффициент трения, аэродинамические свойства). При этом частицы рассмотрены изолированно, без учёта взаимодействия между собой в процессе полёта. Также не рассмотрена сила воздушного сопротивления.

В частности, доказано, что относительное движение частиц, происходящее при погрузке, транспортировке, перегрузке, приводит в распределителе к расслоению смеси, что не способствует равномерному распределению частиц [34]. Влияние коэффициента трения частиц о распределительное оборудование проявляется в том, что частицы, имеющие разный коэффициент трения, движутся по лопаткам диска с разными скоростями, а это приводит к относительному сдвигу углов схода частиц с диска и к увеличению неравномерности распределения. Уменьшение значения коэффициента трения вызывается, в частности, увеличением частоты вращения диска [35].

Влияние размеров частиц на характеристики процесса распределения изучено в работе [38]. Указано, что чрезмерное количество мелких частиц может привести к сносу и вынесению этих частиц за пределы полосы обработки [30, 38].

В [36, 37] подтверждено, что форма и удельная плотность твёрдых частиц оказывает существенное влияние на коэффициент аэродинамического сопротивления. В исследованиях [34, 38] установлено, что форма, размер и влажность частиц значительно влияют на коэффициент трения и, как следствие, на траекторию полёта и равномерность распределения. Крупные и сферические частицы имеют большую дальность отлёта.

При расчёте характеристик процесса распределения ПГМ применяются зависимости кинематических характеристик полёта частиц от их физико-механических свойств, изложенные в работе П.М. Василенко [6]. Выявлено [39], что важное значение при использовании ПГМ имеют также их теплофизические характеристики. Их необходимо учитывать для разного типа ПГМ в зависимости от температуры и влажности воздушной среды, толщины и плотности снежно-ледяных образований, скорости ветра и скорости перемещения воздушных потоков, создаваемых при движении транспорта в реальных дорожных условиях. Показано [26], что для качественного распределения необходимо нормировать ПГМ не только по плавящей способности, но и более строго – по количественному содержанию различных компонентов многокомпонентного ПГМ. Варьирование значений диаметров используемых частиц ПГМ необходимо осуществлять, руководствуясь значениями толщины и плотности снежно-ледяных образований.

Противогололёдные материалы в работах [39–42] исследованы с помощью термодинамических моделей (с использованием эвклидических диаграмм и фазовых переходов). Гидродинамическое моделирование и статистические методы исследования применены в работе [41]. Полевые

исследования эффективности ПГМ в натуральных условиях рассмотрены в [42]. Полученные исследователями модели ориентированы на упрощённый состав ПГМ и их смесей и не учитывали воздействия на рабочий процесс реальной дорожной среды (например, интенсивность движения, загрязнённость дорожного покрытия, воздействие ветра).

Базой в данных работах является классическая механика и теория удара. В работах наблюдается переход от рассмотрения частицы как отдельной материальной точки [34] к сложным многопараметрическим моделям, которые учитывают помимо свойств материала также конструктивные особенности оборудования и аэродинамические эффекты [37].

С помощью инструментов DEM подтверждено, что физические свойства частиц (коэффициент восстановления, трение) оказывают большее влияние на распределение, чем их плотность [37].

Компьютерное моделирование для вычисления коэффициентов вариации для разных параметров оборудования (угол лопатки, скорость вращения диска, тип материала) без учёта внешних факторов осуществлено в работах [28, 43]. Результаты исследований позволяют определить влияние физико-механических свойств материала и геометрических параметров оборудования на равномерность распределения. Исследования свидетельствуют о том, что равномерность распределения материала на 60–70 % определяется физико-механическими свойствами частиц (форма, диаметр, шероховатость) и на 30–40 % – настройками и конструктивными параметрами вращающегося диска. Эффективность ПГМ является функцией не только его химического состава и температуры замерзания раствора, но и его физической формы (частица, капля), влияющей на площадь контакта с покрытием и скорость растворения. Однако в некоторых случаях (где не учитывалось воздушное сопротивление среды) выводы о траектории движения частиц могут давать некорректный результат при проведении экспериментов с реальными машинами при высоких скоростях вращения распределительных дисков.

В сфере дорожных машин и оборудования наблюдается тенденция к переходу от полевых испытаний к созданию термодинамических и гидродинамических моделей [41], позволяющих оптимизировать расход ПГМ.

На основе проведённого анализа научных работ выявлены следующие проблемы: отсутствие единых моделей, объединяющих физическое описание процесса распределения и учёт химической эффективности материала; недостаточное изучение влияния внешних условий (ветер, температура и влажность среды) на траекторию полёта частиц ПГМ; отсутствие комплексных исследований, направленных на оптимизацию свойств материала для улучшения равномерности распределения. Необходим системный подход к созданию ПГМ с заданными аэродинамическими и механическими характеристиками (форма, диаметр, шероховатость, влажность), обеспечивающими максимальную равномерность распределения по покрытию.

#### *4. Влияние на равномерность распределения способа подачи противогололёдного материала на диск*

В работах, направленных на изучение способа подачи материала на диск (или точки подачи относительно оси диска), выделяются три методологических подхода: аналитическое моделирование, экспериментальные исследования и компьютерное моделирование.

В работе [44] с помощью аналитического моделирования инструментами классической механики осуществлён анализ движения частицы как материальной точки на вращающемся диске с учётом центробежной силы, силы Кориолиса, силы трения. Принято допущение, что частица имеет идеальную форму, аэродинамическое сопротивление не учитывается. В результате разработана концепция оптимизации траектории движения частицы с управлением расположения точки подачи материала на диск (положением пятна подачи материала). Представлено аналитическое описание выражения для расчёта оптимального радиуса положения пятна подачи. Полученные результаты не проверены экспериментально.

Известны экспериментальные исследования [45–47] методом стендовых испытаний, направленные на статистический анализ распределения частиц материала по ширине полосы обработки.

Исследования [45] показывают, что круглая зона подачи материала на поверхность диска обеспечивает более близкое расположение материала на центробежном диске и тем самым позволяет обеспечить более качественное распределение смеси без её предварительного приготовления центробежным дисковым распределителем, в отличие от прямоугольной зоны подачи лот-

ковым направителем. Способ подачи при помощи круглой воронки с перегородкой для поступления разных компонентов смеси материала изучен применительно к сельскохозяйственным машинам. Лабораторное изучение зависимости схемы распределения материала от точки подачи материала на распределительное оборудование проведено в работе [46]. Показано, что изменение точки подачи материала вызывает смещение (асимметрию) зоны распределения относительно диска, что может использоваться для нивелирования отрицательного влияния на форму зоны распределения ветра или наклона машины относительно покрытия.

Данные работы направлены на создание концепции обеспечения равномерности распределения путем оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров оборудования.

Влияние точки подачи материала на процесс распределения изучено при помощи инструментов DEM в [43]. Смоделированы и численно решены уравнения движения каждой частицы с учётом их столкновений. Получены количественные данные о распределении, близкие к экспериментальным, и доказано влияние положения точки подачи материала на процесс распределения. Однако полученные результаты требуют проверки в реальных условиях эксплуатации распределителя.

Анализ имеющихся работ позволяет констатировать, что: отсутствуют модели, учитывающие комплекс факторов, влияющих на качество распределения (внешние условия, эксплуатационные, конструктивные факторы); недостаточно изучено влияние динамических процессов (вибрация распределительного оборудования, изменение скорости движения машины) на качество процесса распределения.

Большая часть работ ориентирована на сельскохозяйственное оборудование и процессы. Анализ влияния на равномерность распределения способа подачи ПГМ на диск по-прежнему является актуальной задачей исследования.

Для повышения равномерности распределения противогололёдных материалов авторами предложен симметричный способ подачи материалов на диск. Преимущества симметричного способа подачи по сравнению с традиционным несимметричным теоретически и экспериментально изучены в работе [48]. Симметричный способ подачи подразумевает одновременное поступление на каждый сектор диска одинакового количества материала в единицу времени. Это приводит к тому, что с каждой лопатки диска одновременно в воздушную среду частицы слетают с одинаковой скоростью и отлетают от центра диска на одинаковое расстояние (диск не оснащается кожухом). Данный способ позволяет повысить равномерность распределения материала при противогололёдной обработке ограниченных городских территорий (тротуары, пешеходные дорожки).

### Результаты и выводы

1. Можно выделить следующие факторы, определяющие показатели равномерности распределения ПГМ: конструктивные особенности распределительного оборудования, внешние условия (скорость ветра, завихрения воздушных потоков), физико-химические свойства распределяемого ПГМ и способ подачи материала на распределительный диск.

2. В вопросах совершенствования конструкций распределителей можно констатировать наличие высокого уровня развития бортовых систем, обеспечивающих такие показатели качества распределения, как ширина полосы обработки, направление распределения, дозировка ПГМ. Численный анализ равномерности распределения ими не осуществляется. Влияние скорости движения машины на равномерность оценивается экспериментально (в частности, при испытаниях систем с нулевой скоростью подачи ПГМ). На теоретическом уровне изучено влияние на равномерность формы сечения и размеров высевной щели на дне бункера, формы поперечного сечения лопаток, диаметра, угла наклона, высоты расположения распределительного диска. Скорость движения машины теоретически оценивается совместно со скоростью подачи материала на диск как фактор, определяющий ширину и плотность распределения частиц по покрытию. В исследованиях характерен переход от аналитических моделей к комплексному использованию методов численного моделирования, компьютерного моделирования и методов оптимизации, позволяющих учитывать конструктивные особенности машин. Остаются актуальными исследования влияния на равномерность распределения частиц ПГМ режимов работы машины в условиях многополосного движения (разгон, обгон, торможение).

3. Исследования влияния физико-химических свойств ПГМ на равномерность распределения в основном базируются на результатах, полученных для сельскохозяйственного оборудования. В сфере дорожных машин наблюдается тенденция к переходу от полевых испытаний к созданию термодинамических и гидродинамических моделей, позволяющих оптимизировать расход ПГМ. Актуально проведение более глубоких научных исследований свойств ПГМ с целью получения новых эффективных решений по устранению сводообразования ПГМ, а также с целью изучения влияния воздушных потоков и завихрений на характеристики движения частиц ПГМ. Несмотря на исследование эффективности ПГМ, определяемой химическим составом и физической их формой (частица/капля), влияющей на площадь контакта с дорожным покрытием и скорость растворения, в теоретических исследованиях, не учитывающих воздушное сопротивление среды, выводы о траекториях движения частиц могут быть некорректными при проведении экспериментов с реальными машинами. Несмотря на обширные исследования способов улучшения состава и экологичности смесей ПГМ, остается нерешённой проблема отсутствия комплексных исследований по оптимизации аэродинамических и механических характеристик ПГМ с целью улучшения равномерности распределения.

4. В сфере дорожной техники наблюдается дефицит исследований, посвящённых оценке влияния внешних условий на процесс распределения ПГМ. Результаты проанализированных исследований свидетельствуют, что отсутствие учёта внешних условий делает модели процесса распределения ПГМ неадекватными. Анализ научных работ выявил: отсутствие единых моделей, объединяющих физическое описание процесса распределения ПГМ с учётом химической эффективности материала; отсутствие единой методики определения траектории полета частиц ПГМ под влиянием внешних условий (ветер, влажность, температура среды). Для достижения высокой точности при исследовании показателей качества распределения требуется развитие двух направлений: систем точного прогнозирования траекторий частиц (на основе математических и компьютерных моделей) и систем мониторинга условий распределения в режиме реального времени.

5. В работах по изучению способа подачи материала на диск выделяются три методологических подхода: аналитическое моделирование, экспериментальные исследования и компьютерное моделирование. Анализ имеющихся работ выявляет отсутствие моделей, которые учитывают комплекс факторов, влияющих на качество распределения (внешние условия, эксплуатационные, конструктивные факторы) и недостаточную изученность влияния динамических процессов (вибрация распределительного оборудования, изменение скоростного режима движения машины) на качество процесса распределения. Имеющиеся исследования посвящены несимметричному способу подачи материала на диск. Перспективным представляется изучение альтернативных способов подачи ПГМ на диск с применением методов математического и имитационного моделирования.

#### **Список литературы**

1. A comparison study of performance and environmental impacts of chloride-based deicers and eco-label certified deicers in South Korea / B.D. Lee, Y.S. Choi, Y.G. Kim, I.S. Kim, E.I. Yang // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 143. P. 43–51. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.08.010
2. Садовникова Я.С., Павлов С.А., Погонина А.М. Обзор бортовых электронных систем управления процессом распределения противогололедных реагентов различных видов // *Грузовик*. 2019. № 9. С. 9–17.
3. Оборудование: Распределители. URL: <https://www.clearroads.org/equipment-spreaders/>. (дата обращения 14.06.2025 г.).
4. Tommy E. Nantung Evaluation of Zero Velocity Deicer Spreader and Salt Spreader Protocol // FHWA/IN/JTRP-2000/24. Final Report / Indiana Department of Transportation Joint Transportation Research Program, 2001. 83 p.
5. Patterson D.E., Reece A.R. The theory of the centrifugal distributor. I: Motion on the disc; near-centre feed // *J. Agri. Eng. Research*. 1962. No. 7 (3). P. 232–240.
6. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: Изд-во Укр. акад. с.-х. наук, 1960. 283 с.

7. Садов В.В., Сорокин С.А. Исследование траектории движения зернового материала при сходе с лопаток различной кривизны // Вестник АГАУ. 2019. №7 (177). С. 152–158.
8. On the use of optimization methods for the minimization of fertilizer application error with centrifugal spreaders / T. Virin, J. Koko, E. Piron, P. Martinet // In Proceedings of the Third International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Setúbal, Portugal, August 1–5, 2006). 2006. P. 124–129. DOI: 10.5220/0001212501240129.
9. Experimental research into uniformity in spreading mineral fertilizers with fertilizer spreader disc with tilted axis / V. Bulgakov, O. Adamchuk, S. Pascuzzi, F. Santoro, J. Olt // Agronomy Research. 2021. Vol. 19, no. 1. P. 28–41. DOI: 10.15159/AR.21.025.
10. Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate site-specific fertiliser application / E. Dintwa, E. Tijsskens, R. Olieslagers, J. De Baerdemaeker, H. Ramon // Biosystems Engineering. 2004. Vol. 88, Issue 1. P. 49–62. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.001.
11. Yildirim Y. Effect of vane number on distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders // Applied Engineering in Agriculture. 2006. Vol. 22, no. 5. P. 659–663. DOI: 10.13031/2013.21998.
12. Yildirim Y., Kara M. Effect of vane height on distribution uniformity in rotary fertilizer spreaders with different flow rates // Applied Engineering in Agriculture. 2003. Vol. 19, no. 1. P. 19–23. DOI: 10.13031/2013.12730.
13. Effect of vane shape on fertilizer distribution for a dual-disc spinner spreader / J.P. Fulton, R.K. Thaper, S.S. Virk, T. McDonald, O. Fasina // Applied Engineering in Agriculture. 2020. Vol. 36, no. 5. P. 743–751. DOI: 10.13031/aea.13634.
14. Parish R. L. Effect of impeller angle on pattern uniformity // Applied Engineering in Agriculture. 2003. Vol. 19, no. 5. P. 531–533. DOI: 10.13031/2013.15311.
15. Effects of number of vanes, vane angle and disc peripheral speed on the distribution uniformity of twin-disc granular fertilizer broadcaster / F. Kömekçi, C. Kömekçi, D. Doğu, E. Aykas // Heliyon. 2024. Vol. 10, Issue 18. e37922. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37922. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024139539>. (дата обращения 04.07.2025 г.).
16. Бурдин А.А., Сахапов Р.Л., Земдиханов М.М. Исследование влияния формы поперечного сечения лопаток и диаметра разбрасывающего диска на равномерность рассеивания противогололёдных материалов по поверхности дорожного покрытия // Техника и технология транспорта. 2019. № 1 (10). С. 2. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N10-02MSM119.pdf>. (дата обращения 10.11.2025).
17. Пенчук В.А., Клен А.Н., Диденко А.В. Влияние условий эксплуатации пескоразбрасывателя на процессы распределения противогололёдных материалов // Теорія і практика будівництва. 2013. № 11. С. 52–54.
18. Земдиханов М.М., Габдуллин Т.Р. Обоснование схемы и параметров центробежного разбрасывателя песка и реагентов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30). С. 484–489.
19. Mathematical modelling and designing of a universal conical spreader for granular material / S. Nukeshev, D. Eskhozhin, I. Mamyrbayeva et al. // Acta Technologica Agriculturae. 2023. Vol. 26, no. 3. P. 152–158. DOI: 10.2478/ata-2023-0020.
20. Giletta E. Spread unit for spreading granular material. Patent US, US 2014/0246523 A1, 2014. URL: <https://patents.google.com/patent/US20140246523A1/en>. (дата обращения 11.07.2025).
21. Scheufler B. Verfahren und vorrichtung zur ermittlung der für eine gewünschte streubreite und streumenge benötigten einstellwerte eines düngerstreuers für eine düngersorte. Patent European Patent Office, EP 0 567 495 B2, 1995. URL: <https://patents.google.com/patent/EP0567495B2/de>. (дата обращения 12.06.2025 г.).
22. Piron E., Le T.-T., Miclet D., Villette S. Procédé de réglage d'un épandeur centrifuge de particules et épandeur centrifuge de particules. Patent France, № 3 109 054, 2020. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7e/4e/3a/3a564cd428431d/FR3109054A1.pdf>. (дата обращения 12.06.2025 г.).
23. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Способ контроля и обеспечения качества противогололёдной обработки поверхности дорожного покрытия и тротуара машиной с дисковым распределителем. Патент РФ, № 2021112223, 2022.

24. Daniel B. Chebot, Wilderich A. White, Steven A. Velinsky Improved Deicing Methods for Snow and Ice Removal: Evaluation of the Epoke Sander/Spreader for Caltrans Operations // Final Report. 2015. 74 p.

25. Конгар-Оол В.В. Разработка многофункциональной транспортно-технологической машины для разбрасывания песчано-солевой смеси // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2019. № 3 (50). С. 36–40. DOI: 10.24411/2077-6896-2019-10011.

26. Analysis of the parameters of technological material sprinkling devices of special road vehicles ( $\omega\delta=\text{const}$ ): MAN CLA 18.280 4x2 BB CS45 / S. Turdibekov, U. Isoxanov, S. Shermatov, E. Abdusamatov // E3S Web of Conferences (15 July 2024). 2024. Vol. 549. P. 02016. DOI: 10.1051/e3sconf/202454902016. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/79/e3sconf\\_transsiberia2024\\_02016/e3sconf\\_transsiberia2024\\_02016.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/79/e3sconf_transsiberia2024_02016/e3sconf_transsiberia2024_02016.html). (дата обращения 01.12.2025).

27. The method of calculating the parameters of the materials delivery mechanism of the technological materials distributor / S. Turdibekov, R. Xamraqulov, N. Negmatov, Z. Raximbayev // International Scientific Forestry Forum 2024: Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions (Forestry Forum 2024). BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 145. P. 03025. DOI: 10.1051/bioconf/202414503025. URL: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/64/bioconf\\_ForestryForum2024\\_03025/bioconf\\_ForestryForum2024\\_03025.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/64/bioconf_ForestryForum2024_03025/bioconf_ForestryForum2024_03025.html). (дата обращения 10.11.2025).

28. A method of experimental study of the operation of technological material distributors / U. Isokhanov, S. Turdibekov, A. Aliyev, O. Karimov // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 587. P. 03013. DOI: 10.1051/e3sconf/202458703013 URL: [https://www.researchgate.net/publication/385651062\\_A\\_method\\_of\\_experimental\\_study\\_of\\_the\\_operation\\_of\\_technological\\_material\\_distributor\\_s](https://www.researchgate.net/publication/385651062_A_method_of_experimental_study_of_the_operation_of_technological_material_distributor_s). (дата обращения 30.11.2025)

29. Study of fertilizer spreader centrifugal type under field conditions / A.S. Kobets, N.A. Ponomarenko, O.M. Kobets et al. // INMATEH-Agricultural Engineering. 2019. Vol. 57, no. 1. P. 161–168.

30. Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertiliser particles / S.R. Cool, J.G. Pieters, J. Van Acker et al. // Biosystems Engineering. 2016. Vol. 151. P. 425–434. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.011.

31. An investigation into the fertilizerparticle dynamics off-the-disc / D.L. Antille, L. Gallar, P.C. Miller, R.J. Godwin //Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31(1). P. 49–60. DOI: 10.13031/aea.31.10729.

32. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Дитюк А. І. Модель розсіювання гранул мінеральних добрив після сходження з диска відцентрового розкидача при дії вітру // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. Харків: ХНТУСГ, 2012. Вип. 124. Т. 1. С. 27–35.

33. Structure Optimization and Performance Simulation of a Double-Disc Fertilizer Spreader Based on EDEM-CFD / M. Ou, G. Wang, Y. Lu et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15, Issue 5. P. 1025. DOI: 10.3390/agronomy15051025.

34. Портаков А.Б. Влияние физико-механических свойств удобрений на равномерность их распределения центробежным дисковым аппаратом // Вестник аграрной науки Дона. 2009. Вып. 4. С. 83–88.

35. Simulation of rotary spreader / Morsy A. Hatem, Z.I. Ismail, A.E. Abou Elmagd et al. // Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy In Agricultural Sciences (Agricultural Engineering). Egypt, Mansoura University, Department of Agricultural Engineering-Faculty of Agriculture, 2013.128 p.

36. Granular fertiliser particle dynamics on and off a spinner spreader / A. Aphale, N. Bolander, J. Park et al. // Biosystems Engineering. 2003. Vol. 85, no. 3. P. 319–329. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00062-X.

37. Simulation-based study of the influence of particle physical properties on fertilizer spreading ability / T.-T. Le, E. Piron, D. Miclet, S. Villette // Computers and Electronics in Agriculture. 2025. Vol. 229. P. 109753. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109753.

38. Yule I. The effect of fertilizer particle size on spread distribution // Adding to the Knowledge Base for the Nutrient Manager. 2011. P. 1–9.
39. Бобков А.В., Кочетков А.В., Аржанухина С.П. Влияние теплофизических характеристик противогололедных материалов на разрушение снежно-ледяных образований на автомобильных дорогах // Дороги и мосты. 2017. № 1 (37). С. 11.
40. Меренцова Г.С., Строганов Е.В. Физико-химические факторы, влияющие на улучшение технологических и экологических свойств пескосоляных смесей // Вестник ТГАСУ. 2009. № 1. С. 110–116.
41. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on Water-Ice-Salt Model / H.-C. Dan, J.-W. Tan, Y.-F. Du, J.-M. Cai // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 169. P. 102917. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102917.
42. Side-by-side field comparison of snow and ice control chemicals for anti-icing applications / K.A. Rainwater, W.D. Lawson, J.G. Surles et al. // Cold Regions Science and Technology. 2021. Vol. 184. P. 103230. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103230.
43. Gindert-Kele Á., Ancza E., Hagymási Z. Centrifugal Disc Spreading Quality as a Function of Feeding Position: Simulations and Experiments // Bulletin UASMV Agriculture. 2009. Vol. 66 (1). P. 339–343.
44. Шварц А.А., Коротков И.В. Обоснование положения пятна подачи удобрений на разбрасывающую тарелку с радиальным расположением лопастей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (93). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-93-1-107-112.
45. Портаков А.Б. Влияние формы зоны подачи на равномерность распределения смеси минеральных удобрений центробежным дисковым аппаратом // Вестник аграрной науки Дона. 2010. № 4. С. 31–35.
46. Parish R.L. Effect of an adjustable drop point on turf fertilizer spreader patterns // Applied Engineering in Agriculture. 1991. Vol. 7, no. 1. P. 5–9.
47. Experimental Study of Disc Fertilizer Spreader Performance / A. Przywara, F. Santoro, A. Kraszkiewicz et al. // Agriculture. 2020. Vol. 10(10). P. 467. DOI: 10.3390/agriculture10100467.
48. Садовникова Я.С., Мандровский К.П. Дисковый распределитель противогололёдных материалов с симметричным способом подачи: актуальность и обоснование эффективности // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 4 (67). С. 41–47.

### References

1. Lee B.D., Choi Y.S., Kim Y.G., Kim I.S., Yang E.I. A comparison study of performance and environmental impacts of chloride-based deicers and eco-label certified deicers in South Korea. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, vol. 143, pp. 43–51. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.08.010.
2. Sadovnikova Y.S., Pavlov S.A., Pogonina A.M. Overview of on-board electronic control systems for the distribution of various types of deicing reagents. *Truck*, 2019, no. 9, pp. 9–17. (In Russ.)
3. Equipment: Distributors. Available at: <https://www.clearroads.org/equipment-spreaders/> (accessed 14 June 2025).
4. Tommy E. Nantung Evaluation of Zero Velocity Deicer Spreader and Salt Spreader Protocol. FHWA/IN/JTRP-2000/24. *Final Report / Indiana Department of Transportation Joint Transportation Research Program*, 2001. 83 p.
5. Patterson D.E., Reece A.R. The theory of the centrifugal distributor. I: Motion on the disc; near-centre feed. *J. Agri. Eng. Research*, 1962, no. 7 (3), pp. 232–240.
6. Vasilenko P.M. *Teoriya dvizheniya chastits po sherokhovatoy sel'skokhozyaystvennoy tekhnike* [Theory of particle motion on rough agricultural machinery]. Kiev, 1990. 283 p.
7. Sadov V.V., Sorokin S.A. Study of the trajectory of grain material movement when leaving blades of different curvatures. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2019, no. 7 (177), pp. 152–158 (In Russ.)
8. On the use of optimization methods for the minimization of fertilizer application error with centrifugal spreaders / T. Virin, J. Koko, E. Piron, P. Martinet. *In Proceedings of the Third International Conference on Informatics in Control. Automation and Robotics* (Setúbal, Portugal, August 1–5, 2006), 2006, pp. 124–129. DOI: 10.5220/0001212501240129.

9. Experimental research into uniformity in spreading mineral fertilizers with fertilizer spreader disc with tilted axis / V. Bulgakov, O. Adamchuk, S. Pascuzzi, F. Santoro, J. Olt. *Agronomy Research*, 2021, vol. 19, no. 1, pp. 28–41. DOI: 10.15159/AR.21.025.
10. Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate site-specific fertiliser application / E. Dintwa, E. Tijskens, R. Olieslagers, J. De Baerdemaeker, H. Ramon. *Biosystems Engineering*, 2004, vol. 88, issue 1, pp. 49–62. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.001.
11. Yildirim Y. Effect of vane number on distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, vol. 22, no. 5, pp. 659–663. DOI: 10.13031/2013.21998.
12. Yildirim Y., Kara M. Effect of vane height on distribution uniformity in rotary fertilizer spreaders with different flow rates. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, vol. 19, no. 1, pp. 19–23. DOI: 10.13031/2013.12730.
13. Effect of vane shape on fertilizer distribution for a dual-disc spinner spreader / J.P. Fulton, R.K. Thaper, S.S. Virk, T. McDonald, O. Fasina. *Applied Engineering in Agriculture*, 2020, vol. 36, no. 5, pp. 743–751. DOI: 10.13031/aea.13634.
14. Parish R.L. Effect of impeller angle on pattern uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, vol. 19, no. 5, p. 531–533. DOI: 10.13031/2013.15311.
15. Effects of number of vanes, vane angle and disc peripheral speed on the distribution uniformity of twin-disc granular fertilizer broadcaster / F. Kömekçi, C. Kömekçi, D. Doğu, E. Aykas. *Heliyon*, 2024, vol. 10, issue 18. e37922. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37922. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024139539>. (accessed 04 July 2025).
16. Burdin A.A., Sakhapov R.L., Zemdikhanov M.M. Investigation of the influence of the shape of the cross-section of the blades and the diameter of the spreading disc on the uniformity of the dispersion of deicing materials on the surface of the road surface. *Transport equipment and technology*, 2019, no. 1, p. 2. Available at: <http://transport-kgasu.ru/files/N10-02MSM119.pdf>. (accessed 10 November 2025). (In Russ.).
17. PENCHUK V.A., KLEN A.N., DIDENKO A.V. Influence of the conditions of operation of the sand spreader on the processes of distribution of anti-ice materials. *Theory and practice of construction*, 2013, no. 11, pp. 52–54. (In Russ.)
18. Zemdikhanov M.M., Gabdullin T.R. Substantiation of the scheme and parameters of a centrifugal sand and reagent spreader. *Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2014, no. 4 (30), pp. 484–489. (In Russ.)
19. Mathematical modelling and designing of a universal conical spreader for granular material / S. Nukeshev, D. Eskhozhin, I. Mamyrbayeva, D. Karaivanov, A. Gubasheva, K. Tleumbetov, D. Kossatbekova, K. Tanbayev. *Acta Technologica Agriculturae*, 2023, vol. 26, no. 3. pp. 152–158. DOI: 10.2478/ata-2023-0020.
20. Giletta E. Spread unit for spreading granular material. Patent US, US 2014/0246523 A1, 2014.
21. Scheufler B. *Verfahren und vorrichtung zur ermittlung der für eine gewünschte streubreite und streumenge benötigten einstellwerte eines düngerstreuers für eine düngersorte*. Patent European Patent Office, EP 0 567 495 B2, 1995.
22. Piron E., Le T.-T., Miclet D., Villette S. *Procédé de réglage d'un épandeur centrifuge de particules et épandeur centrifuge de particules*. Patent France, No. 3 109 054, 2020.
23. Mandrovskiy K.P., Sadovnikova Y.S. *Sposob kontrolya i obespecheniya kachestva protivogolodnoy obrabotki poverkhnosti dorozhnogo pokrytiya i trotuara mashinoy s diskovym raspredelitelem* [Method for monitoring and ensuring the quality of anti-icing treatment of road surfaces and sidewalks using a machine with a disc spreader]. Patent RF, no. 2021112223, 2022.
24. Daniel B. Chebot, Wilderich A. White, Steven A. Velinsky Improved Deicing Methods for Snow and Ice Removal: Evaluation of the Epoke Sander/Spreader for Caltrans Operations. *Final Report*, 2015. 74 p.
25. Kongar-Ool V.V. Development of a multifunctional transport and technological machine for spreading sand-salt mixture. *Bulletin of the Tuva State University. Technical, physical and mathematical sciences*, 2019, no. 3 (50), pp. 36–40. (In Russ.) DOI: 10.24411/2077-6896-2019-10011.
26. Analysis of the parameters of technological material sprinkling devices of special road vehicles ( $\omega\delta=\text{const}$ ): MAN CLA 18.280 4x2 BB CS45 / S. Turdibekov, U. Isoxanov, S. Shermatov, E. Abdusa-

matov. *E3S Web of Conferences* (15 July 2024), 2024, vol. 549, p. 02016. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/79/e3sconf\\_transsiberia2024\\_02016/e3sconf\\_transsiberia2024\\_02016.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/79/e3sconf_transsiberia2024_02016/e3sconf_transsiberia2024_02016.html). (accessed 01 December 2025).

27. The method of calculating the parameters of the materials delivery mechanism of the technological materials distributor / S. Turdibekov, R. Xamraqulov, N. Negmatov, Z. Raximbayev. *International Scientific Forestry Forum 2024: Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions (Forestry Forum 2024)*. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 145, p. 03025. Available at: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/64/bioconf\\_ForestryForum2024\\_03025/bioconf\\_ForestryForum2024\\_03025.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/64/bioconf_ForestryForum2024_03025/bioconf_ForestryForum2024_03025.html). (accessed 10 November 2025).

28. A method of experimental study of the operation of technological material distributors / U. Isokhanov, S. Turdibekov, A. Aliyev, O. Karimov. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 587, p. 03013. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/385651062\\_A\\_method\\_of\\_experimental\\_study\\_of\\_the\\_operation\\_of\\_technological\\_material\\_distributors](https://www.researchgate.net/publication/385651062_A_method_of_experimental_study_of_the_operation_of_technological_material_distributors). (accessed 30 November 2025).

29. Study of fertilizer spreader centrifugal type under field conditions / A.S. Kobets, N.A. Ponomarenko, O.M. Kobets, H.V. Tesliuk, M.M. Kharytonov, V.M. Yaropud. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 161–168.

30. Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertiliser particles / S.R. Cool, J.G. Pieters, J. Van Acker, J. Van Den Bulcke, K.C. Mertens, D.R.E. Nuyttens, T.C. Van De Gucht, J. Vangeyte. *Biosystems Engineering*, 2016, vol. 151, pp. 425–434. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.011.

31. An investigation into the fertilizerparticle dynamics off-the-disc / D.L. Antille, L. Gallar, P.C. Miller, R.J. Godwin. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, vol. 31(1), pp. 49–60. DOI: 10.13031/aea.31.10729.

32. Loveikin V.S., Chovnyuk Yu.V., Dytyuk A.I. Model of dispersion of mineral fertilizer granules after descending from the disk of a centrifugal spreader under the action of wind. *Bulletin of KhNTUA: Mechanization of Agricultural Production*. Kharkiv, 2012, iss. 124, vol. 1, pp. 27–35. (In Ukr.)

33. Structure Optimization and Performance Simulation of a Double-Disc Fertilizer Spreader Based on EDEM-CFD / M. Ou, G. Wang, Y. Lu, Z. Zhang, H. Pan, W. Jia, X. Dong. *Agronomy*, 2025, vol. 15, issue 5, p. 1025. DOI: 10.3390/agronomy15051025.

34. Portakov A.B. The effect of physico-mechanical properties of fertilizers on the uniformity of their distribution by a centrifugal disk device. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*, 2009, iss. 4, pp. 83–88. (In Russ.)

35. Simulation of rotary spreader / Morsy A. Hatem, Z.I. Ismail, A.E. Abou Elmagd, H.S. Hedia, J. Paliwal. *Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy In Agricultural Sciences (Agricultural Engineering)*. Egypt, Mansoura University, 2013. 128 p.

36. Aphale A., Bolander N., Park J., Shaw L., Svec J., Wassgren C. Granular fertiliser particle dynamics on and off a spinner spreader. *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 85, no. 3, pp. 319–329. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00062-X.

37. Le T.-T., Piron E., Miclet D., Villette S. Simulation-based study of the influence of particle physical properties on fertilizer spreading ability. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, vol. 229, pp. 109753. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109753.

38. Yule I. The effect of fertilizer particle size on spread distribution. *Adding to the Knowledge Base for the Nutrient Manager*, 2011, pp. 1–9.

39. Bobkov A.V., Kochetkov A.V., Arzhanukhina S.P. Influence of thermophysical characteristics of deicing materials on the destruction of snow and ice formations on highways. *Roads and bridges*. 2017, no. 1 (37), p. 11. (In Russ.)

40. Merentsova G.S., Stroganov E.V. Physicochemical factors influencing the improvement of technological and environmental properties of sand-salt mixtures. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2009, no. 1, pp. 110–116. (In Russ.)

41. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on Water-Ice-Salt Model / H.-C. Dan, J.-W. Tan, Y.-F. Du, J.-M. Cai. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, vol. 169, p. 102917. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102917.

42. Side-by-side field comparison of snow and ice control chemicals for anti-icing applications / K.A. Rain-water, W.D. Lawson, J.G. Surlles, F.J. Estrada, W.A. Jackson. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, vol. 184, p. 103230. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103230.

43. Gindert-Kele Á., Ancza E., Hagymási Z. Centrifugal Disc Spreading Quality as a Function of Feeding Position: Simulations and Experiments. *Bulletin UASMV Agriculture*, 2009, vol. 66 (1), pp. 339–343.

44. Shvarts A.A., Korotkov I.V. Justification of the position of the fertilizer delivery spot on a spreading plate with a radial arrangement of blades. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 2022, no. 1 (93). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-93-1-107-112. (In Russ.)

45. Portakov A.B. The influence of the shape of the feed zone on the uniformity of distribution of a mixture of mineral fertilizers by a centrifugal disk apparatus. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*, 2010, no. 4, pp. 31–35. (In Russ.)

46. Parish R.L. Effect of an adjustable drop point on turf fertilizer spreader patterns. *Applied Engineering in Agriculture*, 1991, vol. 7, no. 1, pp. 5–9.

47. Experimental Study of Disc Fertilizer Spreader Performance / A. Przywara, F. Santoro, A. Kraszkiewicz, A. Pecyna, S. Pascuzzi. *Agriculture*, 2020, vol. 10(10), p. 467. DOI: 10.3390/agriculture10100467.

48. Sadovnikova Y.S., Mandrovskiy K.P. Disc distributor of anti-icing materials with a symmetrical feeding method: relevance and justification of effectiveness. *Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*, 2021, no. 4 (67), pp. 41–47. (In Russ.).

#### ***Информация об авторах***

**Мандровский Константин Петрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных машин», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия; effectmash@mail.ru

**Садовникова Яна Сергеевна**, специалист по испытаниям, ООО «Эксперт-Центр», Москва, Россия; jana.sadovnikova@yandex.ru

#### ***Information about the authors***

**Konstantin P. Mandrovskiy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production and Repair of Automobiles and Road Construction Machinery, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia; effectmash@mail.ru

**Yana S. Sadovnikova**, testing specialist, Expert Center LLC, Moscow, Russia; jana.sadovnikova@yandex.ru

***Статья поступила в редакцию 18.04.2026; принята к публикации 19.04.2026.***

***The article was submitted 18.04.2026; accepted for publication 19.04.2026***