

УДК 625.76.08

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРСУНОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ

К.П. Мандровский, Я.С. Садовникова

Объектом приведенного в статье исследования является дисковое распределительное оборудование для работы с жидким реагентом. Предмет исследований – конструктивные и режимные параметры гидравлических форсунок. Цель представленной работы – установление зависимостей основных характеристик процесса распределения жидких противогололедных реагентов от конструкции гидравлических форсунок и режимов их работы. Под режимами работы понимается давление распыления и расход реагента через форсунку. В статье проанализирована связь диаметра сопла форсунки со скоростью слёта капли с диска и радиусом зоны обработки покрытий реагентом. Численные исследования проведены для плоскоструйных, полоконусных (шнекоцентрибежных) и полноконусных типов форсунок при различном рабочем давлении. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору рациональных конструктивных и режимных параметров форсунок для обработки дорожных и аэродромных покрытий. Практическая значимость результатов, полученных авторами, состоит в возможности аргументированного выбора типа форсунок и обоснованного назначения рациональных режимов эксплуатации гидравлического оборудования при обработке покрытий различного назначения.

Ключевые слова: форсунка, конструктивные и режимные параметры, диаметр соплового отверстия, давление, зона обработки, скорость истечения, противогололедный реагент.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF DESIGN PARAMETERS AND OPERATING CONDITIONS OF INJECTS ON THE PERFORMANCE OF ANTI-SOLAR REAGENTS SPRAYING

K.P. Mandrovskiy, Y.S. Sadovnikova

The object of the analysis presented in the article is a disk distribution equipment for working with a liquid reagent. The subject of analysis is the design and operating parameters of hydraulic injectors. The purpose of the presented work is to determinate the dependencies of the main characteristics of the liquid anti-icing reagents distribution process on the hydraulic injects structure and their operating parameters. As operating parameters there are a spreading pressure and a reagent discharge through an inject.

In the paper there are analyzed the connection an injector nozzle diameter with a drop velocity in free fall from a disk and a radius of a reagent treatment area. Numerical analysis was carried out for flat-jet, half-cone (screw-centrifugal) and full-cone types of injects at various working pressures. Recommendations for a choice of rational design and operating parameters of injects for road and airfield pavements were formulated on the basis of obtained results. The practical significance of the results obtained by the authors consists in the possibility of a reasoned choice of a inject type and an argued purpose of rational operating modes for hydraulic equipment at processing various coatings.

Keywords: inject, design and operating parameters, nozzle diameter, pressure, treatment area, flow rate, anti-icing reagent.

Введение

Конструктивное исполнение рабочего оборудования машин для распределения жидких реагентов предусматривает нанесение противогололёдного реагента (ПГР) на покрытие двумя способами: при помощи распределительного диска, к которому форсунками подается под давлением жидкий реагент (рис. 1), или с помощью распыления ПГР рядом форсунок, устанавливаемых на выносной штанге.

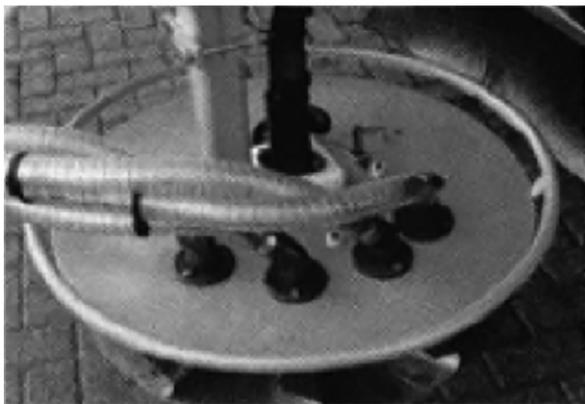


Рис. 1. Общий вид дискового рабочего оборудования для распределения жидких реагентов [1]

Серьезной проблемой, связанной с процессом противогололёдной обработки, является неоправданный перерасход реагента и неравномерное нанесение реагента на покрытия. Чтобы предотвратить некачественное выполнение рассматриваемой операции, необходимо составить математическое описание процесса распыления ПГР и с его помощью определить, как особенности конструкции и режимы работы распределительного оборудования влияют на характеристики движения потока реагентов и распределение его по покрытию.

К научным изысканиям, близким к обсуждаемой тематике, можно отнести работу [2], в которой изложены предпосылки к методике обоснования рациональных конструктивных решений разбрасывающего оборудования. Объектом исследования в работе выступает процесс распределения твердого реагента. В статье [3] представлены результаты исследований связи конструктивных параметров штанговых опрыскивателей с качеством технологического процесса. Математическое моделирование как база для теоретического изучения конструктивных и режимных параметров распылителей агрохимических жидкостей предложено в монографии [4].

Авторы перечисленных работ обоснованно указывают на конструктивные и режимные параметры распылительного оборудования как на факторы, определяющие равномерность, дальность и форму зоны распыла жидкостей. Существует необходимость в аналогичном исследовании оборудования дорожных и аэродромных машин. Задача изучения процесса распыления жидкости форсунками в общей постановке достаточно полно решена в работах [5–8]. В частности, в сфере проектирования энергетических установок известны работы [9–11] по исследованию зависимости параметров потока жидкости от геометрических параметров сопла и угла раскрытия факела.

Однако навесное оборудование машин для распределения жидких реагентов характеризуется специфическими особенностями, такими, как расположение форсунок, условия эксплуатации машин, и это диктует необходимость проведения дополнительного анализа и обоснования рационального выбора конструкции форсунок и назначения режимов их работы. В данной области заслуживает внимания работа [12], в которой произведен численный анализ зависимости расхода ПГР от диаметра дросселирующих отверстий форсунок и давления на входе. Авторы констатируют необходимость увеличения диаметра соплового отверстия для увеличения расхода жидкого ПГР и рекомендуют назначение величины расхода реагента $G = 4...147 \text{ см}^3/\text{с}$ с целью обеспечения нормы нанесения ПГР при максимальной рабочей скорости машины, равной 2,7 м/с. В работе не исследовалась зависимость скорости слета капель с рабочего оборудования и ширины зоны обработки от конструкции распылительного оборудования. Кроме того, авторы выбрали в качестве предмета исследования форсунки, установленные на штанге малогабаритной машины. В то же время особенности процесса распыления реагента форсунками, монтируемыми в кожухе распределительного диска, пока мало изучены.

Целью статьи является изучения влияние конструкции и режимов работы гидравлических форсунок на отдельные характеристики процесса распыления жидкого ПГР.

Постановка задачи

В качестве изучаемых конструктивных характеристик форсунок избраны диаметр соплового отверстия и тип форсунок. Из режимных

параметров будут анализироваться давление подачи ПГР и расход жидкости через форсунку. Из характеристик процесса распыления жидкого ПГР будут оцениваться скорость слета капель с диска и радиус зоны обработки, образуемой при работе распределительного диска.

Изучение будет проводиться методом численных расчетов на основе математических моделей движения капель ПГР по диску и в воздушной среде [13–15].

Математическая модель движения капель по рабочему оборудованию

Струя реагента, образованная каплями, распыляется форсункой под некоторым давлением, создавая на поверхности диска зону распыления в виде круга или эллипса (рис. 2). При этом на каждую движущуюся к диску изолированную каплю действуют сила тяжести, сила инерции и сила сопротивления движению.

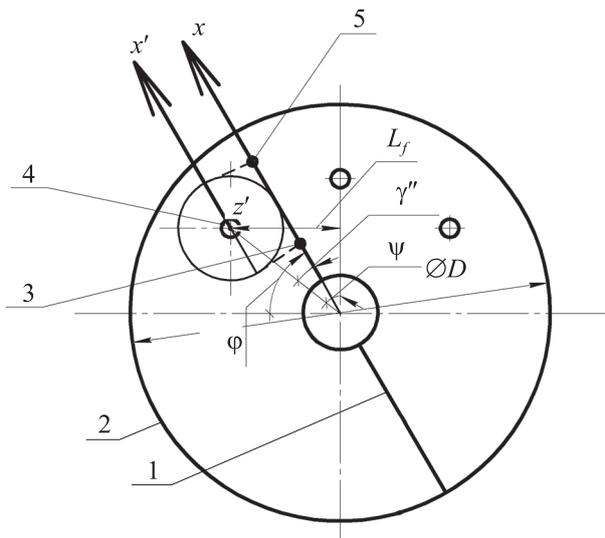


Рис. 2. Схема рабочего оборудования:

- 1 – лопатка диска; 2 – диск; 3 – точка с координатой $x_{нmin}$; 4 – форсунка; 5 – точка с координатой $x_{нmax}$; $x'z'$ – система координат, связанная с форсункой; $ØD$ – диаметр диска; $l_φ$ – расстояние между осью z' форсунки и вертикальной осью диска; $φ$ – угол наклона лопатки диска; $ψ, γ''$ – вспомогательные углы

Запишем в общем виде уравнение движения капли по оси z' , параллельной вертикальной оси форсунки: $F_{н} = F_{т} - F_{с}$, где $F_{т}$ – сила тяжести, Н; $F_{н}$ – сила инерции, Н; $F_{с}$ – сила сопротивления воздушной среде движению капли, Н. Или:

$$a_{z'} = g - \frac{-k_1 v_{z'}}{m_1}, \tag{1}$$

где $a_{z'}$ – ускорение капли по оси z' , м/с²; g – ускорение свободного падения, м/с²; m_1 – масса капли, кг; $v_{z'}$ – скорость движения капли по оси z' , м/с; k_1 – коэффициент сопротивления движению, кг/с. Для тел сферической формы $k_1 = 6\pi \cdot R_1 \cdot \eta$, где R_1 – радиус капли, м; η – коэффициент динамической вязкости среды, зависящий от температуры среды, кг/м·с. При движении капли ПГР по оси x' на нее будут оказывать воздействие сила инерции и сила сопротивления воздушной среде. Уравнение движения по оси x' принимает вид:

$$F_{н} = -F_{с} \text{ или } a_{x'} = \frac{-k_1 v_{x'}}{m_1}. \tag{2}$$

Расчет ведется для условного диаметра капли d_1 . Начальные значения скорости и координаты капли в проекции на соответствующие оси определяются геометрическими параметрами и типом форсунки, давлением подачи и перепадом давления на форсунке. Решение уравнений 1 и 2 позволяет определить траекторию полета капли в плоскости $x'z'$, а также начальную координату x'_0 капли, попадающей на диск. После достижения каплей диска процесс истечения заканчивается и начинается движение капли вдоль лопатки диска. Учитывая сложность изучения всех возможных траекторий движения капли по диску, рассмотрим движение капли вдоль лопатки из двух начальных положений, обозначенных точками 3 и 5 (см. рис. 2). Для перехода к оси x , связанной с лопаткой диска, следует использовать информацию о расположении форсунок в кожухе диска. Чтобы определить значения $x_{нmax}$ и $x_{нmin}$ (точки 5 и 3 соответственно на рис. 2), используем следующие параметры: x'_0 – координата капли при попадании на диск относительно оси x' ; $l_φ$ – расстояние от продольной оси диска до продольной оси форсунки, м; $γ'$ – угол, характеризующий положение капли в системе координат $x'z'$, связанной с форсункой, град.; вспомогательные углы: $γ' = 90 - ψ$, град.; $γ'' = φ - γ'$, град. Тогда:

$$x_{нmax} = \left(\frac{l_φ}{\cos γ'} + x'_0 \right) \cos γ'', \tag{3}$$

$$x_{нmin} = \left(\frac{l_φ}{\cos γ'} - x'_0 \right) \cos γ''. \tag{4}$$

Найденные координаты капли $x_{нmax}$ и $x_{нmin}$ являются начальными условиями, необходимыми для решения уравнения движения капли

вдоль лопатки диска. Полученное в результате решения уравнений 1 и 2 значение скорости капли в проекции на ось x' также будет использовано при решении уравнения движения капли вдоль лопатки. Движение капли вдоль лопатки диска происходит под действием внешних сил:

- силы инерции $F_1 = m_2 a_x$,
- силы трения о поверхность диска $F_2 = f m_2 g$,
- силы Кориолиса $F_3 = 2 m_2 \omega V_x$,
- центробежной силы инерции $F_4 = m_2 \omega^2 x$,

Поскольку при попадании на диск наблюдается взаимодействие каплей (слияние, дробление), масса рассматриваемой капли меняется и становится равной m_2 .

В проекции на ось x уравнение движения капли принимает вид:

$$m_2 a_x = m_2 \omega^2 x - 2 m_2 \omega V_x - f m_2 g,$$

где a_x – ускорение капли по оси x , м/с²; ω – частота вращения диска, с⁻¹; f – коэффициент трения жидкости (реагента) о поверхность диска; V_x – скорость движения капли вдоль оси x , м/с; x – значение текущей координаты капли, м. Когда x станет равным длине лопатки, то есть $x = l$, можно определить скорость слета капли с диска. Последующий процесс движения каплей в воздушной среде подробно описан в работах [14, 15].

Влияние конструктивных и режимных параметров форсунок на характеристики процесса распыления ПГР

Для численных расчетов выберем основные типы форсунок, предлагаемые производителями форсуночной техники: плоскоструйные форсунки (формирующие плоскую, расширяющуюся в стороны струю линейной формы); полноконусные (формирующие факел типа «полный конус») и полоконусные (создающие зону распыления в виде кольца).

С помощью численных методов проведем оценку влияния конструктивных и режимных параметров трех типов форсунок на скорость истечения реагента и определяемый им радиус зоны обработки покрытия.

Полоконусные (шнекоцентробежные) форсунки

Рассчитаем радиус R зоны распыления, создаваемой диском при работе исследуемых полоконусных (шнекоцентробежных) форсунок при давлении P , равном 3 и 5 бар, и варьируемом диаметре сопла d_c форсунки (табл. 1). В качестве условий для численного моделирования выберем температуру воздуха, равную -10 °С. В качестве распыляемого ПГР выберем раствор хлорида натрия (содержание соли в растворе 23,1 %), нагретого до температуры $+20$ °С. Плотность раствора составляет 1175 кг/м³, коэффициент динамической вязкости $-0,001667$ Па·с, коэффициент кинематической вязкости $-0,000142$ м²/с.

Расход реагента G (см. табл. 1) назначается исходя из типа форсунки и рабочего давления, согласно техническим данным, представленным производителями распылительного оборудования.

Зависимость скорости слета капли с диска и радиуса зоны обработки от диаметра сопла форсунки при давлении распыления $P = 7$ бар иллюстрирует рис. 3.

Приведем краткий анализ причин полученных на рис. 3 зависимостей. Известно, что с увеличением диаметра сопла уменьшается скорость истечения каплей из форсунки [7], следовательно, уменьшается скорость капли в момент попадания на диск. Это приводит к уменьшению скорости V_c слета каплей с диска. Значение V_c является начальным условием, определяющим кинематические характеристики капли при движении в воздушной среде. Таким образом, уменьшение V_c вызывает уменьшение величины R .

Таблица 1

Зависимость характеристик распределения реагентов от конструктивных параметров полоконусных (шнекоцентробежных) форсунок и условий обработки

Характеристики распределения реагентов	P , бар	d_c , мм				
		2	3	3,5	4	5
G , л/мин [16]	3	1,22	2,08	4,9	6,12	7,72
R , м		3,7	2,5	5,6	5,02	4,02
G , л/мин [16]	5	1,58	2,69	6,35	3,95	9,96
R , м		5,5	3,7	7,8	2,6	5,8

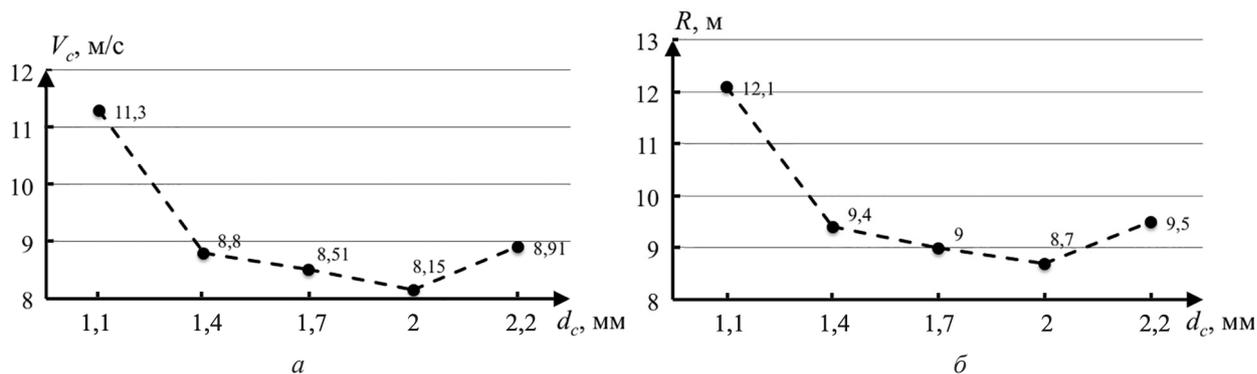


Рис. 3. Зависимость скорости слета капли с диска V_c (а) и радиуса зоны обработки R (б) от диаметра сопла d_c полоконусной (шнекоцентрибежной) форсунки

Полученная величина радиуса R зоны обработки (см. рис. 3), которая определяется величиной V_c при заданном d_c , не является желательной в реальных условиях обработки покрытия, так как превышает ширину полосы дороги общего пользования.

Плоскоструйные форсунки

Результаты численного исследования (рис. 4) зависимости скорости истечения реагента из сопла плоскоструйной форсунки от ее конструктивных параметров (d_c) показывают, что скорости V_i истечения капле из форсунки при давлении 3 и 5 бар принимают такие высокие значения, при которых капля вылетает за пределы диска, не касаясь его поверхности. Скорость истечения капле определялась, исходя из расхода реагента G , его плотности и площади поперечного сечения сопла форсунки [7].

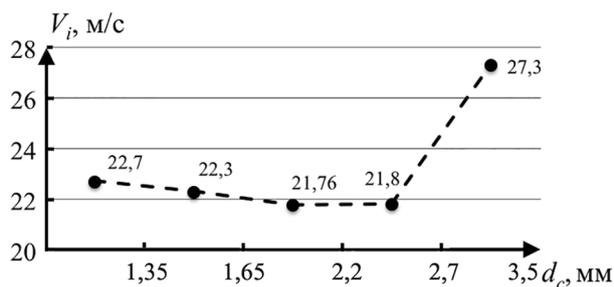


Рис. 4. Зависимость скорости истечения капли из форсунки V_i от диаметра сопла плоскоструйной форсунки d_c при $P = 5$ бар

Значения скорости истечения капле из форсунки V_i при $P = 3$ бар при $d_c = 1,35...3,5$ мм меняются от 17,8 до 16,9 м/с.

Рассчитанные значения V_i делают невозможным расчет скорости слета капле с диска и радиуса R зоны обработки.

Полноконусные форсунки

Изучение конструктивных параметров форсунки с типом факела «полный конус» свидетельствует о характере изменения кинематических характеристик жидкого ППР, аналогичном представленному на рис. 4. Скорости истечения капле столь высоки, что распыляемая струя реагента движется к покрытию, минуя поверхность распределительного диска с лопатками (рис. 5). Снижение величины скорости V_i , показанное на рис. 5, обусловлено назначением расхода G , рекомендованного производителями форсунок.

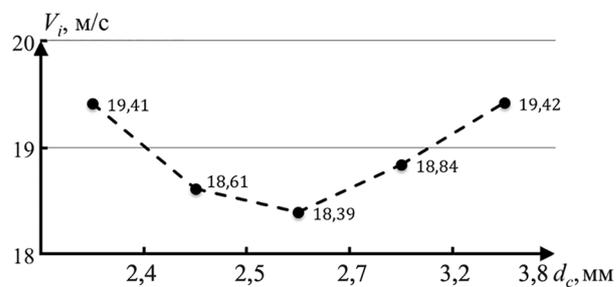


Рис. 5. Зависимость скорости истечения капле из полноконусной форсунки V_i от диаметра сопла форсунки d_c при $P = 3$ бар

Изменения скорости истечения капле из форсунки при $P = 5$ бар незначительны. Значения V_i варьируются в диапазоне от 21,58 до 21,89 м/с для $d_c = 2,4...3,8$ мм.

Полученные зависимости скорости истечения капле от диаметра сопла форсунки и давления согласуются с результатами теоретических и экспериментальных исследований процессов распыления жидкости и ее взаимодействия с технологическим оборудованием [5–7, 9, 12]. Зависимость скорости слета капле с диска, а также зависимость радиуса зоны обработки от диаметра сопла фор-

сунки в рамках решения прикладной технической задачи ранее не была изучена. Однако зафиксированная тенденция к увеличению дальности полета капель при увеличении диаметра сопла шнекоцентробежной форсунки, достигаемая исключительно за счет назначения соответствующего расхода реагента, подтверждается результатами [17]. Подобная сходимость с результатами других авторов подтверждает адекватность математических моделей и осуществленных на их базе численных исследований.

Анализ результатов и выводы

Из всех типов исследуемых форсунок для работ по распылению реагента дисковым рабочим оборудованием применимы форсунки типа «полый конус» (шнекоцентробежные).

Для работ по распылению реагента в составе штангового рабочего оборудования наиболее рационально применение плоскоструйных и полноконусных форсунок.

Конструкция форсунок определяет режимные параметры ее работы, такие, как давление и расход жидкости. Анализ численных расчетов показывает, что распыл реагента рекомендуется осуществлять для шнекоцентробежных и плоскоструйных форсунок при давлении до 5 бар. Дальнейшее повышение давления приводит к нежелательному росту скорости истечения, вызывающему мелкодисперсное (туманообразное) распыление.

Для форсунок, устанавливаемых в кожух распределительного диска, рекомендуется выбор полоконусных форсунок с диаметром сопловых отверстий от 2 до 4 мм. Для плоскоструйных форсунок, монтируемых на штанге, рационально назначение диаметра d_c , составляющего от 2,4 до 2,7 мм при давлении 3 бар, при давлении 5 бар – до 1,5 мм. Для полноконусных форсунок рационально назначение диаметра сопловых отверстий $d_c \leq 3,2$ мм при давлении 3 бар.

Для распределительного оборудования, используемого при содержании аэродромных покрытий, целесообразно назначение рабочего давления до 7 бар для плоскоструйных и шнекоцентробежных форсунок. При содержании городских автомобильных дорог выбор такого режима работы форсунок нерационален.

Заключение

В ходе данной работы проведена численная оценка радиуса зоны обработки покрытий,

полученной при работе различных типов форсунок при варьируемом давлении и диаметре соплового отверстия. Для плоскоструйных и полноконусных форсунок выявлены зависимости скорости истечения (распыления) капель от диаметра сопловых отверстий. По результатам анализа, представленного в форме графических зависимостей и численных расчетов, сформулированы рекомендации по выбору типов и режимов функционирования форсунок для обработки дорожных и аэродромных покрытий жидким ПГР.

Список литературы

1. АКМТ Коминвест. Распределители реагентов Epoke. Режим доступа: <http://www.cominvest-akmt.ru/files/download/catalogs/epoke.pdf> (дата обращения: 15.03.2019).
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. Киреев И.М., Коваль З.М., Слесарев В.Н. Метод и средство моделирования технологического процесса распылителей жидкости // Техника и оборудование для села. 2017. № 7. С. 28–31.
4. Черноволов В.А., Кравченко Л.В. Математическое моделирование процессов распределения жидкостей в агротехнологиях: моногр. зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – 2016. 208 с.
5. Ладоша Е.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. Информационное моделирование распыливания и испарения моторного топлива в дизельном двигателе // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 4 (47). С. 509–519.
6. Экспериментальное исследование диспергирования жидкости эжекторными форсунками / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, М.Я. Евсевлев, И.К. Жарова, А.С. Жуков, С.В. Змановский, Е.А. Козлов, А.И. Коноваленко, В.Ф. Трофимов // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. № 6. 1229–1236.
7. Пажжи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. – 254 с.
8. Мариничев Д.В. Экспериментальное исследование тонкодисперсного распыла перегретой воды: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. – 116 с.

9. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Боев О.В. Разработка конструкции устройства для диспергирования жидкости и методики расчета его основных параметров // *Машиностроение и инженерное образование*. 2008. № 3. С. 48–54.
10. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Машиностроение, 1968. – 394 с.
11. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А.П. Васильев, В.М. Курдрявцев, В.А. Кузнецов, В.Д. Курпатенков, А.М. Обельницкий, В.М. Поляев, Б.Я. Полуян. М.: Изд-во «Высшая школа», 1983. –703 с.
12. Зедгенизов В.Г., Простакова Л.В., Сякин С.Н. Результаты экспериментальных исследований форсунки для нанесения жидкого антигололедного материала // *Вестник ИрГТУ*. 2012. № 11 (70). С. 53–57.
13. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Уточнение характеристик движения жидкого реагента по диску при распылении форсункой // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции Интерстроймех–2018. Москва, 2018. С. 110–114.
14. 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
15. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Влияние скорости машины на равномерность распределения противогололедных реагентов // *Механизация строительства*. 2018. Т. 79. № 4. С. 60–64.
16. Spraying systems Co. Режим доступа: https://www.spray.com/v1/cat70/cat70pdf/ssco_cat70_f.pdf (дата обращения: 13.03.2019).
17. Лебедев А.Е. Научное обоснование и совершенствование технологических процессов и оборудования для переработки дисперсных материалов на принципе взаимодействия рационально сформированных струйных потоков: дис. ... д-ра техн. наук. Ярославль, 2014. – 257 с.

**МАНДРОВСКИЙ
Константин Петрович**

E-mail: effectmash@mail.ru
Тел.: (499) 155-07-97

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Дорожно-строительные машины», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва. Сфера научных интересов: динамика строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин, эффективность дорожно-строительных машин, математическое и технико-экономическое моделирование рабочих процессов дорожно-строительных машин. Автор 35 публикаций.

**САДОВНИКОВА
Яна Сергеевна**

E-mail: jana.sadovnikova@yandex.ru
Тел.: (499) 155-04-74

Инженер кафедры «Дорожно-строительные машины», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва. Сфера научных интересов: эффективность аэродромных и дорожно-строительных машин, математическое, имитационное и технико-экономическое моделирование рабочих процессов дорожных, аэродромных и коммунальных машин. Автор 14 публикаций.