

Техника и технология транспорта: научный Интернет-журнал <http://www.transport-kgasu.ru>  
2019. № 2 (12) [http://transport-kgasu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10&Itemid=2](http://transport-kgasu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=2)  
URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N12-05KN219.pdf>

Статья опубликована 25.06.2019

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Моделирование равномерности распределения реагента при различном ветровом воздействии // Техника и технология транспорта. 2019. № 2 (12). С. 5. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N12-05KN219.pdf>

УДК 625.76.08

**Мандровский К.П.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: effectmash@mail.ru

**Садовникова Я.С.** – инженер

E-mail: jana.sadovnikova@yandex.ru

**Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия**

### **Моделирование равномерности распределения реагента при различном ветровом воздействии**

#### **Аннотация**

Цель работы заключается в изучении равномерности распределения жидкого реагента и разработке предложений по обеспечению качества обработки покрытий. В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование процесса распределения капель. Изучаемый вид распределительного оборудования представляет собой вращающийся диск (тарелку) с лопатками, на который поступает с помощью форсунок жидкий реагент. В работе предложены математические модели движения капель противогололёдного реагента в воздушной среде. Исследован характер изменения равномерности распределения реагента при варьируемых направлениях и скорости ветра. Выработаны рекомендации по обеспечению качества нанесения реагента на покрытие. Результаты работы рекомендуется использовать при выборе и назначении оптимальных режимов работы распределительного оборудования с целью повышения качества противогололёдной обработки покрытий при различном ветровом воздействии.

**Ключевые слова:** противогололёдный реагент (ПГР), капля ПГР, равномерность распыления, зона обработки, скорость и направление ветра.

#### **Введение**

Решение вопроса о равномерности распыления ПГР достигается работой по трём основным направлениям: совершенствование конструкции рабочего оборудования машин для распределения реагентов, рациональная организация работ по нанесению ПГР и применение правильно подобранного типа реагентов с учётом метеорологических условий и характеристик покрытий.

В работах [1, 2] приведены результаты анализа влияния конструктивных параметров рабочего оборудования на равномерность нанесения ПГР.

В ряде патентов [3, 4] изложены предложения по модернизации распределительного оборудования и внедрению систем управления и контроля технологических процессов обработки покрытий твёрдым реагентом. Методы и способы управления равномерностью распыления жидкого реагента по заданной ширине полосы представлены в [5,6].

Попытки учёта организационных и технологических факторов при решении проблемы неравномерности привели к необходимости создания и применения мониторинговых систем, аналогичных рассмотренным в работе [7]. Их наличие и функционирование позволит проводить противогололёдную обработку параллельно с контролем параметров окружающей среды.

В вышеперечисленных работах приводятся предложения по снижению вероятности образования неравномерного слоя ПГР на обрабатываемом покрытии за счёт применения

более сложных схем и конструкций разбрасывателей и оснащения машин системами слежения, регулировки и контроля над операцией по противогололёдной обработке. Их существенный недостаток состоит в отсутствии математического анализа причин возникновения неравномерности и невозможности аналитическим путём выявить степень и характер воздействия различных факторов на неё. В частности, недостаточно изучена зависимость неравномерности распределения реагента от ветрового воздействия на зону обработки покрытия.

### 1. Постановка задачи

Необходимо разработать математические модели процесса распыления ПГР с целью определения конструктивных и эксплуатационных факторов, приводящих к неравномерности оседания ПГР на поверхности дорожного и аэродромного покрытий. Эти же модели будут являться инструментом аналитического и численного анализа действия параметров рабочего оборудования и окружающей среды на степень неравномерности. Результаты исследований и расчётов будут положены в основу математического и программного обеспечения системы контроля и обеспечения качества распределения жидких реагентов. В данной работе на базе разработанной математической модели движения капель в воздушной среде будет рассмотрено влияние ветрового воздействия (скорость и направление ветра) на равномерность распределения реагента. Математическая модель будет являться развитием исследований процесса распределения капель реагента, представленных в работах [8, 9].

### 2. Математическая модель движения капли ПГР в воздушной среде

В момент слёта с диска (рис. 1, 2), и при дальнейшем движении капли в воздушной среде на неё действуют: сила тяжести, сила сопротивления воздушной среды и подъемная сила, направленная противоположно силе тяжести.



Рис. 1. Диск для распределения жидкого реагента

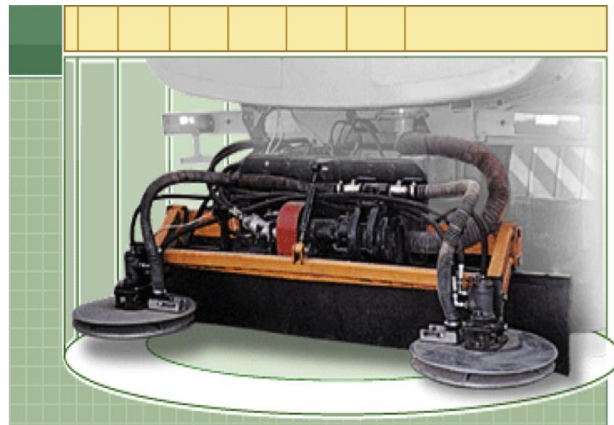


Рис. 2. Вариант двухдискового распределительного оборудования

С учётом действия вышеназванных сил уравнение движения капли в проекции на ось  $Y$  примет вид:

$$m \cdot a_Y = m \cdot g - \rho_1 \cdot v_k \cdot g - k \cdot v, \quad (1)$$

где  $m$  – масса капли жидкого ПГР, кг;

$a_Y$  – ускорение капли,  $m/c^2$ ;

$\rho_1$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ;

$k$  – коэффициент сопротивления среды,  $кг/с$ ;

$v$  – скорость капли ПГР в момент слета с диска,  $м/с$ ;

$v_k$  – объем капли,  $м^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ . В конечный момент времени, когда капля достигнет покрытия, значение координаты  $Y$  должно быть равным нулю.

В начальный момент значение координаты по этой оси равно высоте диска над покрытием [10].

В разные моменты времени капли будут покидать диск, слетая с него под некоторым углом  $\beta$  (рис. 3).

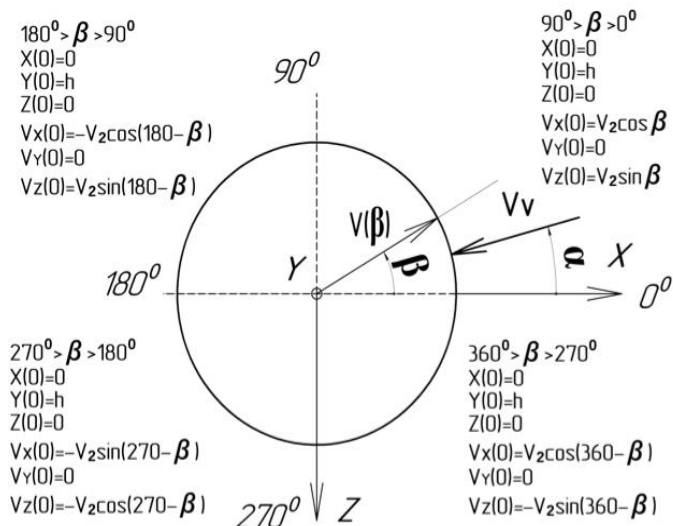


Рис. 3. Схема направления векторов начальной скорости капли ПГР при слете с диска и действующих на неё сил

По мере изменения угла слета капли с диска меняются начальные условия, знание которых необходимо для решения дифференциальных уравнению движения капель в воздушной среде. На рис. 3 показан характер изменения начальных координат  $X(0)$ ,  $Y(0)$ ,  $Z(0)$  и скоростей  $V_x(0)$ ,  $V_y(0)$ ,  $V_z(0)$  капли по соответствующим осям. Ось  $X$  направлена перпендикулярно направлению движения машины, ось  $Z$  параллельна ему.

При учете движения машины следует принять во внимание возникновение сопротивления дополнительному воздушному потоку:

$$V_{vm} = k \cdot V_m,$$

где  $V_m$  – скорость движения машины.

Проецируя все силы на ось  $X$  получим:

$$m \cdot a_x = k(V_x - V_v \cos \alpha). \quad (2)$$

Рассмотрим движение капель в плоскости  $ZY$ . Уравнение движения в проекции на ось  $Z$  примет вид:

$$m \cdot a_z = k(V_z - V_v \sin \alpha - V_m). \quad (3)$$

### 3. Влияние ветровой нагрузки на равномерность распределения реагентов

Оценку равномерности можно осуществлять через показатель количества жидкого реагента (массы или объёма), приходящегося на единицу площади покрытия.

Используя полученные математические модели (уравнения 1-3), проследим, как будет меняться плотность распределения ПГР при разных скоростях и направлениях ветра.

Скорость машины и режим работы диска при этом будут неизменными.

Расчёт будет проводиться в предположении, что осуществляется обработка покрытий с целью предотвращения возникновения гололёда.

Норма удельного расхода реагента при нормальных условиях ( $V_v=0$ ) и назначенной ширине полосы обработки этом составляет  $q_n=0.3$  л/м<sup>2</sup>. Зная её величину при безветрии, можно определить объём жидкого ПГР, распределяемого по зоне, имеющей форму круга.

Варьирование скорости и направления ветра будет приводить к деформации зоны обработки (рис. 4), то есть к изменению её площади.

Условно разделив эту площадь на зону I – сектор, образуемый дугой в диапазоне значений  $\beta=0^\circ \dots 180^\circ$  и зону II – сектор, расположенный в диапазоне  $\beta=180^\circ \dots 360^\circ$ , получим плотность распыления капель при различных условиях (табл. 1).

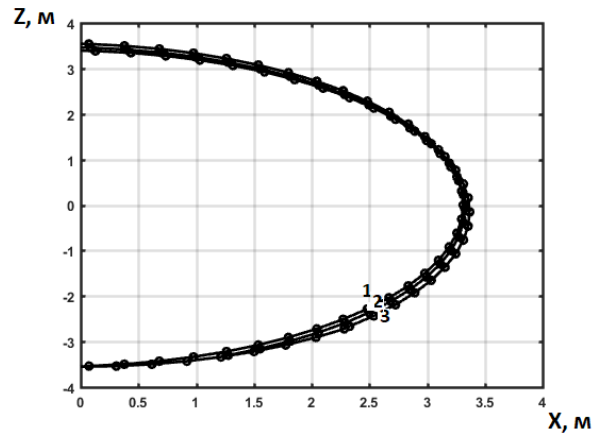


Рис. 4. Деформация зоны обработки при изменении скорости и направления ветра:  
1– $\alpha=0$  град., 2– $\alpha=20$  град., 3– $\alpha=40$  град

Таблица 1

Изменение плотности нанесения реагента по зонам  $q_p$  (л/м<sup>2</sup>) при нормированном удельном расходе  $q_n=0.3$  л/м<sup>2</sup>

$V_v$ (м/с)	$\alpha$ (град.)	0	20	40	-20
	зона				
0	I, II	0,300	0,300	0,300	0,300
3	I	0,280	0,305	0,319	0,309
	II	0,280	0,279	0,260	0,279
6	I	0,290	0,309	0,315	0,309
	II	0,290	0,287	0,266	0,285
9	I	0,330	0,330	0,352	0,336
	II	0,330	0,311	0,291	0,311
12	I	0,340	0,354	0,368	0,353
	II	0,340	0,329	0,303	0,328

Изменение значений плотности будет свидетельствовать о появлении неравномерности в расположении капель реагента по обрабатываемой площади. Рассчитанная плотность распыления ПГР по всей зоне обработки представлена в табл. 2.

Таблица 2

Плотность нанесения реагента на покрытие  $q_p$  (л/м<sup>2</sup>) при нормированном расходе  $q_n=0.3$  л/м<sup>2</sup>

$\alpha$ (град.)	0	20	40	-20
$V_v$ (м/с)				
0	0,300	0,300	0,300	0,300
3	0,280	0,292	0,289	0,294
6	0,290	0,298	0,291	0,297
9	0,330	0,321	0,322	0,324
12	0,340	0,342	0,336	0,341
15	0,360	0,351	0,344	0,351

#### 4. Выводы и результаты

1. При увеличении силы ветра от 3 м/с до 15 м/с степень неравномерности увеличивается. Максимальная величина отклонения наблюдается при  $V_v=12...15$  м/с и составляет 0,036...0,055 л/м<sup>2</sup> (табл. 2).

2. При скорости ветра от 0 до 6 м/с увеличивать подачу реагента для достижения заданной нормы расхода не требуется, при  $V=9...15$  м/с количество подаваемого реагента надо уменьшать. Это вызвано деформацией зоны обработки с ростом силы ветра и неравномерным перераспределением капель по зонам I и II.

3. При фиксированной скорости ветра и различных его направлениях наблюдается характерная зависимость: с увеличением угла  $\alpha$  степень отклонения возрастает.

4. Максимальная величина отклонения для двух зон при  $V_v=12$  м/с и 15 м/с и  $\alpha=40$  град. равна  $0,065$  л/м<sup>2</sup> и  $0,049$  л/м<sup>2</sup> соответственно (табл. 2). Следовательно, необходимо уменьшать количество подаваемого реагента для сохранения нормы расхода. В качестве альтернативного решения возможно изменения угла наклона распределительного диска для устранения деформации зоны.

### Заключение

В статье осуществлено моделирование изменения равномерности распределения жидкого реагента по покрытию при варьируемой скорости и направлении ветра. Затронутая проблема равномерности распределения реагента является не до конца решенной и требует поиска подходов, учитывающих экологические свойства реагентов, конструктивные, геометрические параметры распределительного оборудования, а также эксплуатационных факторов, к числу которых относится ветровая нагрузка. На данный момент результаты исследований актуальны при выборе режимов работы распределительного оборудования и машин для нанесения противогололедных реагентов для различных условий окружающей среды.

Своевременная адаптация к погодным условиям позволит добиться рационального расходования реагента и эффективности процесса противогололедной обработки.

### Список библиографических ссылок

1. Чилингарян Н.О. Обоснование размеров скребков тарельчатого дозатора // Вклад молодых ученых в аграрную науку: сборник трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО Самарской ГСХА. Самара: Издательство Самарской ГСХА, 2014. – С. 111-114.

2. Земдиханов М.М., Габдуллин Т.Р. Обоснование схемы и параметров центробежного разбрасывателя песка и реагентов // Известия КГАСУ. – 2014. – №4 (30). – С. 484-489.

3. Луканов Н.И. Устройство автоматического дозирования химических реагентов при нанесении их на поверхность искусственного покрытия // Патент России №2487971. 2013. Бюл. № 20. 9 с.

4. Белоцерковский Г.М., Ахрамеев Э. В., Карякин С. Б. Способ обеспечения работы системы управления рабочим процессом мобильного распределителя материалов для обработки дорожных покрытий и устройство управления рабочим процессом мобильного распределителя материалов // Патент России № 2398929. 2010. Бюл. № 25. 12 с.

5. Автоматизированная система управления коммунальной дорожной машиной. Распределение жидких противогололедных реагентов. URL: [www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatelya-asu2c](http://www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatelya-asu2c) (дата обращения: 11.05.2019).

6. Марсов В.И., Селезнев В.С. Применение адаптивной системы управления дозаторами непрерывного действия для экономичного распределения противогололедных материалов // "Новые материалы и технологии в машиностроении - 2017": материалы 25-ой Международной научно-технической конференции. – М., 2011. – С. 91-93.

7. Мандровский К.П. Системы мониторинга дорожно-строительных, транспортных машин и дорожных покрытий // ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2015: материалы международной научно-технической конференции. – Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С.310-315.

8. Mandrovskiy K.P., Sadovnikova Y.S. Characteristics of the droplet motion of a liquid antifreeze reagent // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 03. – Pp. 14–26. doi: 10.18720/MCE.79.2

9. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Уточнение характеристик движения жидкого реагента по диску при распылении форсункой // Интерстроймех–2018: сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции. – М.: Издательство МГСУ, 2018. – С. 110-114.

10. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Моделирование равномерности обработки покрытий противогололедным жидким реагентом // Математическое моделирование. – 2019. – Т.31. – №3. – С.41-54.

**Mandrovskiy K.P.** – candidate of technical sciences, assistant professor

E-mail: effectmash@mail.ru

**Sadovnikova Y.S.** – engineer

E-mail: jana.sadovnikova@yandex.ru

**Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia**

### Simulation of the uniform distribution of the reagent at different wind exposure

#### Abstract

The aim of the work is to study the uniform distribution of the liquid reagent and to develop proposals for ensuring the quality of coating treatment. As a research method, mathematical modeling of the droplet distribution process was chosen. The studied type of distribution equipment is a rotating disk (plate) with blades, to which a liquid reagent is supplied by means of nozzles. The paper proposed a mathematical model of the movement of anti-icing agent droplets in air. The nature of the change in the uniform distribution of the reagent with varying directions and wind speed is investigated. Developed recommendations for ensuring the quality of the application of the reagent to the coating. The results of the work are recommended to be used when choosing and appointing the optimal operating modes of the distribution equipment in order to improve the quality of the anti-ice treatment of coatings under various wind effects.

**Keywords:** anti-icing reagent (AR), AR drop, uniform spraying, treatment area, wind speed and direction.

#### Reference list

1. Chilingaryan N. Oh. Substantiation of the size of scrapers of the Poppet dispenser // Contribution of young scientists to agricultural science: proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the SAMARA state agricultural Academy. Samara: Publishing house of the Samara state agricultural Academy, 2014. – P. 111-114.
2. Zemlyanov M. M., Gabdullin T. R. Rationale of the scheme and parameters of a centrifugal spreader, sand and chemicals // Izvestiya kgasu. – 2014. – №4 (30). – P. 484-489.
3. Lukanov N. So. The device of automatic dosing of chemical reagents when applying them to the surface of an artificial coating // Patent of Russia №2487971. 2013. Bul. No. 20. 9 p.
4. Belotserkovsky G. M., Akhrameev E. V., Karyakin S. B. the Method of ensuring the operation of the process control system of the mobile distributor of materials for the treatment of road surfaces and the process control device of the mobile distributor of materials // Patent of Russia № 2398929. 2010. Bul. No. 25. 12 p.
5. Automated control system of municipal road machine. Distribution of liquid anti-icing agents. URL: [www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatelya-asi2c](http://www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatelya-asi2c) (reference date: 11.05.2009).
6. Marsov V. I., Seleznev V. S. Application of adaptive control system of continuous dosing for economical distribution of anti-icing materials // "New materials and technologies in mechanical engineering - 2017": proceedings of the 25th International scientific and technical conference. – M., 2011. – P. 91-93.
7. Mankowski K. P. monitoring System of road construction, vehicles and roads // INTERSTROYMEH – 2015: materials of international scientific-technical conference. – Kazan: Kazan state University of architecture and civil engineering, 2015. – P. 310-315.
8. Mandrovskiy K. P., Sadovnikova Y. S. Characteristics of the droplet motion of a liquid antifreeze reagent // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 03. – P. 14-26. doi: 10.18720/MCE.79.2
9. Mankowski K. P., Sadovnikov Y. S. correction of the characteristics of motion of the liquid reagent on the disk during the spraying nozzle // Interstroyemeh–2018: a collection of reports of the XXI International scientific-technical conference. – M: Publishing house MGSU, 2018. – P. 110-114.
10. Mankowski K. P., Sadovnikov Y. a simulation of a uniform coating of anti-icing liquid reagent // Mathematical modeling. – 2019. – Vol. 31. – №3. – P. 41-54.