

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 621.928.99

DOI: 10.34677/1728-7936-2019-4-52-59

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЫЛИ В ПОМЕЩЕНИЯХ С ОБОГРЕВАЕМЫМИ ПОЛАМИ

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: s.andreev@aol.com

БОГОЯВЛЕНСКИЙ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, профессор

E-mail: volbog1948@yandex.ru

ИВАНОВА ЛЮДМИЛА ЛЕОНИДОВНА, инженер

E-mail: lyudaivanova@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева; ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

Сформулирована проблема повышенной запылённости воздуха в помещениях с обогреваемыми полами. Акцентируется внимание на влияние пыли на процессы естественной сушки и фасовки сельскохозяйственных продуктов. Предложен метод определения величины подъёмной силы на основе соотношения разности плотностей окружающего воздуха и воздуха, находящегося в условном пространстве между частицей пыли и теплым полом. Рассмотрена возможность использования неоднородного электрического поля для осаждения пыли на поверхности пола. Расчёт проведён для частиц пыли, находящихся на высоте от 0,001 м до 0,1 м от устройства осаждения. Предложено выполнить рабочий орган осаждающего устройства в виде бифилярной обмотки из двух параллельных проводников, подключённых к источнику разнополярного напряжения. Для определения параметров устройства осаждения пыли использованы результаты эксперимента по выявлению зависимости силы, обусловленной влиянием неоднородного электрического поля на семена моркови и пшеницы. С целью повышения интенсивности и равномерности воздействия поля предложено с внешней стороны электродов основной пары бифилярной обмотки установить электрод дополнительной пары. При этом основная и дополнительная пары бифилярной обмотки являются идентичными, но питаются от разных источников энергии. Отмечено, что для сохранения требуемой напряжённости поля необходимо увеличить напряжение питания до 6...8 кВ.

Ключевые слова: системы отопления, обогреваемые полы, циркуляция пыли в воздухе, осаждение частиц пыли, электрическое поле, пондеромоторные силы, расположение и включение электродов.

Формат цитирования: Андреев С.А., Богоявленский В.М., Иванова Л.Л. Диэлектрическое осаждение пыли в помещениях с обогреваемыми полами // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. N 4(92). С. 52-59. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-4-52-59.

DIELECTRIC DEPOSITION OF DUST IN PREMISES WITH HEATED FLOORS

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: s.andreev@aol.com

VLADIMIR M. BOGOYAVLENSKY, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: volbog1948@yandex.ru

LYUDMILA L. IVANOVA, Engineer

E-mail: lyudaivanova@yandex.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

The paper highlights a problem of increased dustiness of air in premises with heated floors. Attention is focused on the negative effect of dust on processes of natural drying and packaging of agricultural products and medicinal plants. The authors propose

a method for determining the lifting force on the basis of the difference ratio between the density of ambient air and the air in the conditional space between the dust particle and a warm floor. The authors consider a possibility of using a non-uniform electric field to deposit dust on the floor surface. They present calculations for dust particles that are at a height of from 0.001 m to 0.1 m from the deposition device. Suggestion is made about making the working element of a precipitating device in the form of a bifilar winding of two parallel conductors connected to a source of bipolar voltage. To determine the parameters of the dust deposition device, the authors used the results of an experiment to determine the dependency of the force caused by the influence of a non-uniform electric field on carrot and dodder seeds. In order to increase the intensity and uniformity of the field effect, it has been proposed to place an additional couple electrode on the outer side of the main couple electrodes of bifilar windings. In this case, the main and additional couples of bifilar windings are identical but are powered from different sources of energy. It is noted that in order to maintain the required field strength, the supply voltage should be increased to 6...8 kV.

Key words: heating systems, heated floors, dust circulation in the air, sedimentation of dust particles, electric field, ponderomotive forces, location and activation of electrodes.

For citation: Andreyev S.A., Bogoyavlensky V.M., Ivanova L.L. Dielectric deposition of dust in premises with heated floors. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 4(92): 52-59. (In Rus.). DOI: 10.34677/1728-7936-2019-4-52-59.

Введение. В производственных помещениях, наряду с традиционным конвекционным обогревом с помощью отопительных радиаторов, сегодня находят широкое применение локальные обогреватели [1], воздушные калориферы [2] и инфракрасные облучательные установки [3]. Среди прогрессивных приёмов организации обогрева помещений особое место занимают системы отопления с обогреваемыми полами [4, 5]. Такие системы обладают рядом преимуществ: энергетической экономичностью, равномерным обогревом всего отапливаемого пространства, отсутствием традиционных отопительных радиаторов, а также относительно низкой температурой нагрева поверхности пола (25...28°C), открывающей возможность использования низкопотенциальной тепловой энергии воздуха, грунта и водоёмов с помощью тепловых насосов.

Вместе с тем широкое применение обогреваемых полов сдерживается провоцируемой ими повышенной запыленностью воздуха. Повышенная запыленность воздуха объясняется особенностями его циркуляции вследствие подъёма более прогретых и менее плотных слоев со всей поверхности пола. С одной стороны, температура отопительных радиаторов в традиционной системе отопления на 20...40°C выше температуры тёплого пола [6] и подъём прогретых слоёв должен быть более интенсивным; с другой стороны, в традиционной системе этот подъём тёплого воздуха носит локальный характер и практически ощущается только в непосредственной близости от отопительных приборов. При этом наименее комфортные области из-за движения запылённого воздуха сосредотачиваются вблизи радиаторов. В этих областях разность температур восходящего потока и вытесняемого им воздуха максимальна. В остальных местах помещения с традиционной системой отопления заметной циркуляции запылённого воздуха обычно не наблюдается.

Немалый вред способна нанести взвешенная пыль в производственных помещениях. Например, в помещениях, используемых для естественной сушки, переработки или фасовки сельскохозяйственных продуктов. Оседая на влажных измельчённых листьях, фруктах и грибах, крупные частицы пыли могут существенно повлиять на их товарное качество.

Следует признать, что полностью исключить пыль в эксплуатируемом помещении невозможно. Вентилирование внутреннего пространства сооружений не решает

проблему и к тому же требует использования фильтров [7] и увлажнителей, совмещённых с устройствами для осаждения пыли [8, 9]. Но эти устройства очищают воздух только на небольшой площади, и их необходимо периодически заправлять водой. Кроме того вентиляторы создают вибрации, потребляют электроэнергию и имеют ограниченный срок службы.

Наиболее эффективным способом устранения пыли остаётся влажная уборка помещений. Однако она очень трудоёмка и не всегда возможна.

В связи с этим весьма заманчивым представляется способ борьбы с запылённостью воздуха в помещениях с обогреваемыми полами, основанный на искусственном сосредоточении частиц пыли на полу и их последующим удалением.

Цель работы – обоснование нового принципа осаждения пыли в помещениях и расчёт параметров устройства, предотвращающего подъём мелких материальных частиц восходящими потоками теплого воздуха.

Материал и методы. В качестве материала исследования использованы сведения о механизме движения частиц пыли в воздухе и возникновении в них пондеромоторных сил, обусловленных действием неоднородного электрического поля. При рассмотрении взаимодействия силы тяжести, подъёмной силы и пондеромоторной силы был использован прием научного абстрагирования, позволивший выполнить приближенный расчет параметров электрического поля.

Результаты и обсуждение. Известно, что размеры частиц пыли могут варьироваться в диапазоне от долей микрона до 200 и более микрон [10, 11]. Для определения силы тяжести, действующей на частицы пыли, необходимо располагать информацией о их массе. Масса частицы зависит от состава и формы, что затрудняет определение её объёма по известным усреднённым размерам. К тому же масса частицы пыли чрезвычайно мала (от долей микрона до 200...300 микрон), что определяет соизмеримость силы тяжести с силой трения о воздух при оседании. Так известно, что частица пыли с диаметром в три микрона в неподвижном воздухе оседает со скоростью 10 см/с, с диаметром один микрон – $0,8 \cdot 10^{-2}$ см/с, а аэрозольная частица с диаметром в четверть микрона преодолевает это расстояние более трёх часов. Очевидно, что, находясь во взвешенном состоянии, частицы пыли могут быть

легко перенесены в пространстве боковым движением воздуха или его восходящими потоками. Впоследствии они будут оседать в местах образования минивихрей или в местах неподвижности воздуха.

Обозначим символом $F_{эл}$ дополнительную силу, препятствующую подъёму частиц пыли, рассматриваемую как силу, создаваемую электрическим полем.

Для оценки величины $F_{эл}$, действующей на частицу пыли со стороны электрического поля и обеспечивающей её неподвижность при влиянии восходящего потока, рассмотрим неравенство:

$$F_{эл} + F_{т} \geq F_{под},$$

где $F_{т}$ – сила тяжести, Н; $F_{под}$ – подъёмная сила восходящего воздушного потока, Н.

Сила тяжести определяется:

$$F_{т} = m \cdot g,$$

где m – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Значение массы частиц пыли можно вычислить через объём v и плотность ρ :

$$m = \rho \cdot v.$$

Сделаем допущение, что пыль однородна по составу, её плотность по всему объёму распределена равномерно, а сами частицы имеют правильную форму в виде шара.

Определим объём и массу частиц пыли для трех линейных размеров: 0,5 мкм, 75 мкм и 200 мкм. В соответствии с современной классификацией размеров частиц пыли [12] эти значения характеризуют мелкую, среднюю и крупную фракции соответственно. Для определения объёма воспользуемся известной формулой:

$$v = \frac{4}{3} \cdot \pi R^3,$$

где R – радиус частицы, м.

Для определения подъёмной силы восходящего воздушного потока необходимо знать значения температур и соответствующие им плотности воздуха в различных точках помещения. Практически установлено, что максимальная разность температур на высотах от пола до потолка обычно не превышает 6...9°C, соответственно, значения разностей плотностей могут достигать 8...15%.

Величина подъёмной силы, оказываемой на частицу пыли восходящим теплым воздухом, определяется по формуле:

$$F_{под} = (\rho_x - \rho_t) \cdot g V C_x, \quad (1)$$

где ρ_x и ρ_t – плотность холодного и теплого слоев воздуха соответственно, кг/м³; V – объём условного пространства, ограниченного цилиндром с основанием πR^2 и высотой, соответствующей расстоянию от пола до частицы, м; C_x – коэффициент лобового сопротивления. Будем считать, что в пределах условного пространства воздух обладает одинаковой температурой и одинаковой плотностью. Априори предположим, что воздух условного пространства не перемешивается с воздухом окружающей среды и оказывает однозначное давление на частицу пыли вверх (рис. 1).

При оценке подъёмной силы будем считать, что температура воздуха внутри условного пространства составляет +25°C, а температура снаружи – +20°C. В соответствии с данными таблицы 2, разность плотностей воздуха для этих температур окажется равной 0,625 кг/м³.

Известно, что коэффициент лобового сопротивления определяет эффективность взаимодействия воздушного потока с твёрдым телом, зависит от формы и угла расположения последнего и обычно варьируется в диапазоне от 0,03 до 1,8 [13]. Поскольку нет точной информации о форме частиц пыли и об угле их расположения по отношению к восходящему потоку, в формуле (1) принимаем $C_x = 1$.

Величина объёма условного пространства, входящего в формулу (1), определяется размерами проекции частицы на плоскость, параллельную земной поверхности, и расстоянием от пола до частицы (h). В объекте с обогреваемыми полами можно ожидать минимум температуры на некотором расстоянии от пола. Величина подъёмной силы, действующей на частицы пыли, будет приходиться на области минимума температуры.

Можно сделать вывод, что пыль, уже собравшаяся на обогреваемом полу, может подняться, если она отделена от пола и подхвачена восходящим потоком в случае приложения внешнего механического воздействия: бокового воздушного потока, вибрации или резкого нажатия обуви при ходьбе. Принимая во внимание необходимость наличия воздушного слоя между полом и частицей пыли для ее подъёма, установим $h = 0,05 \text{ м}$.

Для определения силы, обусловленной электрическим полем, воспользуемся неравенством

$$F_{эл} \geq F_{под} - F_{т}$$

Результаты расчёта $F_{т}$, $F_{под}$ и $F_{эл}$ для рассматриваемых видов и размеров частиц пыли сведены в таблицу 1.

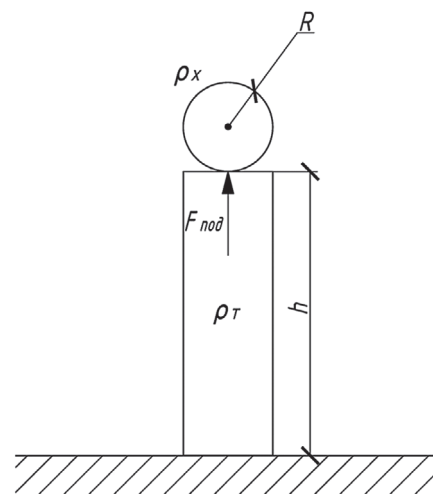


Рис. 1. Действие подъёмной силы, обусловленной восходящим потоком тёплого воздуха

Fig. 1. Effect of lifting force due to the ascending stream of warm air

Согласно таблице 1, ряд значений силы воздействия электрического поля имеет отрицательный знак; это означает, что для осаждения соответствующих частиц пыли дополнительных усилий не требуется. Такие частицы

могут оказаться в воздухе, однако с течением времени самопроизвольно осядут на пол. И, напротив, при положительных значениях $F_{эл}$ для предотвращения подъёма пыли

необходимо соответствующее усилие, которое может быть обусловлено воздействием искусственно созданного электрического поля.

Таблица 1

Силы, действующие на частицы пыли при их расположении на высоте 0,05 м и разности температур между слоями воздуха 5°C

Table 1

Forces acting on the dust particles located at a height of 0.05 m at the temperature difference between the air layers of 5°C

Вещество	Радиус частиц пыли, м	Плотность пыли, г/м ³	Масса, кг	Сила тяжести, Н	Подъёмная сила, Н	Сила воздействия электрического поля, Н
SiO ₂ (оксид кремния)	0,25·10 ⁻⁶	2330	1,525·10 ⁻¹⁶	1,4952E-15	6,11E-14	5,96E-14
	38·10 ⁻⁶		5,357·10 ⁻¹⁰	5,25087E-09	1,41E-09	-3,84E-09
	100·10 ⁻⁶		9,763·10 ⁻⁹	9,56931E-08	9,78E-09	-8,59E-08
Fe ₂ O ₃ (оксид железа)	0,25·10 ⁻⁶	5242	3,432·10 ⁻¹⁶	3,36389E-15	6,11E-14	5,78E-14
	38·10 ⁻⁶		1,205·10 ⁻⁹	1,18133E-08	1,41E-09	-1,04E-08
	100·10 ⁻⁶		2,196·10 ⁻⁸	2,15289E-07	9,78E-09	-2,06E-07
CaO (известь)	0,25·10 ⁻⁶	3300	2,161·10 ⁻¹⁶	2,11767E-15	6,11E-14	5,90E-14
	38·10 ⁻⁶		7,587·10 ⁻¹⁰	7,43686E-09	1,41E-09	-6,02E-09
	100·10 ⁻⁶		1,383·10 ⁻⁸	1,35531E-07	9,78E-09	-1,26E-07
MgO (жжёная магнезия)	0,25·10 ⁻⁶	3580	2,344·10 ⁻¹⁶	2,29735E-15	6,11E-14	5,88E-14
	38·10 ⁻⁶		8,231·10 ⁻¹⁰	8,06786E-09	1,41E-09	-6,66E-09
	100·10 ⁻⁶		1,500·10 ⁻⁸	1,47031E-07	9,78E-09	-1,37E-07
Al ₂ O ₃ (глинозем)	0,25·10 ⁻⁶	960	6,286·10 ⁻¹⁷	6,1605E-16	6,11E-14	6,05E-14
	38·10 ⁻⁶		2,207·10 ⁻¹⁰	2,16345E-09	1,41E-09	-7,51E-10
	100·10 ⁻⁶		4,022·10 ⁻⁹	3,94272E-08	9,78E-09	-2,96E-08
Дерево	0,25·10 ⁻⁶	800	5,238·10 ⁻¹⁷	5,13375E-16	6,11E-14	6,06E-14
	38·10 ⁻⁶		1,839·10 ⁻¹⁰	1,80287E-09	1,41E-09	-3,91E-10
	100·10 ⁻⁶		3,352·10 ⁻⁹	3,2856E-08	9,78E-09	-2,31E-08
Хлопок	0,25·10 ⁻⁶	140	9,166·10 ⁻¹⁸	8,98406E-17	6,11E-14	6,10E-14
	38·10 ⁻⁶		3,219·10 ⁻¹¹	3,15503E-10	1,41E-09	1,10E-09
	100·10 ⁻⁶		5,866·10 ⁻¹⁰	5,7498E-09	9,78E-09	4,03E-09
Бумага	0,25·10 ⁻⁶	200	1,309·10 ⁻¹⁷	1,28344E-16	6,11E-14	6,10E-14
	38·10 ⁻⁶		4,598·10 ⁻¹¹	4,50719E-10	1,41E-09	9,62E-10
	100·10 ⁻⁶		8,380·10 ⁻¹⁰	8,214E-09	9,78E-09	1,57E-09
Штукатурка	0,25·10 ⁻⁶	1800	1,178·10 ⁻¹⁶	1,15509E-15	6,11E-14	6,00E-14
	38·10 ⁻⁶		4,138·10 ⁻¹⁰	4,05647E-09	1,41E-09	-2,64E-09
	100·10 ⁻⁶		7,542·10 ⁻⁹	7,3926E-08	9,78E-09	-6,41E-08
Волосы, шерсть	0,25·10 ⁻⁶	1300	8,511·10 ⁻¹⁷	8,34234E-16	6,11E-14	6,03E-14
	38·10 ⁻⁶		2,989·10 ⁻¹⁰	2,92967E-09	1,41E-09	-1,52E-09
	100·10 ⁻⁶		5,447·10 ⁻⁹	5,3391E-08	9,78E-09	-4,36E-08
Сухая кожа	0,25·10 ⁻⁶	860	5,630·10 ⁻¹⁷	5,51878E-16	6,11E-14	6,06E-14
	38·10 ⁻⁶		1,977·10 ⁻¹⁰	1,93809E-09	1,41E-09	-5,26E-10
	100·10 ⁻⁶		3,603·10 ⁻⁹	3,53202E-08	9,78E-09	-2,55E-08

Поскольку решающее значение в уравнении баланса сил принадлежит высоте расположения частицы пыли над полом, рассчитаем значения $F_{эл}$ для $h = 0,001 \dots 0,1$ м. Установлено,

что сила, необходимая для предотвращения подъёма частиц пыли восходящими потоками воздуха, с увеличением высоты их расположения над полом неуклонно растёт.

На сегодняшний день известны несколько способов создания $F_{эл}$ [14-16]. Наилучшими энергетическими показателями обладает способ, предусматривающий взаимодействие предварительно заряженных частиц с внешним электрическим полем. Однако для осаждения пыли на полу этот способ в реальных условиях неосуществим. Перспективный способ создания $F_{эл}$ основан на использовании пондеромоторных сил, которые образуются в диэлектрическом теле, находящемся под воздействием неоднородного электрического поля. Когда незаряженное тело оказывается под влиянием электрического поля, на его поверхности появляются связанные заряды противоположных знаков. Вследствие этого на разные части тела со стороны поля будут действовать противоположно направленные силы (рис. 2). При этом в условиях неоднородного поля превалирующее влияние будет иметь та сила, которая действует на заряды, находящиеся в более сильном поле. В силу этой причины незаряженное тело начинает втягиваться в поле с более высокой напряженностью. На рисунке 2 такой превалирующей силой оказывается F_1 .

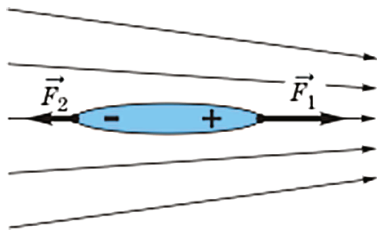


Рис. 2. Втягивание диэлектрика в область поля с большей напряженностью
 Fig. 2. Pulling the dielectric into the field with a higher intensity

Пондеромоторная сила, действующая на частицу пыли шарообразной формы, рассчитывается в соответствии с выражением [17]:

$$F_{эл} = \epsilon_1 R^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E \frac{dE}{dx}, \quad (2)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости воздуха и вещества частицы соответственно; E – напряженность поля, В/м; dE/dx – производная напряженности в направлении максимального изменения.

При $\epsilon_1 > \epsilon_2$ сила $F_{эл}$ – отрицательная, и частица пыли выталкивается из более интенсивных в более слабые участки поля; при $\epsilon_1 < \epsilon_2$ – наоборот – частица притягивается. Принимая во внимание, что $\epsilon_1 = 1$, запишем выражение (2) в виде:

$$F_{эл} = \epsilon_1 R^3 \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + 2} E \frac{dE}{dx}.$$

Величина $E \frac{dE}{dx}$ зависит от характера электрического поля. В неоднородном электрическом поле на частицу пыли действуют одновременно две силы: пондеромоторная (обусловленная неоднородностью поля) и кулоновская (обусловленная наличием на частице электрического заряда). Для частиц с радиусом порядка 1 мм кулоновская

сила превышает пондеромоторную в сотни раз, а для более мелких частиц справедливо обратное соотношение.

Пондеромоторные силы не зависят от направления напряженности, так как одновременно с его изменением меняется и направление поляризации. Пондеромоторные силы сравнительно малы и резко убывают с возрастанием расстояния между электродами. При увеличении напряженности электрического поля и уменьшении расстояния между электродами количество притягивающихся частиц возрастает.

Неоднородное электрическое поле может быть создано системой электродов, представляющих собой бифилярную обмотку из двух параллельных проводников [18]. Эта обмотка выполнена из изолированного провода, подключенного к источнику разнополярного напряжения, и уложена под верхней поверхностью пола (рис. 3).

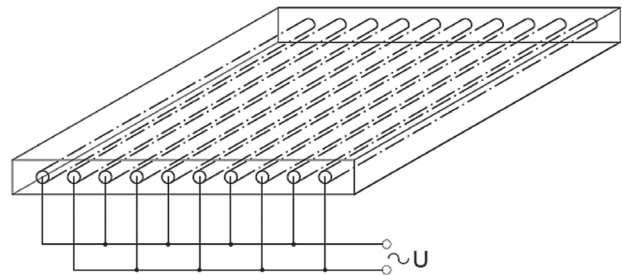


Рис. 3. Схема размещения и подключения электродов
 Fig. 3. Layout of the arrangement and connection of electrodes

При этом распределение электрического поля в окрестности бифилярной обмотки будет иметь вид, изображенный на рисунке 4.

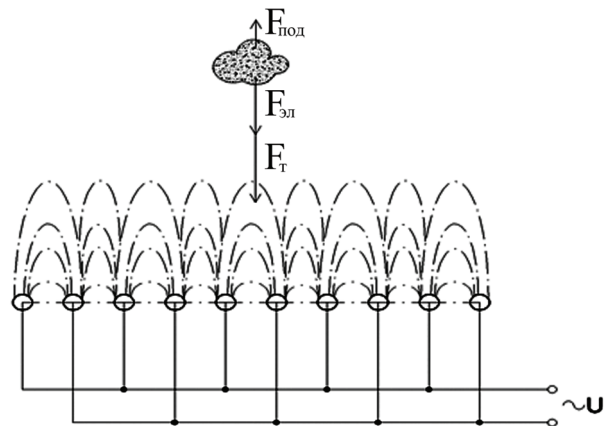


Рис. 4. Схема действия сил на частицу пыли в неоднородном электрическом поле

Fig. 4. Diagram of the action of forces on a dust particle in a non-uniform electric field

В настоящее время принята методика расчёта $F_{эл}$ с учётом особенностей формы, расположения и изоляции электродов [19], однако, ввиду её громоздкости, воспользуемся ранее полученными экспериментальными данными по исследованию сил, действующих на семена моркови и пшеницы массой от 0,5 м [20] для расчета параметров устройства, обеспечивающего требуемую $F_{эл}$.

Эксперимент проводился на установке с системой электродов, выполненных проводом «АПВ 2,5» при напряжениях питания 2, 3, 4 и 5 кВ и расстояниях между семенами и рабочим органом установки от 0 до 5 мм. Согласно результатам эксперимента были построены зависимости силы $F_{эл}$ от расстояния между семенами и электродами h при различных напряжениях U (рис. 5).

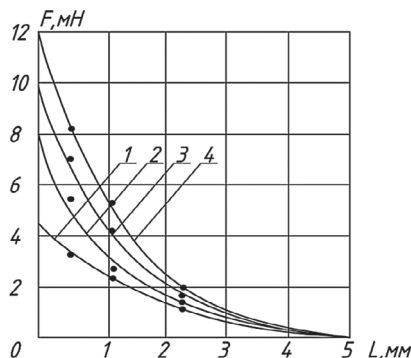


Рис. 5. Зависимость электрической силы от расстояния между семенами и электродами и от величины приложенного напряжения:
1) $U = 2$ кВ; 2) $U = 3$ кВ; 3) $U = 4$ кВ; 4) $U = 5$ кВ

Fig. 5. Relationship between the electric force and the distance between the seeds and the electrodes as well as the applied voltage:

1) $U = 2$ kV; 2) $U = 3$ kV; 3) $U = 4$ kV; 4) $U = 5$ kV

При удалении семян от электродов сила $F_{эл}$ быстро убывает, практически исчезая при $h = 0,005$ м (рис. 5). Используя результаты эксперимента применительно к поставленной задаче, мы можем заключить, что столь малая высота выходит за пределы интересующего нас интервала, хотя замеренные величины сил при $h = 0,001 \dots 0,004$ м в среднем на три порядка превышают минимально требуемые расчётные значения. Для повышения эффективности принудительного осаждения пыли предлагается между соседними электродами бифилярной обмотки разместить электроды дополнительной бифилярной обмотки (рис. 6).

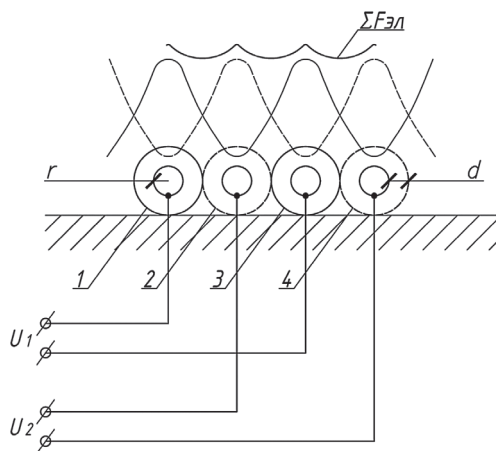


Рис. 6. Фрагмент чередующегося расположения и подключения электродов для образования суммарной силы $\Sigma F_{эл}$

Fig. 6. Fragment of alternating arrangement and connection of electrodes to form total force $\Sigma F_{эл}$

Основную пару бифилярной обмотки составляют электроды 1 и 3, дополнительную пару – электроды 2 и 4. Во избежание взаимного влияния электроды разных пар не должны иметь гальванической связи, для чего питание каждой пары осуществляется от разных источников. Поскольку расстояние между проводами одной пары увеличится на величину внешнего диаметра провода, то для сохранения требуемой напряжённости электрического поля, напряжение питания следует увеличить.

Будем считать, что радиус электрода (токоведущей части провода) составляет величину R , а толщина изоляции провода – d . Тогда расстояние между центрами пары взаимодействующих электродов составит величину

$$L = (R + d) + (2R + 2d) + (R + d) = 4(R + d).$$

При отсутствии электрода между взаимодействующей парой это расстояние окажется вдвое меньше: $L_0 = 2(R + d)$. Следовательно, для сохранения напряжённости поля напряжение питания в предложенной схеме расположения и подключения электродов должно быть увеличено до 6...8 кВ.

Вместе с тем, суммарная сила $\Sigma F_{эл}$, действующая на частицу пыли, будет определяться действием двух полей. Произведя геометрическое суммирование этих составляющих, найдем ординаты $\Sigma F_{эл}$. Как видно из рисунка 6, кривая суммарной силы $\Sigma F_{эл}$ на плоскости, перпендикулярной полу, в направлении образования витков бифилярной обмотки оказывается заметно равномернее исходных кривых. Эта равномерность обеспечивает надежное взаимодействие поля практически со всеми частицами пыли, расположенными на расчётной высоте; кроме того чередование обмоток по предложенной схеме повышает величину силы в среднем на 80% в областях точек соприкосновения проводов.

Варьируя соотношением диэлектрической проницаемости частиц пыли, материалом, толщиной изоляции, а также напряжением между проводниками бифилярной обмотки, можно изменять величину $\Sigma F_{эл}$, что, в свою очередь, влияет на интенсивность оседания частиц на поверхности обогреваемого пола.

По мере накопления пыли необходимо выключать питающее напряжение и производить влажную уборку помещения. Отметим, что расход электрической энергии на создание неоднородного электрического поля незначителен.

Выводы

Диэлектрический способ искусственного осаждения пыли устраняет один из главных недостатков систем отопления с обогреваемыми полами, открывая возможность их безвредного использования в производственных помещениях для сушки и фасовки сельскохозяйственных продуктов, а также в рабочих кабинетах и прочих помещениях с длительным пребыванием людей.

Библиографический список

1. Назарова В.И. Современные системы отопления. М.: РИПОЛ классик. 2011. 320 с.
2. Сканава А.Н. Конструирование и расчет систем водяного и воздушного отопления зданий. М.: Стройиздат, 1983. 304 с.

3. Лапицкий А.Г. Исследование электронагревателей инфракрасного излучения «Теплофон» для обогрева сельских жилых и животноводческих помещений: Дис. канд. техн. наук: 05.20.02. Красноярск, 2008. 180 с.

4. Богородов М.Е. Отопительная система (теплый пол) на основе жидкого теплоносителя: Монография. М.: Акцион-Медиа, 2006. 112 с.

5. Теплые полы. Справочник по комфортным теплым полам компании Tyco Thermal Controls, 2009. 32 с.

6. Покотилев Е.В. Системы водяного отопления. Вена: Издательство фирмы «HERZ Armaturen», 2008. 161 с.

7. Чупалов В.С. Воздушные фильтры: СПб.: СПГУТД, 2005. 167 с.

8. Нимич Г.В., Михайлов В.А., Бондарев Е.С. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Киев: ИВК, 2005. 625 с.

9. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Справочное пособие / Г.И. Стомахина, И.И. Бобровицкий, Е.Г. Малявина, Л.В. Плотникова / Под ред. Г.И. Стомахиной. М.: Пантори, 2003. 308 с.

10. Мосер П. Чего только нет в пыли! // Наука и жизнь. 1988. № 6. С. 46-51.

11. Большая Российская энциклопедия: в 30 т. Т. 2. М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. 766 с.

12. Краткая медицинская энциклопедия. Т. 2. М.: Сов. Энциклопедия, 1973. 600 с.

13. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: ОГИЗ Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. 1957, 536 с.

14. Криштафович И.А., Криштафович Ю.А. Ионный ветер и его применение URL: <http://www.treeair.com/ion.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).

15. Андреев С.А. Электродинамический метод получения аэрозоля в мелкосеменных дражжировках / И.Ф. Бородин, Д.Н. Пивоваров, С.А. Андреев, А.Л. Андержанов // Техника в сельском хозяйстве. 1991. № 4. С. 46-47.

16. Кривов С.В. Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости: Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.12. М.: Московский энергетический институт, 2000. 40 с.

17. Олофинский Н.Ф. Электрические методы обогащения. Изд. 4, перераб. и доп., М.: Недра, 1977. 579 с.

18. Система отопления жилых и производственных помещений: Патент № 119856 РФ МПК F24 D3/12 (2006.01). 2012110353/12 / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, В.М. Богоявленский, Е.А. Флегонтов; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.

19. Леонов В.С. Исследование и разработка диэлектрического сепаратора для разделения семян овощных культур в поле промышленной частоты: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. М.: МИИСП имени В.П. Горячкина. 1980. 154 с.

20. Богоявленский В.М. Диэлектрический фрикционный сепаратор для очистки семян моркови от семян повилики: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. М.: МИИСП, 1987. 197 с.

References

1. Nazarova V.I. Sovremennyye sistemy otopeniya [Modern heating systems]. Moscow, RIPOL klassik. 2011: 320. (In Rus.)

2. Skanavi A.N. Konstruirovaniye i raschet sistem vodyanogo i vozdušnogo otopeniya zdaniy [Design and calculation of water and air heating of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1983: 304. (In Rus.)

3. Lapitskiy A.G. Issledovaniye elektronagrevateley infrakrasnogo izlucheniya "Teplofon" dlya obogreva sel'skikh zhilykh i zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [Study of "Teplofon" electric heaters of infrared radiation used for heating rural residential and livestock buildings]: PhD (Eng) thesis: 05.20.02. Krasnoyarsk, 2008: 180. (In Rus.)

4. Bogorodov M.Ye. Otopitel'naya sistema (teplyy pol) na osnove zhidkogo teplonositelya [Heating system (warm floor) on the basis of a heat transfer fluid]. Monograph. Moscow, Akcion-Media, 2006: 112. (In Rus.)

5. Teplyye poly. Spravochnik po komfortnym teplym polam kompanii Tyco Thermal Controls [Warm floors. Handbook for comfortable underfloor heating from Tyco Thermal Controls], 2009: 32. (In Rus.)

6. Pokotilov Ye.V. Sistemy vodyanogo otopeniya [Water heating systems]. Vena: Izdatel'stvo firmy HERZ Armaturen, 2008: 161. (In Rus.)

7. Chupalov V.S. Vozdushnyye fil'try [Air filters]: SPb.: SPGUTD, 2005: 167. (In Rus.)

8. Nimich G.V., Mikhaylov V.A., Bondarev Ye.S. Sovremennyye sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha [Modern ventilation and air conditioning systems]. Kiyev: IBIK, 2005: 625. (In Rus.)

9. Otopleniye, ventilyatsiya i konditsionirovaniye vozdukha. Spravochnoye posobiye [Heating, ventilation, and air conditioning. Reference manual] / G.I. Stomakhina, I.I. Bobrovitskiy, Ye.G. Malyavina, L.V. Plotnikova / Pod red. G.I. Stomakhinoy. Moscow, Pantori, 2003: 308. (In Rus.)

10. Moser P. Chego tol'ko net v pyli! [There is plenty of various stuff in the dust!]. *Nauka i zhizn'*. 1988; 6: 46-51. (In Rus.)

11. Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya [Great Russian Encyclopedia]: in 30 vol. Vol. 2. Moscow, Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya, 2005: 766. (In Rus.)

12. Kratkaya meditsinskaya entsiklopediya [Brief medical encyclopedia]. Vol. 2. Moscow, Sov. Entsiklopediya, 1973: 600. (In Rus.)

13. Fateyev Ye.M. Vetrodvigateli i vetroustanovki [Wind turbines and wind plants]. Moscow, OGIz Gosudarstvennoye izdatel'stvo sel'skokhozyaystvennoy literatury. 1957: 536. (In Rus.)

14. Krishtafovich I.A., Krishtafovich Yu.A. Ionnyy veter i yego primeneniye [Ion wind and its application] URL: <http://www.treeair.com/ion.pdf> (Access date: 10.10.2013). (In Rus.)

15. Andreyev S.A. Elektrogidrodinamicheskiy metod polucheniya aerolya v melkosemennyykh drazhiratorakh [Electrohydrodynamic method of producing aerosol in small-seed pelletizers] / I.F. Borodin, D.N. Pivovarov, S.A. Andreyev, A.L. Anderzhanov. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 1991; 4: 46-47. (In Rus.)

16. Krivov S.V. Razrabotka nauchnykh osnov elektricheskoy separatsii po provodimosti [Development of scientific principles of electrical separation by conductivity]: Self-review of DSc (Eng) thesis: 05.14.12. Moscow, Moskovskiy energeticheskiy institut, 2000: 40. (In Rus.)

17. Olofinskiy N.F. Elektricheskiye metody obogashcheniya [Electric enrichment methods]. The 4th ed., reviewed and extended. Moscow, Nedra, 1977: 579. (In Rus.)

18. Andreyev S.A., Sudnik Yu.A., Bogoyavlenskiy V.M., Flegontov Ye.A. Sistema otopleniya zhilykh i proizvodstvennykh pomeshcheniy [Heating system of residential and industrial premises]: Patent No. 119856 RF MPK F24 D3/12 (2006.01). 2012110353/12, 2012. (In Rus.)

19. Leonov V.S. Issledovaniye i razrabotka dielektricheskogo separatora dlya razdeleniya semyan ovoshchnykh

kul'tur v pole promyshlennoy chastity [Research and development of a dielectric separator for the separation of vegetable seeds in the field of industrial frequency]: PhD (Eng) thesis: 05.20.02. Moscow, MIISP imeni V.P. Goryachkina. 1980: 154. (In Rus.)

20. Bogoyavlenskiy V.M. Dielektricheskiy friktsionnyy separator dlya ochistki semyan morkovi ot semyan poviliki [Dielectric friction separator for separating carrot seeds from dodder seeds]: PhD (Eng) thesis: 05.20.02. Moscow, MIISP, 1987: 197. (In Rus.)

Критерии авторства

Андреев С.А., Богоявленский В.М., Иванова Л.Л. провели обобщение и написали рукопись. Андреев С.А., Богоявленский В.М., Иванова Л.Л. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 06.05.2019

Опубликована 22.08.2019

Contribution

Andreyev S.A., Bogoyavlenskiy V.M., Ivanova L.L. summarized the material and wrote the manuscript. Andreyev S.A., Bogoyavlenskiy V.M., Ivanova L.L. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on May 6, 2019

Published 22.08.2019