ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 696.42

DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.44-52

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО СПОСОБА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКИХ СРЕД

Р.В. Муканов, В.Я. Свинцов

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ),
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18*

Предмет исследования: рассматривается вопрос о разработке метода диспергирования жидких сред при помощи высокопотенциального электростатического поля. Существующие способы диспергирования жидких сред, используемых в промышленности в настоящее время, имеют как ряд достоинств, так и обладают недостатками, основными из которых являются: неоднородность частиц по размеру и повышенные энергетические затраты на процесс диспергирования. Применительно к диспергированию пищевых продуктов в процессе сушки обнадеживающие результаты имеет электростатический способ диспергирования, это обуславливает большой интерес к апробации электростатического метода диспергирования для широкой гаммы веществ применительно к другим отраслям промышленности. Для оценки потенциала данного метода были проведены экспериментальные исследования по диспергированию жидкостей, обладающих электропроводящими, полупроводящими и диэлектрическими свойствами.

Цели: получение зависимости дисперсности распыла (среднего диаметра капель) от расхода и напряжения высоковольтного блока питания.

Материалы и методы: разработана экспериментальная установка, состоящая из нескольких функциональных блоков, позволяющих менять расход распыливаемой среды, а также интенсивность и геометрию электростатического поля. При разработке экспериментальной установки для подбора основного оборудования, была произведена оценка напряжения, выдаваемого высоковольтным блоком питания, а также его мощность. Результаты экспериментов (процесса диспергирования) фиксировались с использованием цифрового фотооборудования, что позволило определять размеры частиц диспергирования на основе сравнения их эталонов.

Результаты: экспериментально подтверждено, что электростатический способ диспергирования позволяет получить распыл с заданными параметрами дисперсности при высокой однородности.

Выводы: эксперименты подтвердили работоспособность данного способа диспергирования жидких сред. В результате выявлен диапазон напряжений, при котором изменение дисперсности происходит наиболее интенсивно. Полученные данные закладывают основу для разработки устройств диспергирования для различных отраслей промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диспергирование, дисперсность, электростатическое распыление, электрод, высоковольтный блок питания, погружной насос, распылительный узел, эталон, напряжение, мощность

Благодарности: Авторы выражают благодарность ректору АГАСУ, профессору Д.П. Ануфриеву и проректору по научной работе, профессору Л.В. Борониной за возможность проводить исследования на базе научной лаборатории кафедры инженерных систем и экологии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Муканов Р.В., Свинцов В.Я. Разработка электростатического способа диспергирования жидких сред // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 1 (112). С. 44–52.

DEVELOPING ELECTROSTATIC METHOD OF LIQUID MEDIUM DISPERSION

R.V. Mukanov, V.Ya. Svintsov

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE),
18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation*

Subject: the paper considers the development of a method for liquid media dispersion using a high-potential electrostatic field. The existing methods for dispersing liquid media used in industry nowadays have both a number of advantages and disadvantages, the main ones being: the heterogeneity of the particles in size and the increased energy costs for the dispersion process. The analysis of literature sources has shown that with regard to the dispersion of food products during the drying process, the electrostatic dispersion method has encouraging results. This induces great interest in approbation of the electrostatic dispersion method for a wide range of substances, as applied to other industries. To assess the potential of this method, experimental studies were carried out on the dispersion of liquids with electrically conducting, semiconducting and dielectric properties.

Research objectives: obtain dependence of dispersity of spray (with an average diameter of droplets) on flow rate and voltage of the high-voltage power supply unit.

Materials and methods: to achieve the goal, an experimental device was developed consisting of several functional blocks that allow us to change the flow rate of the medium being atomized, as well as the intensity and geometry of the electrostatic field. During development of the experimental device, in order to select the main equipment, the voltage outputted by the high-voltage power supply unit, as well as its power, were estimated. The results of the experiments (dispersion process) were recorded using digital photo equipment, which allowed us to determine the sizes of the dispersion particles on the basis of their comparison with the reference value.

Results: it has been experimentally confirmed that the electrostatic dispersion method makes it possible to obtain a spray with predefined dispersity parameters at high degree of homogeneity.

Conclusions: the experiments confirmed the working capacity of the given method of liquid medium dispersion. As a result of processing of the experimental data, a range of voltages was determined at which the change in the dispersity is the most intense. The obtained data form the basis for the development of dispersion devices for various industries.

KEY WORDS: dispersion, dispersity, the electrostatic atomization, electrode, a high-voltage power supply, a submersible pump, a spray assembly, reference, voltage, power

FOR CITATION: Mukanov R.V., Svintsov V.Ya. Razrabotka elektrostاتического sposоba dispergировaniya zhidkikh sred [Developing electrostatic method of liquid medium dispersion]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 1 (112), pp. 44–52.

ВВЕДЕНИЕ

Диспергирование жидких сред является важной задачей при осуществлении многих технологических процессов в промышленности. Качество процесса диспергирования зависит в первую очередь от способа диспергирования.

Наибольшее практическое применение в настоящее время имеют форсуночные устройства, реализованные на механическом принципе действия. Однако, несмотря на очевидные достоинства, механические форсунки имеют ряд существенных недостатков, основными из которых являются: недостаточная степень дисперсности и неоднородность частиц по размеру, невысокая степень раскрытия факела распыливаемой струи и сравнительно невысокие экономические показатели, что обуславливает актуальность проблемы разработки новых высокоэффективных методов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Устройства диспергирования жидких сред получили широкое распространение в химической и пищевой промышленности, науке, системах жилищно-коммунального хозяйства, в системах пожаротушения. Одним из требований эффективности этого процесса для многих технологий является требование получения однородной мелкодисперсной среды заданных параметров [1–3].

В зависимости от характера распыливаемой среды и технологического процесса соответствующего производства используются различные способы диспергирования, такие как механическое, пневматическое, гидравлическое, ультразвуковое, электростатическое [4–7].

Однако известные способы и устройства имеют ряд недостатков, основными из которых являются неоднородность частиц по размеру, повышенные энергетические затраты на процесс диспергирования

параметры факела распыла и т.д. В связи с вышеизложенным разработка новых методов и средств диспергирования является актуальной.

В настоящее время ведутся экспериментальные исследования по разработке высокоэффективной технологии диспергирования на основе использования высокопотенциального электростатического поля [8–11], которая показала обнадеживающие результаты применительно к технологическому процессу сушки пищевых продуктов [12], которые относятся к проводящим и полупроводящим жидкостям, а также окраске металлических поверхностей лакокрасочными материалами [13–15]. Это обуславливает большой интерес к апробации электростатического метода диспергирования широкой гаммы веществ применительно к другим отраслям промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью настоящей работы является апробация электростатического метода на жидкостях, относящихся к веществам с преобладанием диэлектрических свойств.

Экспериментальные исследования осуществлялись на разработанном нами экспериментальном стенде [16], содержащем:

- высоковольтный блок (ВВБ) питания;
- распылительный узел оборудованный электродной системой, способной создавать высокопотенциальное электростатическое поле различной напряженности и формы;
- погружной насос, посредством которого осуществлялась транспортировка распыливаемой жидкости к распылительному узлу.

Исходными определяющими параметрами при разработке ВВБ являются:

- мощность, потребляемая распылительным блоком при проектном расходе распыляемой жидкости;
- диапазон величины напряжения, подаваемого на электродную систему распылительного узла.

При оценке максимального значения высокого напряжения будем исходить из того, что напряженность, при которой происходит пробой [17] сухого воздуха при нормальных условиях, близка к $30 \cdot 10^2$ кВ/м. Отсюда можно принять максимальное значение высокого напряжения 30...50 кВ, что позволяет создавать напряженность поля q , близкую к предпробойной.

Для оценки мощности проектируемого ВВБ питания исходным параметром является объемный расход жидкости через распылительный узел. В пищевой промышленности разработка распылительных устройств для сушильных установок по производству сухого молока проектировалась исходя из производительности 1000...1250 кг [18].

Применительно к производительности форсунок, используемых в наиболее распространенных котельных агрегатах, (ДЕ-16-14) работающих на мазуте, их номинальный расход топлива составляет 800...1250 кг/ч в зависимости от режима [19].

Вводными для расчета мощности ВВБ принимаем верхний предел производительности форсунок, тогда производительность за смену (8 ч) составит 10 т, или 0,35 кг/с, тогда объем жидкости за секунду составит

$$V_s = \frac{m}{\rho} = \frac{0,35}{1000} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где V_s — объемный расход жидкости через распылительный узел м³/с; m — массовый расход жидкости, кг/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Принимая средний объем капли жидкости (после распыления) $d = 50$ мкм = $50 \cdot 10^{-6}$ м, находим объем единичной капли жидкости при диспергировании:

$$V_{\text{капли}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{50 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^3 \approx 6,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3, \quad (2)$$

где d — диаметр образующейся капли, м.

Среднее количество капель N , образующихся за единицу времени, составит

$$N = \frac{V_s}{V_{\text{капли}}} = \frac{0,35 \cdot 10^{-3}}{6,5 \cdot 10^{-14}} \approx 0,06 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} = 6 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}, \quad (3)$$

с поверхностью единичной капли $S_{\text{капли}}$:

$$S_{\text{капли}} = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{50 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2 \approx 8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2. \quad (4)$$

Для N количества капель, образованных за единицу времени, общая поверхность составит

$$S'' = N S_{\text{капли}} = 6 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10^{-9} \approx 50 \text{ м}^2/\text{с}. \quad (5)$$

Для расчета мощности затрачиваемой на образование поверхности S'' , следует учесть величину поверхности струи, образующейся при истечении жидкости из распылительного узла при отсутствии воздействия на нее электростатического поля S . Если диаметр распылительного сопла, из которого происходит истечение, принять за D равным 10^{-3} , а расход жидкости V_s , то площадь поверхности струи S , м²/с, из него составит

$$S = \frac{4V_s}{D} = \frac{4 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} \approx 1,4 \text{ м}^2/\text{с}. \quad (6)$$

Тогда мощность, затрачиваемая на преодоление сил поверхностного натяжения в процессе образования капель (при известном расходе жидкости и коэффициенте поверхностного натяжения σ)

$$P = \sigma \cdot (S'' - S) \approx (40/70) \cdot 10^{-5} \cdot (50 - 1,4) \approx (2,05/3,5) \text{ Вт}, \quad (7)$$

где $\sigma = (40...70) \cdot 10^{-3}$ Н/м — коэффициент поверхностного натяжения распыливаемой среды.

Принимаем минимально возможное значение коэффициента полезного действия распылительного блока $\eta_{\text{ист}} = 0,01$ [5], найдем мощность, затрачиваемую на диспергирование:

$$P_{\text{затр}} = \frac{P}{\eta_{\text{ист}}} = \frac{2,5/3,5}{0,01} \approx (0,25/0,35) \text{ кВт}. \quad (8)$$

Исходя из найденных параметров напряжения и мощности, был осуществлен выбор его основных элементов (рис. 1):

- повышающего трансформатора;
- выпрямительного высоковольтного столба.

В качестве повышающего трансформатора выбран измерительный трансформатор ЗНОМ-35-65 (рис. 2) с максимальным значением напряжения 35 кВ при мощности 1 кВт. Измерительный трансформатор ЗНОМ-35-65 используется как повышающий с коэффициентом трансформации 300.

Однополупериодный выпрямитель изготовлен на базе высоковольтного селенового выпрямительного столба 15 ГЕ 144 ОУ-С с верхним пределом напряжения 40 кВ и током до 0,75 А.

Высоковольтный столб помещен в емкость, заполненную трансформаторным маслом. Электрические вводы к высоковольтному столбу осуществляются через фарфоровые изоляторы от измерительного высоковольтного трансформатора.

Первичная обмотка трансформатора подключается к сети 220 В. К внутренней первичной обмотке трансформатора подключен конечный выключатель К, исключающий подачу напряжения на первичную обмотку трансформатора, когда в опасной зоне работает персонал. Напряжение $U_{\text{вых}}$ с выхода блока питания подавалось на распылительный узел, который представляет собой резистивно-емкостную нагрузку при наличии токов утечки между электрода-

Рис. 1. Схема ВВБ

ми распылителя или чисто емкостную нагрузку при отсутствии токов утечки.

Напряжение, подаваемое на распылительный узел, фиксировалось электростатическим вольтметром С196, имеющим три шкалы на 7,5 кВ, 15 кВ, 30 кВ, класс точности киловольтметра 0,5. При помощи электростатического вольтметра возможно измерение величины напряжения как постоянного, так и переменного тока.

Параметры ВВБ ЗНОМ-35-65 следующие:

Номинальные напряжения обмотки ВН, кВ	27,5
Номинальная мощность, ВА	150...400
Предельная мощность, ВА	1000
Масса, кг	82
Габариты, мм	495 × 377 × 955

Рис. 2. Измерительный трансформатор ЗНОМ-35-65

Разработанный нами распылительный узел представляет собой конструкцию, подобную конструкции пневмоэлектрической форсунки [20–21], однако без пневмопривода, так как исследованию подлежит воздействие на струю жидкости электростатического поля как единственного действующего фактора.

Распылительный узел (рис. 3) состоит из металлического штуцера 1, подключенного к одному из выходных клемм ВВБ, и выполняющего роль полого электрода. Вторым электродом является расположенный соосно первому электроду плоский металлический диск 2, имеющий значительно больший диаметр по отношению к диаметру полого электрода 1 (более чем в 300 раз).

Для изменения геометрии электростатического поля создаваемого электродами, металлический диск 2 установлен на электроизолированной платформе, с реечным механизмом, с помощью которого осуществлялась регулировка расстояния между электродами 1 и 2.

Для исследования эффективности процесса диспергирования нами использовался 12-вольтный погружной насос, производительность которого можно было регулировать при помощи понижающего трансформатора переменного тока. Насос создавал избыточное давление (над атмосферным) в диапазоне $1,0 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^5$ Па, обеспечивая лишь транспортирование жидкости со скоростями от 3 до 5 м/с. Отметим, что при отсутствии электрического воздействия на струю жидкость всегда вытекала из штуцера в виде сплошного потока.

Для установления производительности погружного насоса 3 в зависимости от подаваемого на него напряжения питания $U_{пн}$ нами были проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости $V = f(U_{пн})$, приведенные в табл. и на рис. 4.

Экспериментальные исследования процесса диспергирования сводились к прослеживанию зависимости дисперсности распыла (среднего диаметра капель) от расхода и напряжения ВВБ питания.

Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Зависимость расхода жидкости от напряжения $U_{пн}$ погружного насоса для штуцера с диаметром отверстия 0,25 мм

Параметр	Напряжение питания насоса, В				
	6	8	10	12	14
Объем, мл	20	20	20	20	20
Время, с	261,6	181,6	131	105,2	92,6
Расход жидкости, мл/с	0,077	0,111	0,153	0,19	0,216

Рис. 4. Зависимость производительности погружного насоса от подаваемого напряжения питания $U_{пн}$

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. На электроды распылительного узла дискретно подавалось высокое напряжение в диапазоне от 0...15 кВ, которое фиксировалось электростатическим вольтметром С 196. Расход жидкости задавался напряжением питания погружного насоса. Результаты последующего процесса диспергирования, наблюдаемого нами фиксировались путем фотографирования. Для фотографирования применялся цифровой фотоаппарат Nikon D 3100 с чувствительностью съемки по ISO от 800 до 3200 единиц. Четкое изображение образовавшихся в процессе диспергирования частиц обеспечивалось подсветкой факела распыла направленным светодиодным светильником мощностью 15 Вт. Направление подсветки подбиралось экспериментально, так чтобы изображения капель распыливаемой жидкости имели наибольшую четкость и яркость. Было установлено, что оптимальным является направление подсветки, близкое к встречному по отношению к направлению фотоаппарата на объект съемки. Угол между этими направлениями составлял 120...150°.

Для оценки дисперсности при фотографировании частиц в поле съемки устанавливался эталон цилиндрической формы, размеры которого выбирались сопоставимыми с диаметрами образующихся частиц.

Полученные цифровые фотографии анализировались на экране персонального компьютера

Рис. 5. Снимок факела распыла воды при напряжении на электродной системе 10 кВ

с увеличением 100–300 раз. Диаметр следа капли на экране оценивался в результате сравнения с эталоном, размеры которого известны. На первом этапе объектом исследований служила модельная жидкость, в качестве которой была выбрана дистиллированная вода.

На рис. 5 приведен снимок факела распыла при диспергировании воды.

На каждом фотоснимке измерялось 10–30 диаметров следов капель случайным образом. В предположении, что функция распределения частиц по диаметрам следов является нормальной (гауссовой), методом малой выборки делались оценки численных характеристик этого распределения — среднего значения диаметра капли $d_{\text{ср}}$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma_{\text{кв}}$ среднего диаметра:

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum d_i}{n}, \quad (9)$$

где d_i — результат i -го измерения диаметра капли; n — количество измерений в серии;

$$\sigma_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - d_{\text{ср}})^2}{n \cdot (n - 1)}}. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные выше численные значения $d_{\text{ср}}$ (рис. 6) и $\sigma_{\text{кв}}$ устанавливали зависимость среднего диаметра частиц от расхода модельной жидкости и напряжения питания электрораспылительного узла, что с вероятностью $P = 0,666$ позволяет утверждать, что истинные значения среднего диаметра капли лежат в интервале $d_{\text{ср}} - \sigma_{\text{кв}}$ до $d_{\text{ср}} + \sigma_{\text{кв}}$.

При проведении экспериментальных исследований планировалось определение мощности, затрачиваемой на диспергирование. Но при напряжениях, при которых проводились исследования, и незначительных расходах воды через распылительный узел нам не удалось фиксировать приборами силу тока из-за малой ее величины. Это косвенно говорит о малых энергетических затратах, и, если сопоставить с принятой в начале статьи производительностью промышленных установок, то сила тока, рассчитанная по нашей методике при 10 кВ и $G = 0,15 \cdot 10^{-3}$ кг/с, составила бы $0,12 \cdot 10^{-6}$ А. Понятно, что фиксировать такие токи обычными приборами невозможно.

ВЫВОДЫ

Из проведенных выше исследований можно сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на изменение дисперсности капель оказывает изменение напряжения ВВБ в диапазоне 0...6 кВ;

Рис. 6. Зависимость среднего диаметра частиц от расхода модельной жидкости и напряжения питания электрораспылительного узла при диаметре штуцера d и расходе жидкости G : 1 — $d = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м; $G = 0,19 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 — $d = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м; $G = 0,15 \cdot 10^{-3}$ кг/с

- дальнейшее повышение напряжения влияет на изменение дисперсности менее интенсивно;
- в диапазоне 10...12 кВ изменение дисперсности практически не наблюдалось;
- мощность, затрачиваемая на диспергирование жидкостей, меньше чем у традиционных (при гид-

равлическом 2...4 кВт · ч на тонну жидкости, при механическом до 15 кВт · ч на тонну);

- электростатический способ диспергирования позволяет получить распыл с заданными параметрами дисперсности при высокой однородности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин В.А., Дитяткин Ю.Ф., Клячко Л.А. Распыливание жидкостей. М. : Машиностроение, 1967. 263 с.
2. Пажжи Д.Г., Корягин А.А., Ламм Э.Л. Распыливающие устройства в химической технологии. М. : Химия, 1975. 199 с.
3. Экнадиосянц О.К. Получение аэрозолей. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М. : Наука, 1970. С. 337–395.
4. Пажжи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М. : Химия, 1984. 256 с.
5. Пажжи Д.Г. Распылители жидкостей. М. : Химия, 1979. 216 с.
6. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1973. 750 с.
7. Бородин В.А. Распыливание жидкостей. М. : Машиностроение, 1967. 208 с.
8. Френкель А.И. На заре физики. Л. : Наука, 1970. 384 с.
9. Свинцов В.Я., Муканов Р.В. Разработка метода исследования физических характеристик жидкого топлива в высоковольтном электростатическом

поле // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 26–28.

10. Свинцов В.Я., Муканов Р.В. Новый метод сжигания жидкого топлива в топочных устройствах котельных агрегатов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 21–23.

11. Свинцов В.Я., Шматова Е.Н., Хлыстунов М.С., Муканов Р.В. Электростатический способ диспергирования жидких топлив применительно к котельным установкам // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 1. С. 255–258.

12. Свинцов В.Я. Влияние электрического поля на физические характеристики биосырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 1995. № 6. С. 14–15.

13. Электростатическое распыление // ЛКМ Портал. Режим доступа: <http://www.lkmportal.com/enc/elektrostaticheskoe-raspylenie>.

14. Бунин Я.М., Глазков А.Н. Электрооборудование промышленных предприятий. М. : Стройиздат, 1981. 391 с.

15. Шеховцов В.П. Электрическое и электро-механическое оборудование. М. : ИНФРА-М, 2004. 407 с.

16. Муканов Р.В., Свинцов В.Я., Дербасова Е.М. Исследование процесса электростатического диспергирования // Вестник МГСУ. 2016. № 5. С. 130–139.

17. Сборник Н.С. Твоя и моя физика. В.1. Уфа. : Гилем, 2001. 292 с.

18. Вестергаард В. Технология производства сухого молока. Выпаривание и распылительная сушка. Копенгаген. Дания : Niro A/S, 2003. 304 с.

19. Котел паровой ДЕ-16-14-225ГМ-О (Е-16-1,4-225ГМ) // Бийский котельный завод. Режим доступа: http://www.bikz.ru/production/kotly_paroviye/gaz_zhidkoe_toplivo/serii_d_4_0_6_5_10_16_25_t_ch/e-16-1_4-225gmnde-16-14-225gm-o/

20. Основы практической теории горения / под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 309 с.

Поступила в редакцию 24 ноября 2016 г.

Принята в доработанном виде 15 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 20 декабря 2017 г.

О Б АВТОРАХ: **Муканов Руслан Владимирович** — старший преподаватель кафедры инженерных систем и экологии, **Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ)**, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18, rvmukanov@mail.ru;

Свинцов Владимир Яковлевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и экологии, **Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ)**, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18, vladimir_svintsov@mail.ru.

REFERENCES

1. Borodin V.A., Dityatkin Yu.F., Klyachko L.A. *Raspylivanie zhidkostey* [Spraying of liquids]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 263 p. (In Russian)

2. Pazhi D.G., Koryagin A.A., Lamm E.L. *Raspylivayushchie ustroystva v khimicheskoy tekhnologii* [Spraying devices in chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 199 p. (In Russian)

3. Eknadiosyants O.K. *Poluchenie aerorozley. Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoy tekhnologii* [Preparation of aerosols. Physical basis of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 337–395. (In Russian)

4. Pazhi D.G., Galustov V.S. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey* [Fundamentals of liquids spraying]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 256 p. (In Russian)

5. Pazhi D.G. *Raspyliteli zhidkostey* [Liquids spraying devices]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 216 p. (In Russian)

6. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Main processes and apparatus of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 750 p. (In Russian)

7. Borodin V.A. *Raspylivanie zhidkostey* [Spraying of liquids]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 208 p. (In Russian)

8. Frenkel' A.I. *Na zare fiziki* [At the dawn of the physics]. Leningrad, Nauka Publ., 1970. 384 p. (In Russian)

9. Svintsov V.Ya., Mukanov R.V. *Razrabotka metoda issledovaniya fizicheskikh kharakteristik zhidkogo topliva v vysokovol'tnom elektrostatische kom pole* [Development of a method for studying the physical characteristics of liquid fuels in a high-voltage electrostatic field]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2012, no. 8, pp. 26–28. (In Russian)

10. Svintsov V.Ya., Mukanov R.V. *Novyy metod szhiganiya zhidkogo topliva v topochnykh ustroystvakh kotel'nykh agregatov* [New method for burning liquid fuel in furnace units of boiler units]. *Promyshlennoe i*

grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2012, no. 8, pp. 21–23. (In Russian)

11. Svintsov V.Ya., Shmatova E.N., Khlystunov M.S., Mukanov R.V. Elektrostaticheskiy sposob dispergirovaniya zhidkikh topliv primenitel'no k kotel'nyim ustanovkam [Electrostatic method of dispersion of liquid fuels in relation to boiler plants]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]. 2013, no. 1, pp. 255–258. (In Russian)

12. Svintsov V.Ya. Vliyanie elektricheskogo polya na fizicheskie kharakteristiki biosyr'ya [Influence of the electric field on the physical characteristics of the bioconcernery]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 1995, no. 6, pp. 14–15. (In Russian)

13. Elektrostaticheskoe raspylenie [Electrostatic spraying]. *LKM Portal* [PWM portal]. Available at: <http://www.lkmportal.com/enc/elektrostaticheskoe-raspylenie>. (In Russian)

14. Bunin Ya.M., Glazkov A.N. *Elektrooborudovanie promyshlennykh predpriyatiy* [Electrical equipment of industrial enterprises]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 391 p. (In Russian)

15. Shekhovtsov V.P. *Elektricheskoe i elektromekhanicheskoe oborudovanie* [Electrical and electromechanical equipment.]. Moscow, INFRA-M Publ., 2004. 407 p. (In Russian)

16. Mukanov R.V., Svintsov V.Ya., Derbasova E.M. Issledovanie protsessa elektrostaticheskogo dispergirovaniya [Study of electrostatic dispersion]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 5, pp. 130–139. (In Russian)

17. Sbornik N.S. *Tvoya i moya fizika* [Your and my physics]. V.1. Ufa, Gilem Publ., 2001. 292 p. (In Russian)

18. Westergaard V. *Milk Powder Technology: Evaporation and Spray Drying*. Niro A/S, 2004.

19. Kotel parovoy DE-16-14-225GM-O (E-16-1,4-225GM) [Steam boiler DE-16-14-225GM-O (E-16-1,4-225GM)]. *Biyskiy kotel'nyy zavod* [Biysk boiler plant]. Available at: http://www.bikz.ru/production/kotly_paroviye/gaz_zhidkoe_toplivo/serii_d_4_0_6_5_10_16_25_t_ch/e-16-1_4-225gmnde-16-14-225gm-o/ (In Russian)

20. Pomerantsev V.V. ed. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Bases of the practical theory of burning]. 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 309 p. (In Russian)

Received November 24, 2016.

Adopted in final form on October 15, 2017.

Approved for publication on December 20, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Mukanov Ruslan Vladimirovich** — senior lecturer, Department of Engineering Systems and Ecology, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation, rvmukanov@mail.ru;

Svintsov Vladimir Yakovlevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Engineering Systems and Ecology, **Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)**, 18 Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation, vladimir_svintsov@mail.ru.