

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЙ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫМ ЖИДКИМ РЕАГЕНТОМ

© 2019 г. *К.П. Мандровский, Я.С. Садовникова*

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) effectmash@mail.ru, jana.sadovnikova@yandex.ru

DOI: 10.1134/S0234087919030031

Целью статьи является изучение равномерности обработки покрытий жидким противогололёдным реагентом при помощи математических методов. Задача представленного в статье моделирования состоит в формировании основных принципов разработки математического и программного обеспечения мониторинговой системы дорожных и аэродромных машин для распределения реагентов. Для этого предложена математическая модель движения капель жидкого противогололёдного реагента в воздушной среде, учитывающая действие ветра, а также физические свойства рассматриваемой среды. На её основе разработан оригинальный программный код в среде QtOctave. С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние высоты установки рабочего органа машины – распределительного диска – на плотность распыления реагента. С использованием возможностей программного продукта QtOctave показана графическая зависимость равномерности распределения капель по длине обрабатываемой зоны от скорости ветра. Выявлен характер влияния направления движения воздушных масс на появление неравномерности в оседании капель реагента на покрытии. Представлен график и результаты расчетов, подтверждающие отсутствие связи между частотой вращения приводного вала диска и отклонением от равномерности распределения капель в процессе противогололёдной обработки аэродромных и дорожных покрытий. Полученные численные и аналитические результаты следует использовать в работе мониторинговых систем, главное назначение которых заключается в обеспечении равномерного распыления реагента с заданными дальностью и расходом.

Ключевые слова: математическое моделирование, компьютерное моделирование, противогололёдный реагент, капля противогололёдного реагента (ПГР), равномерность нанесения противогололёдного реагента (ПГР), программный продукт QtOctave, зона распределения.

MODELING OF UNIFORMITY OF TREATMENT OF COATINGS WITH ANTI-ICING LIQUID REAGENT

K.P. Mandrovskiy, Y.S. Sadovnikova

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

The aim of the article is to study the uniformity of coating treatment with a liquid anti-icing reagent using mathematical methods. The task of the modeling presented in the article is to formulate the basic principles for the development of mathematical and soft-

ware monitoring systems for road and airfield machines for the distribution of reagents. To this end, a mathematical model for the motion of droplets of liquid anti-icing reagent in the air, taking into account the effect of the wind, as well as the physical properties of the medium under consideration is proposed. On its basis, the original program code is developed in the QtOctave environment. With the help of computer simulation, the influence of the height of the installation of the working part of the machine – the distribution disk – on the density of the spraying of the reagent was investigated. Using the capabilities of the software product QtOctave, the graphical dependence of the uniformity of the droplet distribution on the length of the treated zone on the wind speed is shown. The nature of the influence of the direction of motion of the air masses on the appearance of irregularity in the settling of the reagent drops on the coating is revealed. The graph and the results of calculations are presented confirming the absence of a connection between the rotational speed of the drive shaft of the disk and the deviation from the uniformity of the distribution of droplets in the process of anti-ice treatment of aerodrome and road surfaces. The obtained numerical and analytical results should be used in the work of monitoring systems, the main purpose of which is to ensure uniform dispersion of the reagent with a given range and flow rate.

Key words: mathematical modeling, computer simulation, anti-icing reagent, drop of anti-icing reagent (AR), uniform application of anti-icing reagent (AR) application, software product QtOctave, distribution zone.

1. Введение

Бурное развитие информационных технологий, наблюдаемое в настоящее время, приводит к постоянному совершенствованию дорожных, аэродромных и технологических машин. Наряду с разработками по повышению качества и производительности [1], известны работы, предлагающие методы и способы осуществления непрерывного контроля функционирования машин. К ним относятся описанные в [2, 3] системы контроля рабочего цикла машин, основы создания и внедрения мониторинговых систем дорожных машин [4–6], а также комплексные системы контроля для непрерывной работы с информацией о дорожных условиях, оказывающих влияние на эффективность работы объектов дорожного хозяйства [7]. Однако большинство предложений и разработок относятся к коммунальным, дорожным и специализированным военным транспортным средствам. Что касается машин для содержания аэродромов, в частности, распределителей противогололёдных реагентов (ПГР), можно назвать российский патент [8], в котором обоснована возможность и целесообразность создания и применения устройства автоматического дозирования химических реагентов. Цель описанных в нем модернизаций – автоматическое дозирование ПГР в зависимости от состояния покрытия и обеспечиваемая экономия реагента. Известна также запатентованная система управления мобильным распреде-

лителем противогололедных материалов [9], отличающаяся универсальностью, надежностью и позволяющая работать с разными видами ПГР. Оба патента нацелены на повышение точности дозирования. Недостатком вышеупомянутых технических исследований и решений является их адаптированность к работе с твердыми противогололедными реагентами, но в реальных условиях наиболее распространены жидкие ПГР как наиболее эффективные и экологичные. Кроме того, малоизученной остается проблема возникновения неравномерности нанесения жидких ПГР на покрытия. В сфере дорожного строительства этот вопрос рассмотрен в [10]. В области сельскохозяйственной техники справедливо отметить работы [11,12]. Применительно к аэродромной технике можно назвать близкие к этой тематике исследования по моделированию систем управления гидравлическим оборудованием [13,14], которые дают возможность регулировать дозирование жидкого реагента и оказывать влияние на равномерность обработки покрытий. Теоретическое обоснование выбора схем, параметров и режимов функционирования рабочих органов распределителей твердых реагентов предложено в [15-17]. Суть данных исследований и расчетов – выявление зависимости степени равномерности нанесения реагента на покрытия от основных конструктивных и эксплуатационных параметров распределительного оборудования. Опираясь на имеющиеся предложения по созданию и внедрению мониторинговых систем и приведенные выше работы, возможно сгенерировать программное обеспечение именно для распределителей жидких ПГР. Таким образом, можно осуществлять сбор, анализ данных о характеристиках рабочего оборудования и внешней среды и использовать их для расчета оптимальных параметров процесса противогололедной обработки. Результаты расчета будут применены для выбора тех режимов эксплуатации машины, схем расположения и технических характеристик распределительного оборудования, которые обеспечат заданную ширину обрабатываемой полосы и равномерность нанесения ПГР. Для этого необходимо создать математические модели движения капель ПГР в процессе их распыления. После этого с помощью компьютерного моделирования выявить и изучить те факторы и параметры, которые оказывают существенное влияние на равномерность нанесения ПГР на покрытия. Так будет сформирована основа для математического и программного обеспечения мониторинговой системы распределителя реагентов. Эффективность её заключается в учете всех эксплуатационных и конструктивных факторов, влияющих на качество распыления ПГР и возможности корректировки работы машины непосредственно в процессе выполнения ею рабочего цикла.

2. Реализация этапа математического моделирования движения капли реагента в воздушной среде

При разработке модели принимается *допущение* того, что распыляемая жидкость состоит из совокупности сферических капель. В момент слета капли с диска и при дальнейшем движении в воздушной среде на каплю действуют: сила тяжести \mathbf{G} , так как капля находится вблизи земной поверхности, сила сопротивления воздушной среды \mathbf{F}_v и подъемная сила \mathbf{R} , направленная противоположно силе тяжести [18]. На схеме условно указан вектор скорости ветра \mathbf{V}_v , действующий в плоскости XZ и направленный под некоторым углом α к оси X . Сила тяжести определяется по формуле $\mathbf{G} = m \cdot \mathbf{g}$, подъемная сила, являющаяся частью полной аэродинамической силы, равна $\mathbf{R} = \rho_1 \cdot V_k \cdot \mathbf{g}$, где V_k – объем капли, м^3 ; ρ_1 – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Сила сопротивления воздушной среды характеризует её вязкостные свойства и вычисляется по формуле $\mathbf{F}_v = k \cdot \mathbf{v}$, где $v = V$ – скорость капли ПГР в момент слета с диска, $\text{м}/\text{с}$; k – коэффициент сопротивления среды, $\text{кг}/\text{с}$. Эта величина зависит от динамической вязкости среды и геометрической формы движущегося в ней тела. Для тел сферической формы $k = 6\pi \cdot R \cdot \eta$ [19], где R – радиус капли, м ; η – коэффициент динамической вязкости среды, $\text{кг}/\text{мс}$. Эта величина является справочной и рассчитывается в зависимости от температуры среды.

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса тела равно сумме сил, действующих на него. Тогда уравнение движения капли в проекции на ось Y примет вид

$$m \frac{dv_Y}{dt} = m \cdot \mathbf{g} - \rho_1 \cdot v_k \cdot \mathbf{g} - k \cdot \mathbf{v}, \quad (1)$$

где m – масса капли жидкого ПГР, кг ; dv_Y/dt – ускорение капли, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ_1 – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$. Начальные условия для решения дифференциального уравнения: $Y(0) = H$, $V_Y(0) = 0$, $t = 0$.

Решение уравнения имеет вид

$$Y = \frac{g(m - \rho_1 \cdot v_k)(m - m \cdot \exp(k \cdot t / m) + k \cdot t \cdot \exp(k \cdot t / m))}{k^2 \cdot \exp(k \cdot t / m)}, \quad (2)$$

$$\frac{dY}{dt} = \frac{g(m - \rho_1 \cdot v_k)(\exp(k \cdot t / m) - 1)}{k \cdot \exp(k \cdot t / m)}, \quad (3)$$

где Y – координата капли в проекции на ось Y , м . В начальный момент времени t она принимается равной нулю; dY/dt – первая производная от координаты Y по времени, т.е. скорость капли, $\text{м}/\text{с}$; t – время движение капли, сек ; V_k – объем капли, м^3 .

В конечный момент рассматриваемого промежутка 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. В разные моменты времени капли будут покидать диск, слетая с него под некоторым углом β . Используя этот угол и разложив вектор начальной скорости по ортогональному базису, можно получить проекции вектора начальной скорости капли на оси X, Y, Z (рис. 1).

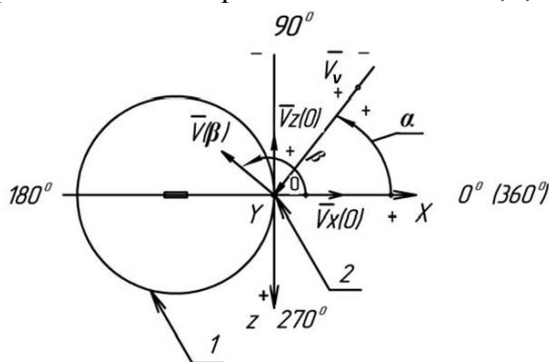


Рис.1. Схема направления вектора начальной скорости капли ПГР при слете с диска.

На схеме показаны: 1 – распределительный диск, 2 – капля ПГР, β – угол слета капли ПГР с диска, $V(\beta)$ – вектор начальной скорости капли при слете с диска под углом β , V_v – вектор скорости ветра, направленный под углом α к оси X , $V_x(0)$ – вектор начальной скорости капли в момент слета с диска под углом 0° к оси X , $V_z(0)$ – вектор начальной скорости капли в момент слета с диска под углом 0° к оси Z , $V_y(0)$ – вектор начальной скорости капли в момент слета с диска под углом 0° к оси Y .

Угол β отсчитывается от оси X в плоскости XZ против часовой стрелки. При изменении его значения с произвольно выбранным шагом получим проекции вектора начальной скорости $V(\beta)$ на оси X и Z . Проекция вектора на ось Y , лежащую в перпендикулярной плоскости, будет равна нулю. При изучении движения капли в воздушной среде можно выделить четыре расчетных случая: случай I – значение угла $\beta = 0^\circ \dots 90^\circ$ и $\beta = 270^\circ \dots 360^\circ$, II – значение угла $\beta = 90^\circ \dots 270^\circ$, III – значение угла $\beta = 0^\circ \dots 180^\circ$, IV – значение угла $\beta = 180^\circ \dots 360^\circ$. При изменении угла β от 0° до 360° меняются значения начальных скоростей капель реагента в разложении на оси выбранной системы координат и, следовательно, изменяются значения перемещений капель по осям X, Y, Z . Чтобы учесть влияние ветра на движущуюся каплю, используем расчетную схему, представленную на рис.1. На рисунке изображено положение капли реагента в плоскости XZ с указанием векторов скорости

капли \mathbf{V}_X и \mathbf{V}_Z . Рассмотрим перемещение капли относительно оси X . В этом случае возможно два варианта: движение в сторону положительного направления оси X и в сторону отрицательного направления. В обоих случаях действуют силы сопротивления воздушной среды. Поток ветра, условно обозначенный вектором \mathbf{V}_v и определяемый скоростью и направлением ветра, будет уменьшать значение скорости капли, если она движется в наветренной зоне, и увеличивать его, если капля находится в подветренной зоне.

Подветренная зона – зона, на которую ветер не оказывает воздействия, то есть $\mathbf{V}_v=0$. Сила сопротивления воздушной среды направлена противоположно вектору скорости капли и действует одинаково во всех направлениях. Проецируя все силы на ось X , получим: для I и II расчетного случая:

$$m \frac{d\mathbf{V}_X}{dt} = k(\mathbf{V}_X - \mathbf{V}_v \cos \alpha). \quad (4)$$

Если капля движется в подветренной зоне, уравнение движения примет вид

$$m \frac{d\mathbf{V}_X}{dt} = k \cdot \mathbf{V}_X. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (4) с начальными условиями $V_x(0)=V \cos(0)$ – скорость капли в начальный момент времени, $X(0)=0$ – координата капли по оси X в начальный момент времени, будет иметь вид

$$X = \frac{m(V_v \cos \alpha - V)}{k} + V_v \cdot t \cdot \cos \alpha - \frac{m \cdot \exp(k \cdot t / m)(V_v \cos \alpha - V)}{k}, \quad (6)$$

$$\frac{dX}{dt} = V_v \cos \alpha - \exp(k \cdot t / m)(V_v \cos \alpha - V), \quad (7)$$

где dX/dt – первая производная от координаты X по времени, т.е. скорость капли, м/с. Аналогично будет происходить движение в плоскости ZY .

Капля из потока ПГР может двигаться либо в положительном направлении по оси Z (расчетный случай III), либо в противоположную сторону (случай IV).

Уравнение движения в проекции на ось Z примет вид для III и IV расчетного случая:

$$m(d\mathbf{V}_Z)/dt = k(\mathbf{V}_Z - \mathbf{V}_v \sin \alpha). \quad (8)$$

В случае движения в подветренной зоне:

$$m(d\mathbf{V}_Z)/dt = k \cdot \mathbf{V}_Z. \quad (9)$$

В качестве начальных условий принято $V_z(0) = -V \sin(0)$, $Z(0)=0$, $t=0$.

Решение уравнения (8) примет вид

$$Z = \frac{m(V_v \sin \alpha - V_z(0))}{k} + V_v \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{m \cdot \exp(k \cdot t / m)(V_v \sin \alpha - V_z(0))}{k}, \quad (10)$$

$$\frac{dZ}{dt} = V_v \sin \alpha - \exp(k \cdot t / m)(V_v \sin \alpha - V_z(0)), \quad (11)$$

где dZ/dt – первая производная от координаты Z по времени, т.е. скорость капли, м/с.

3. Реализация этапа компьютерного моделирования при изучении и визуализации факторов, влияющих на равномерность распределения реагента по покрытию

Представив полученные модели в виде программного кода, определим, как влияют высота установки распределительного диска над покрытием, частота вращения диска, скорость и направление ветра на степень равномерности обработки ППР в эквивалентных единицах. Для визуализации результатов компьютерного моделирования будет использован программный продукт QtOctave. Фрагмент записи кода в среде QtOctave представлен ниже:

function [xyzbet]=ZonaRaspReag11

disp ('Функция поиска зоны распределения жидкого реагента')

disp ('процедура численного решения трёх дифференциальных уравнений проекций движения капли в декартовой системе')

rad=pi/180;

delta T=0.001; % шаг интегрирования;

Tmax=1; % максимальное время исследования;

T=0:deltaT:Tmax; % массив значений времени;

bet=[0.01 20 40 60 80 100 120 140 160 179.99 200 220 240 260 280 300 320 340 359.99]*rad; % угол слёта капли с диска, 'град.';

alfa=40*rad; % угол, характеризующий направление ветра относительно оси X, 'град.';

k=0.0000756; % коэффициент сопротивления воздушной среды, 'кг/с';

m=0.000561199; % масса капли реагента, 'кг' ;

vv=12; % скорость ветра, 'м/с';

ro=1.18; % плотность воздуха, 'кг/куб.м';

g=9.81; % ускорение свободного падения, 'м/с^2';

vk=0.0000567; % объём капли реагента 'м^3';

V2=3.48; % значение скорости капли в начальный момент времени 'м/с';

% перебор значений начальных условий (поворот вектора начальной скорости капли)

for i=1:length(bet)...

В качестве первого варьируемого показателя выберем высоту диска H (м) (рис.2). На рисунке маркерами отмечены положения капель, слетающих с диска под углом β (варьируется от 0° до 360° с шагом в 10° с целью проведения численной оценки показателя равномерности). Показатель равномерности – интервал, содержащий одинаковое число капель, обозначим через δ (табл.1). Различие в значениях интервала показывает наличие неравномерности распределения. Скорость и направление ветра в данном случае не изменяются.

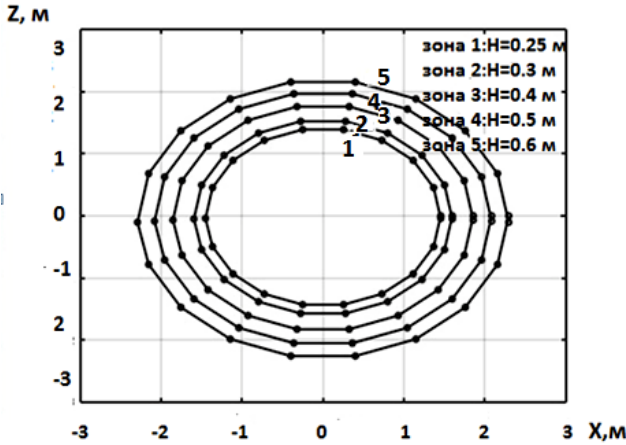


Рис.2. Влияние высоты распределительного диска на условную плотность нанесения ПГР по длине зоны распределения.

Таблица 1. Изменение интервала между каплями ПГР, образующими зону распределения.

$\beta = 0 \dots 360$ град.	H , м				
	0.25 (зона 1)	0.3 (зона 2)	0.4 (зона 3)	0.5 (зона 4)	0.6 (зона 5)
δ , м	0.27	0.32	0.33	0.39	0.47

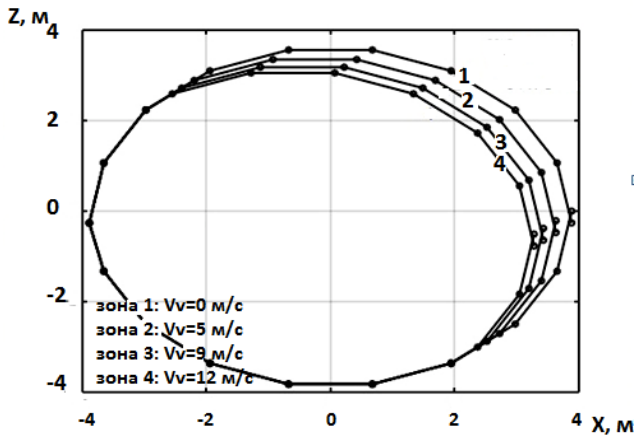


Рис.3. Влияние скорости ветра на равномерность нанесения ПГР по длине зоны распределения.

Приближаясь к реальным условиям эксплуатации машин для противогололёдной обработки, рассмотрим, как влияет величина скорости ветра V_v (м/с) на степень неравномерности распыления ПГР (рис.3, табл.2). Произвольно выбранное направление ($\alpha=40$ град.) при этом неизменно.

Таблица 2. Изменение показателя равномерности распределения капель ПГР при различных скоростях ветра.

β , град.	V_v , м/с			
	0 (зона 1)	5 (зона 2)	9 (зона 3)	12 (зона 4)
	δ , м			
0...120	0.38	0.382	0.382	0.37
120...130	0.38	0.34	0.26	0.27
130...310	0.38	0.382	0.382	0.37
310...320	0.38	0.32	0.26	0.25
320...360	0.38	0.382	0.382	0.37

Характер воздействия направления ветра на поток реагентов демонстрирует рис.4 и данные табл.3. Угол $\alpha=\alpha$ (град.) характеризует направленность воздушного потока относительно оси X .

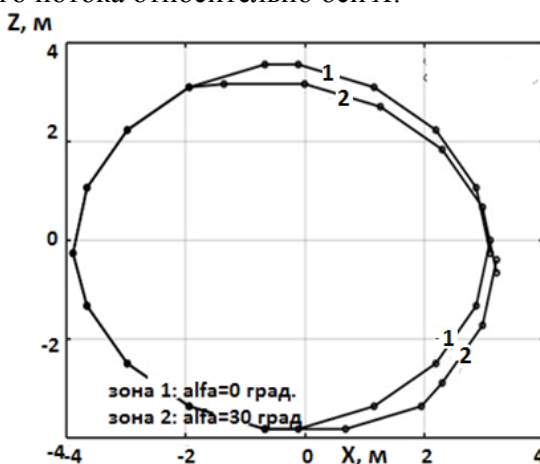


Рис.4. Влияние направления ветра на равномерность нанесения ПГР по длине зоны распределения.

Таблица 3. Изменение показателя равномерности распределения капель ПГР при различных направлениях ветра.

β , град.	Направление ветра (α , град.)	
	0 (зона 1)	30 (зона 2)
	δ , м	
0...110	0.39	0.38
110...120	0.39	0.26
130...310	0.39	0.38
300...310	0.39	0.25
310...360	0.39	0.38

Варьирование частоты вращения вала привода распределительного диска в диапазоне стандартных значений, обеспечиваемых гидроприводов рабочего оборудования, и соответствующее распределение капель ПГР по длине зоны обработки представлено на рис.5 и в табл.4.

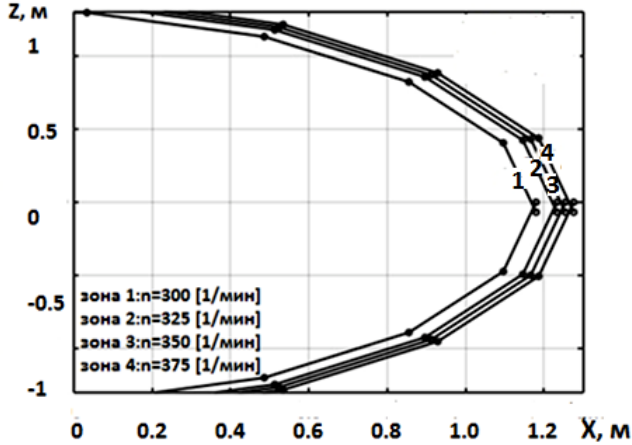


Рис.5. Влияние частоты вращения приводного вала распределительного диска на равномерность нанесения ПГР по длине зоны распределения.

Таблица 4. Изменение интервала между каплями ПГР при варьировании частоты вращения распределительного диска.

$\beta = 0 \dots 360$ град.	$n, \text{мин}^{-1}$			
	300 (зона 1)	325 (зона 2)	350 (зона 3)	375 (зона 4)
$\delta, \text{м}$	0.24	0.22	0.23	0.23

4. Выводы и результаты обработки полученных изображений

1. Получена математическая модель движения капель ПГР в воздушной среде (1),(4),(5),(8),(9).

2. Представлены уравнения для определения перемещений и скоростей капель при их движении (2),(3),(6),(7),(10),(11).

3. Методами математического моделирования определены факторы, оказывающие влияние на равномерность нанесения ПГР на покрытия.

4. Установлено, что высота распределительного диска влияет только на размер зоны обработки (то есть на ширину полосы) и не оказывает воздействие на степень равномерности распыления ПГР (рис.2).

5. С использованием компьютерного моделирования процесса распределения реагента выявлено, что с увеличением скорости ветра от 0 м/с до 12 м/с появляется неравномерность в распределении капель по длине зоны, находящейся с наветренной стороны (рис.3). Существенная неравномерность (0.10...0.122 м) характерна для скорости ветра свыше 9 м/с (табл. 2).

6. При рассмотрении различных направлений действующего ветра определено наличие деформации наветренной зоны и уменьшение расстояния между падающими под разными углами каплями (рис.4), то есть появляется отклонение от равномерности оседания капель реагента на покрытии. Чем больше угол α , тем большая неравномерность наблюдается со стороны наветренной зоны (табл.3, 4).

7. С изменением частоты вращения распределительного диска n от 300 мин^{-1} до 325 мин^{-1} имеет место увеличение интервала между каплями распыляемого реагента (рис.5). Дальнейшее наращивание частоты вызывает незначительное изменение плотности распределения капель по длине обрабатываемой зоны. Вместе с тем, учитывая пропорциональное увеличение радиусов зоны обработки (с ростом n), можно сделать вывод о сохранении степени равномерности нанесения ПГР.

8. Компьютерное моделирование дает возможность выработать ряд конкретных рекомендаций по управлению процессами, приводящими к возникновению неравномерности распыления реагента. Оно позволяет численно оценить равномерность обработки покрытия в г/м^2 (л/м^2) и предусмотреть меры по снижению негативного влияния на неё со стороны окружающей среды.

5. Заключение

Полученные выводы и результаты компьютерного моделирования являются базой для формирования общих принципов функционирования аналитического блока мониторинговой системы распределителей жидких ПГР. Её программное обеспечение необходимо разрабатывать с учетом всех параметров распределительного оборудования подобных машин, характеристик внешней среды и свойств рабочих сред (жидкостей). Рассмотренному в статье вопросу о неравномерности нанесения реагента на покрытия и факторам, вызывающим её появление, следует уделять особое внимание при создании систем мониторинга процесса противогололедной обработки дорожных и аэродромных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 22263739, МПК Е 01 Н 10/00, Е 01 С19/20, 10.11.2005. Машина дорожная с распределителем противогололедных материалов, автоматическим управлением и контролем технологического процесса, с приводом транспортера от планетарного гидромотора, оснащенного преобразователем окружной скорости гидромотора в частоту // Патент России № 2263739, 2003, Бюл. № 31 / Лемчужников В.Е., Мясгин А.В., Новиков В.А., Филатов Ю.В.;

Patent RF №22263739, МПК Е 01 Н 10/00, Е 01 С19/20, 10.11.2005. Mashina dorozhnaya s raspredelitem protivogolodnykh materialov, avtomaticheskim upravleniyem i kontrol'em tekhnologicheskogo protsessa, s privodom transportera ot planetarnogo gidromotora, osnashchennogo preobrazovatelem okruzhnoy skorosti gidromotora v chastotu // Patent Rossii №2263739, 2003, Byul. №31 / Lemchuzhnikov V.Ye., Masyagin A.V., Novikov V.A., Filatov Yu.V.

2. Автоматизированная система управления коммунальной дорожной машиной. Распределение жидких противогололедных реагентов [Электронный ресурс]. URL: www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatela-asu2c (дата обращения: 19.07.2017);
Avtomatizirovannaya sistema upravleniya kommunal'noy dorozhnoy mashinoy. Raspredeleniye zhidkikh protivogolodnykh reagentov [Elektronnyy resurs]. URL: www.kbkoloss.ru/products/avtomatika-dlya-kommunalnoy-dorozhnoy-mashiny/avtomatika-dlya-peskorazbrasyvatela-asu2s (data obrashcheniya: 19.07.2017);
3. *Е.В. Звягин, Ю.П. Бакатин, А.В. Остроух, А.Г. Федяшев.* Мониторинг рабочего цикла машины при мойке дорожных покрытий и его имитационная модель // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2011, №2, с.23а-29;
Е.В. Zvyagin, Yu.P. Bakatin, A.V. Ostroukh, A.G. Fedyashev. Monitoring rabocheho tsikla mashiny pri moyke dorozhnykh pokrytiy i yego imitatsionnaya model' // Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI), 2011, №2, s.23a-29.
4. *К.П. Мандровский.* Эксплуатационные условия в управлении эффективностью и техническом аудите дорожных машин // Интернет-журнал «Науковедение», 2016, т.8, №1, с.47-52;
К.П. Mandrovskiy. Eksploatatsionnyye usloviya v upravlenii effektivnost'yu i tekhnicheskome audite dorozhnykh mashin // Internet-zhurnal «Naukovedeniye», 2016, t.8, №1, s.47-52.
5. *К.П. Мандровский.* Контроль характеристик эксплуатации дорожных машин как информационная основа технического аудита // Дорожная держава, 2016, №68, с.81-83;
К.П. Mandrovskiy. Kontrol' kharakteristik ekspluatatsii dorozhnykh mashin kak informatsionnaya osnova tekhnicheskogo audita // Dorozhnaya derzhava, 2016, №68, s. 81-83.
6. *К.П. Мандровский.* Возможные перспективы развития систем мониторинга дорожных машин при управлении эффективностью и техническом аудите // Механизация строительства, 2016, с.47-52;
К.П. Mandrovskiy. Vozmozhnyye perspektivy razvitiya sistem monitoringa dorozhnykh mashin pri upravlenii effektivnost'yu i tekhnicheskome audite // Mekhanizatsiya stroitel'stva, 2016, s. 47-52.
7. Патент РФ № 82718, МПК: Е 01 Н 10 00, 07.08.2008. Универсальный дорожный комплекс (УДК) и система комплексного контроля условий дорожного движения, содержащая такой УДК // Патент России №82718. 2009. / Соломонов Ю.С., Нефёдов А.Н., Дмитриевская И.А., Малишевский С.М., Цветков Ю.А., Филатов Д.Ю., Дюков А.А.;
Patent RF №82718, МПК: Е 01 Н 10 00, 07.08.2008. Universal'nyy dorozhnyy kompleks (UDK) i sistema kompleksnogo kontrolya usloviy dorozhnogo dvizheniya, soderzhashchaya takoy UDK // Patent Rossii №82718. 2009. / Solomonov Yu.S., Nefodov A.N., Dmitriyevskaya I.A., Malishevskiy S.M., Tsvetkov Yu. A., Filatov D.Yu., Dyukov A.A.

8. Патент РФ № 2487971, МПК Е 01 Н 10/00, 20.07.2013. Устройство автоматического дозирования химических реагентов при нанесении их на поверхность искусственного покрытия // Патент России № 2487971, 2012, Бюл. № 20 / Луканов Н.И.;
Patent RF №2487971, МПК Ye 01 N 10/00, 20.07.2013. Ustroystvo avtomaticheskogo dozirovaniya khimicheskikh reagentov pri nanesenii ikh na poverkhnost' iskusstvennogo pokrytiya // Patent Rossii №2487971, 2012, Byul. №20 / Lukanov N.I.
9. Патент РФ № 2398929, МПК Е 01 Н 10/00, У 01 С 19/20, 20.07.2013. 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, 2009, Бюл. № 25 / Белоцерковский Г.М., Ахрамеев Э.В., Карякин С.Б.;
Patent RF №2398929, МПК Ye 01 N 10/00, U 01 S 19/20, 20.07.2013. Sposob obespecheniya raboty sistemy upravleniya rabochim protsessom mobil'nogo raspredelitelya materialov dlya obrabotki dorozhnykh pokrytiy i ustroystvo upravleniya rabochim protsessom mobil'nogo raspredelitelya materialov // Patent Rossii №2398929, 2009, Byul. №25 / Belotserkovskiy G.M., Akhrameyev E.V., Karyakin S.B.
10. *Р.Т. Емельянов, Е.С. Турышева, С.В. Шилкин.* Моделирование процесса управления распределением асфальтобетонной смеси по ширине дороги // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. SWorld, т.5, 2013, с.29–34;
R.T. Yemel'yanov, Ye.S. Turysheva, S.V. Shilkin Modelirovaniye protsessa upravleniya raspredeleniyem asfal'tobetonnoy smesi po shirine dorogi // Sovremennyye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii: sb. nauch. tr. SWorld, t.5, 2013, s.29–34.
11. Патент РФ № 177216, 14.03.00. Устройство для поверхностного рассева минеральных удобрений и других сыпучих материалов // Патент России № 177216, 2001, Бюл. № 36;
Patent RF №177216, 14.03.00. Ustroystvo dlya poverkhnostnogo rasseva mineral'nykh udobreniy i drugikh syupchikh materialov // Patent Rossii №177216, 2001, Byul. №36.
12. *Н.О. Чилингарян.* Обоснование размеров скребков тарельчатого дозатора // Вклад молодых ученых в аграрную науку. Сб. трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО Самарской ГСХА, 2014, с.111-114;
N.O. Chilingaryan. Obosnovaniye razmerov skrebkov tarel'chatogo dozatora // Vklad molodykh uchenykh v agrarnuyu nauku. Sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu FGBOU VPO Samarskoy GSKHA, 2014, s.111-114.
13. Патент РФ № 2083755, МПК Е 01 Н 10/00, 09.02.95. Распределитель противогололедных материалов // Патент России № 95102007/03, 10.07.97, Бюл. № 19;
Patent RF №2083755, МПК Ye 01 N 10/00, 09.02.95. Raspreditel' protivogolodnykh materialov // Patent Rossii №95102007/03, 10.07.97, Byul. №19.
14. *В.И. Марсов, В.С. Селезнев.* Применение адаптивной системы управления дозаторами непрерывного действия для экономичного распределения противогололедных материалов // Новые материалы и технологии в машиностроении – 2017, 25-я Международная научно-техническая конференция, 2011, с.91-93;
V.I. Marsov, V.S. Seleznev. Primeneniye adaptivnoy sistemy upravleniya dozatorami nepreryvnogo deystviya dlya ekonomichnogo raspredeleniya protivogolodnykh materialov // Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – 2017, 25-ya Mezhdunarodnaya

- nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, 2011, s.91-93.
15. Патент РФ № 93026031, МПК Е 01 Н 10/00, 19.05.93. Распределитель противогололедных материалов // Патент России № 93026031/3, 10.08.95, Бюл. №22; Patent RF №93026031, МПК Ye 01 N 10/00, 19.05.93. Raspredelitel' protivogolodnykh materialov // Patent Rossii №93026031/3, 10.08.95, Byul. №22.
 16. *Р.Т. Емельянов, В.В. Серватинский, А.П. Прокопьев, В.С. Новрузов.* Моделирование системы управления частотой вращения вала шнекового распределителя материала // Вестник КрасГАУ, 2016, №5, с.56-60;
R.T. Yemel'yanov, V.V. Servatinskiy, A.P. Prokop'yev, V.S. Novruzov. Modelirovaniye sistemy upravleniya chastotoy vrashcheniya vala shnekovogo raspredelitelya materiala // Vestnik KrasGAU, 2016, №5, s.56-60.
 17. *М.М. Земдыханов, Т.Р. Габдуллин.* Обоснование схемы и параметров центробежного разбрасывателя песка и реагентов // Известия КГАСУ, 2014, №4(30), с.484-489;
M.M. Zemdikhanov, T.R. Gabdullin. Obosnovaniye skhemy i parametrov tsentrobezhnogo razbrasyvatelya peska i reagentov // Izvestiya KGASU, 2014, №4(30), s.484-489.
 18. *И.И. Логвинов.* Гидрогазодинамика. – М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2014, 193 с.
I.I. Logvinov. Hidrogazodinamika. – M.: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet grazhdanskoy aviatsii, 2014, 193 s.
 19. *О.Н. Гончарова.* Конвективные движения жидкостей под действием сопутствующих потоков газа: математическое моделирование, численные исследования // Омский научный вестник, 2013, №1(117), с.21-24;
O.N. Goncharova. Konvektivnyye dvizheniya zhidkostey pod deystviyem soputstvuyushchikh potokov gaza: matematicheskoye modelirovaniye, chislennyye issledovaniya // Om'skiy Nauchnyy Vestnik, 2013, №1(117), s.21-24.

Поступила в редакцию 19.02.2018

После доработки 19.02.2018

Принята к публикации 14.05.2018